

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Departamento de Geografia

Elizêne Veloso Ribeiro

**A INDÚSTRIA METALÚRGICA NA REGIÃO DE PIRAPORA -
MG/BRASIL: A DISTRIBUIÇÃO DA POLUIÇÃO POR MATERIAL
PARTICULADO, SUA COMPOSIÇÃO E IMPACTOS ASSOCIADOS**

Belo Horizonte
2016

Elizêne Veloso Ribeiro

A INDÚSTRIA METALÚRGICA NA REGIÃO DE PIRAPORA -
MG/BRASIL: A DISTRIBUIÇÃO DA POLUIÇÃO POR MATERIAL
PARTICULADO, SUA COMPOSIÇÃO E IMPACTOS ASSOCIADOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do
Departamento de Geografia da Universidade Federal
de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção
do título de Doutor em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental

Orientadora: Prof. Dra. Vilma Lúcia Macagnan
Carvalho

Coorientador: Adolf Heinrich Horn

Belo Horizonte
2016

V484i Ribeiro, Elizêne Veloso.
2016 A indústria metalúrgica na região de Pirapora-MG/Brasil [manuscrito]
: a distribuição da poluição por material particulado, sua composição e
impactos associados / Elizêne Veloso Ribeiro. – 2016.
161 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Vilma Lúcia Macagnan Carvalho.

Coorientador: Adolf Heinrich Horn.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Geografia, 2016.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 143-152.

Inclui apêndices e anexos.

1. Ar (Poluição) – Pirapora (MG) – Teses. 2. Metais pesados –
Pirapora (MG) – Teses. 3. Impacto ambiental – Pirapora (MG) – Teses.
I. Carvalho, Vilma Lúcia Macagnan. II. Horn, Adolf Heinrich. III.
Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. IV.
Título.

CDU: 577.4(815.1)



INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA de
PÓS-GRADUAÇÃO
em **GEOGRAFIA**
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Av. Antônio Carlos, 6627 - Bairro Pampulha
Caixa Postal 719 Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901
(31) 3409-5404 | (31) 3409-5494
posgeog@igc.ufmg.br

Tese intitulada **A INDÚSTRIA METALÚRGICA NA REGIÃO DE PIRAPORA - MG/BRASIL: A DISTRIBUIÇÃO DA POLUIÇÃO POR MATERIAL PARTICULADO, SUA COMPOSIÇÃO E IMPACTOS ASSOCIADOS**, de autoria da doutoranda Elizêne Veloso Ribeiro, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da UFMG como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental.

Aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Profª. Dra. Vilma Lúcia Macagnan Carvalho - IGC/UFMG
Orientadora

Prof. Dr. Adolf Heinrich Horn - IGC/UFMG
Coorientador

Prof. Dr. Antônio Pereira Magalhães Júnior - IGC/UFMG

Prof. Dr. Fábio Soares de Oliveira - IGC/UFMG

Profª. Dra. Cristiane Valéria de Oliveira - IGC/UFMG

Prof. Dr. Luiz Henrique Arimura Figueiredo - UNIMONTES

Prof. Dr. Hernando Baggio Filho - UFVJM

Belo Horizonte, 17 de Agosto de 2016.

*Dedico a toda minha família citando minha vizinha Flora, mulher guerreira norte mineira,
inspiração de luta, exemplo de coragem e generosidade...*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Adolf Heinrich Horn pela orientação, por me incluir no projeto de pesquisa no qual este trabalho está inserido e por todas as conversas, suporte e incentivo nos últimos 10 anos.

A minha orientadora Vilma Lúcia Macagnan Carvalho pela serenidade nas suas orientações, apoio e exemplo de força como mulher e profissionalismo.

Ao DAAD pela bolsa de estágio e a TU-Clausthal por me receber e contribuir com as análises laboratoriais. Especial agradecimento aos Professores Dr. Carl-Diedrich Sattler Hans-Jürgen Gursky pela recepção e orientações durante minha estada.

A Capes pela bolsa de pesquisa.

Aos professores Fábio Soares Oliveira e Antônio Pereira Magalhães Junior pela participação nas bancas desde a qualificação e por serem exemplo de didática em sala de aula e postura profissional na vida acadêmica.

Aos professores Cristiane Valéria (UFMG), Hernando Baggio Filho (UFVJM) e Luiz Henrique Arimura (UNIMONTES) por sua participação na banca de defesa e por suas fundamentais contribuições.

Aos colegas da salinha 1027, William Fortes e Amando Aguiar, pela ajuda e apoio.

A Izabela Claret pelas análises estatísticas e tantas conversas proveitosas.

A William Figueiredo pelo trabalho no laboratório de ICP e disponibilidade para tirar minhas dúvidas.

A companheiro cerradeiro Wallace Trindade pela parceria nas pesquisas e pelos momentos que dividimos durante esta caminhada, do Norte de Minas à desafiante temporada nas Terras Germânicas e Europeias.

Ao companheiro de campo Marcelo Alves Ferreira por sua valorosa ajuda nos trabalhos de campo e imprescindível atuação no monitoramento e coleta de amostras.

A Isadora e Áurea Garcia pela companhia, apoio, incentivo e tantos momentos compartilhados. Aos demais Garcias que fizeram parte desta caminhada em outras etapas: Rosalva, Alice, Iolanda e Miller.

A Hélio (*in memoriam*) meu primeiro amigo em Pirapora que me incentivou nos meus primeiros passos nesta minha formação acadêmica.

A Minha amiga Alexandra Medina pelo apoio, amizade, incentivo e por me proporcionar necessários momentos de descontração. E, claro, ao Reinaldo, exemplo de pessoa e profissional.

Aos colegas da CODAGEO - IFMG pelo apoio na reta final.

A minha eterna diretora Jane Santos que acompanhou e incentivou os fundamentais primeiros passos para construção da minha vida acadêmica.

A Cunhas Raquel pelas conversas, visitas e hospedagens nas idas e vindas ao Norte de Minas.

A tia Zilé pelo apoio em toda minha caminhada até este momento, por me receber sempre com tanto carinho e comidinhas gostosas; e pelas conversas que muito me ensinaram.

A toda minha família por todo apoio, incentivo, orações e pelos momentos em casa que renovaram minhas forças para seguir com foco nesta busca. Por entender os momentos de ausência e compreender minhas escolhas.

Aos meus sobrinhos Gabrielle, Grazielle, Pedro Gabriel, Andressa, Yasmim, Arthur, Eliza e Enzo Miguel por tornar meus momentos em casa ainda mais especiais e trazer a alegria contagiante com a pureza que só as crianças podem proporcionar.

A Deus por conduzir meus passos, me levantar e mostrar o caminho nos momentos que acreditava não ter mais saída e forças.

Eventually, all the particulate matter is deposited on the Earth's surface
GIRARD, 2010, p.56

RESUMO

O desenvolvimento urbano e industrial tem gerado um aumento contínuo na emissão de poluentes atmosféricos, dentre os quais se destaca o material particulado. A presença desses poluentes na atmosfera assim como sua deposição na superfície pode ser responsável por diversos tipos de impactos negativos em nível local, regional e global. A pluma formada pelas emissões atmosféricas das indústrias metalúrgicas em Pirapora-MG tem chamado atenção para os possíveis problemas associados à poluição atmosférica na região. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a poluição atmosférica por material particulado causada pelas indústrias de beneficiamento de Silício e Ferro-Silício em Pirapora. Os procedimentos metodológicos incluíram: caracterização e estudo da distribuição espacial da pluma de particulados a partir da análise de dados de clima, geomorfologia e imagens de satélite; monitoramento das partículas atmosféricas em estações de amostragem nos municípios de Pirapora e Buritizeiro; análises laboratoriais para caracterização granulométrica, mineralógica (DFX), química (FRX, ICP-OES, TOF-SIMS) e morfológica (MET, MEV, EPMA) do material particulado emitido e das partículas atmosféricas; e avaliação das concentrações de metais pesados em amostras de solo (ICP-OES). Quanto a circulação da pluma, predominam ventos de NE (31,70%) que condicionam uma maior frequência de movimentação da pluma para SW (39,9%). A direção geral preferencialmente para oeste, em mais de 80% das imagens de satélites analisadas, coloca os espaços urbanos na área de maior deposição das partículas. O material particulado emitido caracteriza-se por sílica amorfa (95,52%) com partículas de tamanho entre 0,18 e 123 μm , dos quais 30% correspondem à fração inalável (<10 μm). A composição química das partículas inclui magnetita (FeO_4), carbono e os metais Zn, Cu, Pb, Cr e Ni. As partículas atmosféricas de origem industrial possuem morfologia esférica típica, compostas principalmente por Si, Fe, Ba e Cr. Nos solos, as concentrações de Fe (49360 ppm) e Cr (60,1ppm) apresentaram-se significativamente maiores na área mais próxima do distrito industrial indicando a influência do material particulado neste compartimento receptor. A presença do Cr no solo e nas partículas esféricas, inclusive respiráveis, alerta para aos possíveis efeitos crônicos na saúde da população. Espera-se que as informações sobre a poluição atmosférica apresentadas neste trabalho possam contribuir para a gestão da qualidade ambiental na área de estudo a começar com um sistema de controle e fiscalização da emissão de material particulado que inclua a participação da população.

Palavras-chave: poluição, partículas atmosféricas, microanálises, fotomicrografias e metais pesados.

ABSTRACT

Urban and industrial development have generated a continuous increase in atmospheric pollutant emissions, among them stands up the particulate material. The presence of these pollutants in the atmosphere as well as their deposition can be responsible for diverse types of negative impacts at local, regional and global level. The plume formed by the atmospheric emissions of the metals industry in Pirapora-MG has called attention to the potential problems associated with air pollution in the region. In this context, the objective of this work was to analyze the air pollution by particulate matter caused by Silicon and Iron-Silicon industries in Pirapora. The methodological procedures included characterization and study of the spatial distribution of particulate plume based on climate data analysis, geomorphology and satellite images. Also, it was conducted the monitoring of atmospheric particulate at sampling stations in the municipalities of Pirapora and Buritizeiro. The emitted particulate matter and atmospheric particles were analyzed for size grain distribution, mineralogy determination (DFX), chemical (XRF, ICP-OES, TOF-SIMS) and morphological analyses (TEM, SEM, EPMA). Finally, heavy metals concentrations in soil samples (ICP-OES) were measured. In relation to the plume circulation, NE winds (31%) predominated, which determine a higher frequency of the movement of the plume SW (39.9%). The general direction to west, in more than 80% of the analyzed satellite images, place the urban localities in the area of higher deposition of the particles. The particulate material originated from these industries is characterized by amorphous silicon (95.52%), with particles in sizes between 0.18 and 123 μm , of which 30% are related to the inhalable fraction ($< 10 \mu\text{m}$). The chemical composition includes magnetite (FeO_4), carbon, and metals like Zn, Cu, Pb, Cr and Ni. The atmospheric particles of industrial origin showed a spherical morphology, with its composition consisted mainly of Si, Fe, Ba and Cr. In the soils Fe (49360 ppm) e Cr (60,1ppm) concentrations showed higher values in the areas closest to the industrial district indicating the influence of the particulate material in the soil chemical composition. The presence of Cr in soil and spherical particles, including the inhalable particles, alert to the possible chronic effects on the health of local population. It is expected that the information about air pollution presented in this work can contribute to the management of environmental quality in the study area enabling the establishment of control and supervision systems of particulate matter emissions that includes the participation of the population.

Key-words: pollution, atmospheric particles, microanalysis and heavy metals.

ZUSAMMENFASSUNG

Die städtische und industrielle Entwicklung hat einen kontinuierlichen Anstieg in der Emission von Luftschadstoffen geführt, unter denen sich der Feinstaub ($<10\mu$) hervorhebt. Das Schweben dieser Schadstoffe in die Atmosphäre sowie deren Ablagerung auf Oberflächen führt zu den unterschiedlichsten negativen Auswirkungen auf lokaler, regionaler und globaler Ebene. Der Emissionsfahne der Hüttenindustrie in Pirapora, macht speziell aufmerksam auf mögliche Probleme durch Luftverschmutzung in dieser Region von Minas Gerais. Das Ziel dieser Arbeit ist, die Luftverschmutzung verursacht durch den Feinstaub der Silizium und Eisensilizium verarbeitenden Industrie und ihre Umwelteffekte in der Region von Pirapora zu analysieren. Die dazu angewendeten Verfahren sind räumliche und Zeitliche Verteilung der Partikel per Bilddatenauswertung, Wetter- und Klimanalyse, geomorphologische Studien sowie chemische, mineralogische und morphologische Untersuchungen an isolierten Teilchen und an Boden und Luftproben. Die angewendeten Methoden sind Bildauswertung, DRX, FRX, ICP-OES, TOF-SIMS, MET, SEM und EPMA. Beobachtungen ergaben eine orientierte Verteilung der Staubfahne (NE (31,70% nach SW 39,9%) was die Bestriechnung des urbanen Bereich in 80% der Fälle einschliesst. Der emittierte Feinstaub setzt sich neben geringen Anteilen an kristallinem Quarz, Magnetit, Baryt und anderen überwiegend aus amorphe Kieselsäure (95.52 %) mit der Korngröße zwischen 123 und 0,18 μm , davon etwa 30 % unter $< 10 \mu\text{m}$, entsprechen. Die chemische Untersuchung der Partikel zeigt Si, Fe, C, und Spurenelemente wie Zn, Ni, Cr, Cu, Pb und Ba. Abgelagerte Staubanteile sorgen in betroffenen Böden für erhöhte Gehalte an Fe (~ 50.000 ppm) und Cr (>60 ppm) und zeigen höchste Gehalte direkt an der Quelle, sowie an Flächen, welche der Staubfahne ausgesetzt sind. Neben diese Bodendaten zeigen die Beobachtungen von Luftemissionsproben und Daten aus Filtern einen hohen Anteil diese Feinstaubs und eine mögliche Korrelation mit akuten und chronischen Gesundheitsproblemen (Lunge; Haut).

Stichwörter: Luftverschmutzung, Feinstaub, Korngrößenverteilung, Schwermetalle, Umwelteinfluss

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - Emissões de partículas em todo o País de acordo com a fonte. | 37 |
| FIGURA 2 - Mapa do contexto regional da área de estudo. | 41 |
| FIGURA 3 - Acesso a área de estudo, localizada nos municípios de Pirapora e Buritizeiro. | 42 |
| FIGURA 4 - Mapas das unidades geológicas e classes de solos na área de estudo. | 44 |
| FIGURA 5 - MDE e rede de drenagem da área de estudo. | 46 |
| FIGURA 6 - Médias de Precipitação e temperatura média compensada na área de estudo. Fonte: INMET, 2014. | 47 |
| FIGURA 7 - População rural e urbana em Pirapora e Buritizeiro entre 1970 e 2010. Fonte: IBGE, 2014. | 49 |
| FIGURA 8 - Distribuição espacial das Ferroligas em Minas Gerais. Os números indicam a quantidade total de fornos por município. | 52 |
| FIGURA 9 - Vazão dos fornos de produção de ligas em Minas Gerais em 2010. As setas indicam as maiores emissões da metalurgia de Silício Metálico e Ferro-Silício em comparação com os demais processos de produção de Ferroligas. A vazão refere-se ao total, incluindo o Material Particulado. Fonte: (FEAM, 2010b, p. 139). | 53 |
| FIGURA 10 - Fluxograma de atividades. | 57 |
| FIGURA 11 - Pluma de particulados nas Bandas 1, 2, 3 e 4 em composições coloridas visível (312) e falsa cor (413) - Imagens Landsat 5 TM. | 59 |
| FIGURA 12 - Área de estudo entre os municípios de Pirapora e Buritizeiro. Área hachurada indicando a delimitação para os pontos de monitoramento e coleta de amostras. | 62 |
| FIGURA 13 - Amostragem de particulados em campo. Em sequência: posição em campo, coletor e películas adesivas. | 64 |
| FIGURA 14 - Localização dos pontos amostragem e a distância do distrito industrial (km). | 66 |
| FIGURA 15 - Fotografias das partículas e o output do programa Quantikov com os histogramas de distribuição dos tamanhos (Parâmetros geométricos) e distribuição de fases. | 72 |
| FIGURA 16 - Pontos de coleta de amostras de solos e classes de solos correspondentes. | 73 |
| FIGURA 17 - Minitrincheira aberta para coleta do solo. | 74 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 18 - 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..... | 77 |
| FIGURA 19 - 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 Software (SGeMS) disponível em http://sgems.sourceforge.net/?q=node/77 | 78 |
| FIGURA 20 - Direção e velocidade do vento em 2011. | 80 |
| FIGURA 21 - Velocidade do vento em 2011. | 80 |
| FIGURA 22 - Variação da dispersão e direção de movimentação das emissões industriais em 2011. Escala de visualização 1:100.000. Visualizar padrão de circulação da pluma. Observar a presença de nuvens na imagem do dia 11/08/2011. | 81 |
| FIGURA 23 - Evolução da velocidade e direção dos ventos em 2011 | 82 |
| FIGURA 24 - Velocidade e Direção dos ventos em 2011. | 83 |
| FIGURA 25 - Direção do vento e movimentação da pluma. (1) Concentração dos ventos de leste e altas velocidades em julho (>5,1 m/s) condicionando o perfil da pluma maior que 100km. (2) Vetor de ventos de sudoeste e dispersão secundária da pluma para norte em junho | 85 |
| FIGURA 26 - 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. | 88 |
| FIGURA 27 - Perfis topográficos mostrando a área rebaixada onde a pluma circula, preferencialmente, condicionada pela topografia (Perfil topográfico). | 89 |
| FIGURA 28 - Distribuição da pluma de particulados e o condicionamento geomorfológico. Observar pluma e o contraste com a rugosidade do terreno. Circulação da pluma para Norte(I) e sul (II) condicionada pela Barreira A e deslocamento para Oeste (III) passando pela Barreira B. | 90 |
| FIGURA 29 - Curvas da distribuição granulométrica das partículas mostrando a distribuição cumulativa (gráfico inclui a Frequência para cada tamanho - Barras) e densidade de distribuição..... | 94 |
| FIGURA 30 - Difratoformas da microssilica revelando amorficidade do material e compostos de Ferro (pico da magnetita). (A) material particulado mais claro, produção silício maior pureza (B) material particulado mais escuro, produção Ferro-Silício..... | 95 |
| FIGURA 31 - Identificação de picos (do quartzo e fluorita) no material amorfo nos difratogramas. (Qz - Quartzo / Fr - Fluorita)..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 32 - Variação na coloração da Pluma da emissão atmosférica na região. | 96 |
| FIGURA 33 - Mapas microquímicos dos íons negativos(TOF -SIMS 106*106µm)..... | 100 |
| FIGURA 34 - Mapas microquímicos dos íons positivos (TOF-SIMS - 106 * 106 µm). Ocorrência pontual do Cu e distribuição do Cr e Ba..... | 101 |
| FIGURA 35 - Composição química e morfologia do material particulado emitido (Microquímica MET). (I) - Sílica; (II) Sílica e compostos de Ca, K e Mg; (III) Sílica e Compostos de Ca,K, Al, Fe e Ba e (IV) Sílica e compostos de Ca, K e Fe..... | 102 |
| FIGURA 36 - Morfologia e química do material particulado emitido (Microquímica MET). (I) Sílica e compostos de Ca, K, Al, Mg e Fe; (II e III) Sílica e compostos de Ca, K, Al e Mg; (IV) e Sílica e compostos de Ca, K, Al, Mg, Mn e Fe..... | 103 |
| FIGURA 37 - Sequência de imagens do material particulado de acordo com a distância da área de emissão nos meses de Março(A), Junho(B) e Setembro(C). Informação da orientação do ponto de coleta em relação do DI (Fotografias microscópio óptico - Aumento 2,5x)..... | 106 |
| FIGURA 38 - Coletores com material particulado (película adesiva) na área de circulação da pluma de poluentes em setembro(A), fevereiro(B) e maio(C) Pontos de acordo com a distância e orientação em relação à área de emissão (DI) (Microscópio Óptico - 2,5x). | 108 |
| FIGURA 39 – Coletores com material particulado na área de circulação da pluma de poluentes em setembro(A), fevereiro(B) e maio(C). Pontos de acordo com a distância e orientação em relação à área de emissão (Microscópio Óptico - ampliação 2,5x ocular).... | 109 |
| FIGURA 40 - Material Particulado na área Urbana (Pirapora). À esquerda, partícula esférica de origem industrial indicada pela seta; e à direita, aglomerado de argilominerais da superfície. (Microscópio óptico 10X e 50X, respectivamente) | 110 |
| FIGURA 41 - Mosaico de imagens das partículas esféricas de origem industrial identificadas nos diferentes pontos de coleta. Setas indicam as partículas menores (microscópio óptico em diversos aumentos - 2,5X/5X/10X/50X)..... | 111 |
| FIGURA 42 - Box Plot dos valores dos parâmetros geométricos do Material Particulado para os três locais de amostragem. Valores no gráfico representam a média, média ± desvio padrão, valores mínimos e máximos..... | 113 |
| FIGURA 43 - Box Plot do Número Total de Objetos e Comprimento para os três locais de amostragem. Valores no gráfico representam a média, média ± desvio padrão, valores mínimos e máximos. | 114 |
| FIGURA 44 - Resultados da Análise de Componentes Principais (PCA). | 116 |
| FIGURA 45 - Ordenação dos locais de amostragem segundo resultado do PCA. | 116 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 46 - Compostos de Carbono alongados e partículas esféricas (Distrito Industrial-MP01-01). Diâmetro das partículas esférica entre 6 e 72 μ m) | 119 |
| FIGURA 47 - Partículas atmosféricas na área de entorno (MP01-02 - 1,8 km). Menor ocorrência e diâmetro das partículas esféricas. | 120 |
| FIGURA 48 - Partículas atmosféricas no centro urbano de Pirapora (MP01-03 - 4,5 km) ... | 121 |
| FIGURA 49 - Partículas Atmosféricas na área urbana de Buritizeiro (6,5 km). | 122 |
| FIGURA 50 - Fotomicrografia mostrando composição e morfologia das partículas de Carbono. Sílica depositada sobre partícula de carbono. (EPMA – A40) | 123 |
| FIGURA 51 - Fotomicrografia de partículas de Carbono(I) e de Sílica (II) ((SEM -EDX - A43). | 124 |
| FIGURA 52 - Fotomicrografia (SEM EDX-A43) mostrando a morfologia (A,B), tamanho (C,E) das partículas de silício e composição (D, F). Observar a presença de compostos de Ferro mostrada pelo pico no diagrama F. | 125 |
| FIGURA 53 - Morfologia(A) e composição química de partículas esféricas. Presença do Ba nas partículas (B,C) com maior concentração de Fe e de Si (Microsonda - A40). | 126 |
| FIGURA 54 - Morfologia (A) e composição das partículas. Espectros dos pontos 1 (B) e 2(C) mostrados na fotomicrografia (Microsonda A 40) | 127 |
| FIGURA 55 - Partículas esféricas de Fe e Cr (Microsonda -A39).Diagrama mostrando elementos do ponto 1 na imagem. | 128 |
| FIGURA 56 - Partículas compostas de sais e os respectivos diagramas. As partículas apresentaram bordas regulares e formas arredondadas compostas por K, Cl, Ca, e Na. | 129 |
| FIGURA 57 - Partículas inorgânicas e origem industrial (I, II, III) e os respectivos diagramas. Morfologia das esferas de Fe e Cr (IV). | 130 |
| FIGURA 58 - Tamanho e composição das partículas esféricas contendo Cromo (TEM-A23). | 131 |
| FIGURA 59 - Ponto de amostragem localizado a 2,8 km do distrito industrial. Em sequencia, vista da pluma de poluentes particulados a partir ponto de amostragem (A) e a vegetação na área de coleta das amostras de solo (B). | 135 |
| FIGURA 60 - Mapas das zonas de alteração da qualidade ambiental. | 138 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - Grandes episódios de poluição atmosférica no mundo..... | 26 |
| TABELA 2 - Classificação do Material Particulado pelo tamanho (Diâmetro) | 35 |
| TABELA 3 - Estações climatológicas no município de Pirapora | 60 |
| TABELA 4 - Modelo de organização dos dados para entrada no WRPLOT, exemplo para o primeiro dado de 2011..... | 61 |
| TABELA 5 - Aspectos gerais dos pontos de amostragem | 67 |
| TABELA 6 - Análise química por fluorescência de raios X do material emitido..... | 97 |
| TABELA 7 - Composição química elementar da material emitido (ICP-OES) | 98 |
| TABELA 8 - Resultados do teste de correlação entre os parâmetros medidos. Valores em negrito significativos para $p < 0,05$ | 115 |
| TABELA 9 - Resultados da Análise de Variância (ANOVA) dos diversos parâmetros em relação aos locais de amostragem. Valores em negrito teste significativo para $p < 0,05$ | 117 |
| TABELA 10 - Correlação entre as concentração elementar e quantidade de Silício e Carbono no material particulado. | 124 |
| TABELA 11 - Metais Pesados - concentrações e avaliação da qualidade ambiental..... | 133 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1. | Hipóteses | 20 |
| 1.2. | Objetivo geral | 20 |
| 1.2.1. | Objetivos específicos | 21 |
| 2. | A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E A EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO..... | 22 |
| 2.1. | A poluição da atmosfera..... | 24 |
| 2.1.1. | Os poluentes atmosféricos..... | 30 |
| 2.1.1.1. | O material particulado | 33 |
| 2.1.1.2. | Emissões industriais de material particulado e as questões ambientais relacionadas aos compostos de sílica..... | 37 |
| 3. | LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA REGIÃO. | 41 |
| 3.1. | Aspectos fisiográficos | 43 |
| 3.2. | As mudanças no uso da terra e a atividade industrial | 48 |
| 3.2.1. | As emissões atmosféricas de partículas na metalurgia do silício: contextualização e aspectos gerais..... | 51 |
| 4. | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 56 |
| 4.1. | Distribuição espacial da pluma de particulados | 56 |
| 4.1.1. | Dados climáticos..... | 60 |
| 4.1.2. | Condicionantes geomorfológicos | 61 |
| 4.1.3. | Delimitação da área de estudo: monitoramento e coleta de amostras | 61 |
| 4.2. | Amostragem material particulado na atmosfera | 63 |
| 4.2.1. | Monitoramento e pontos de amostragem | 65 |
| 4.3. | Análises laboratoriais | 68 |
| 4.3.1. | Procedimentos para caracterização do material particulado emitido..... | 68 |
| 4.3.2. | Caracterização química e morfológica do material emitido e das partículas atmosféricas | 69 |
| 4.3.3. | Distribuição espacial do material particulado | 70 |
| 4.3.4. | Concentrações de metais pesados no solo..... | 73 |
| 4.4. | Mapas | 75 |
| 5. | COMPORTAMENTO DO VENTO E ASPECTOS GEOMÓRFICOS QUE CONDICIONAM A MOVIMENTAÇÃO DA PLUMA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE PIRAPORA - MG | 76 |
| 5.1. | Variação anual dos vento e movimentação da pluma em longa distância | 79 |
| 5.2. | Controle Geomorfológico | 86 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6. | CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E MORFOLÓGICA DO MATERIAL PARTICULADO EMITIDO PELAS METALÚRGICAS NA REGIÃO DE PIRAPORA-MG | 93 |
| 6.1. | Composição química e concentrações de metais pesados..... | 96 |
| 6.2. | Microquímica de superfície e morfologia das partículas | 98 |
| 7. | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MORFOLÓGICA E A DISTRIBUIÇÃO DAS PARTICULAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA NA QUALIDADE AMBIENTAL..... | 105 |
| 7.1. | Material particulado: distribuição e identificação das partículas de origem industrial..... | 105 |
| 7.1.1. | Material particulado no espaço urbano | 105 |
| 7.1.2. | Material particulado na área de mapeamento da pluma de poluição | 107 |
| 7.2. | Quantidade de partículas e propriedades geométricas: Análise estatística usando dados do Quantikov..... | 112 |
| 7.3. | Morfologia e composição química das partículas atmosféricas de origem antropogênica..... | 117 |
| 7.4. | O solo como compartimento ambiental receptor: avaliação das concentrações de Metais Pesados. | 132 |
| 7.4.1. | Avaliação ambiental das concentrações de metais no solo | 136 |
| 7.4.2. | A poluição atmosférica por material particulado e a alteração da qualidade ambiental..... | 137 |
| 8. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 140 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 143 |
| | APÊNDICES | 153 |
| | ANEXOS..... | 159 |

1. INTRODUÇÃO

No mundo urbanizado e industrial é comum que a população busque ambientes naturais de ar puro para descanso e atividades recreativas. A problemática ambiental decorrente, em grande parte, da Revolução Industrial, chama atenção para a importância da qualidade de recursos vitais como a água e o ar.

O ar compõe a camada fundamental para a vida e processos físicos e químicos na Terra. A atmosfera, como uma mistura gasosa, é produto da interação entre componentes bióticos e abióticos do sistema em que se destaca o equilíbrio dinâmico entre o consumo e produção de compostos como dióxido de carbono e oxigênio.

Apesar de ser conhecida como a camada gasosa predominantemente composta pelos elementos nitrogênio e oxigênio, a qualidade do ar está condicionada aos elementos de menor concentração, a exemplo dos metais pesados e compostos particulados líquidos e sólidos.

A parte sólida do material particulado, por sua fração visível, é um reconhecido parâmetro no diagnóstico de poluição da atmosfera. Os efeitos das partículas dependem das propriedades físicas, químicas, morfológicas das mesmas e dos compostos químicos a elas adsorvidos.

O material particulado pode entrar na atmosfera por fontes naturais ou antrópicas. As fontes antrópicas, por suas características de emissão e diversidade de composição das partículas, são associadas aos problemas de qualidade do ar, principalmente nas áreas urbanas e industriais.

Os primeiros estudos que versam sobre a temática dos poluentes atmosféricos decorreram de eventos episódicos de poluição em centros urbanos industriais. Dentre os mais conhecidos, chama atenção o ocorrido em Londres em 1952, em que a poluição da atmosfera causou um expressivo número de mortes e doenças associadas, como descreve Derisio (2012).

Na atualidade, os estudos sobre este tema se dividem entre aqueles que analisam os compostos "causadores do aquecimento global" e os voltados para pesquisa do efeito desses poluentes na saúde dos seres humanos. Dentre estes efeitos, os mais comuns são os que afetam os sistemas respiratório e cardiovascular, com maior impacto nos grupos de idosos e crianças. Pessoas com doenças crônicas no sistema respiratório também são mais susceptíveis aos efeitos da poluição da atmosfera por particulados (BRAGA, PEREIRA e SALDIVA 2014, CANÇADO, 2003).

Baird (2002, p.147) afirma que a poluição do ar pela presença de particulados tem um efeito maior sobre a saúde humana em comparação com aquela produzida diretamente pelos

gases. Estudos recentes mostram que os efeitos adversos da poluição do ar, principalmente em relação ao material particulado, acontecem mesmo para baixas concentrações dos poluentes (MAIOLI, 2011, p. 23).

Ridker (1968, p.12-13) aponta que este é um problema multidimensional, com fontes variáveis e que afeta múltiplos objetos, podendo produzir uma ampla variedade de alterações no comportamento. Além disso, os seus efeitos não são imediatos, propagam-se no tempo em diferentes maneiras, dependendo do objeto afetado e da frequência, duração e intensidade da emissão.

Neste sentido, é importante que emissões contínuas, como as industriais, sejam estudadas e atentamente monitoradas, pois os impactos da exposição no longo prazo, embora existentes, permanecem, em boa medida, desconhecidos ou ignorados. Além disso, o conhecimento do material emitido e dos potenciais impactos destes nos compartimentos ambientais pode auxiliar na tomada de decisões voltadas para ações de preservação do ambiente e da saúde humana.

A dinâmica dos particulados na atmosfera inclui a emissão, o transporte e a deposição. A deposição, de maneira geral, é definida como a fase de limpeza do ar, em que ocorre a remoção das partículas pela precipitação seca ou úmida, forma pela qual o material particulado entra em contato com os ambientes e organismos receptores. Para Vallero (2007, p. 11-13) quando um poluente muda¹ de um compartimento ambiental (por exemplo, o ar) para outro (a água), o problema não foi realmente eliminado, somente realocado.

Dentre os principais receptores, podem ser mencionados os compartimentos ambientais vegetação e solos. Nestes, as partículas, dependendo das suas propriedades físicas e químicas inerentes e dos compostos adsorvidos transportados, podem levar à contaminação. Os materiais de origem antrópica, prioritariamente os industriais, destacam-se devido aos processos produtivos que comumente envolvem compostos de maior risco para o ambiente como metais pesados.

As emissões industriais se apresentam como fontes fixas e/ou pontuais de particulados, nas quais, dependendo da concentração e duração dos lançamentos, podem ocasionar efeitos de curto e/ou longo prazo. Uma das primeiras medidas para dispersão da poluição atmosférica industrial foi a construção de chaminés, com objetivo de evitar problemas na área de entorno da emissão os poluentes são lançados a uma altura que maximize o transporte e dispersão dos mesmos.

¹ Cross-media transfer (GILBERT, DUDEK e CLEVE 1984); Cross-media pollution (TECLAFF e TECLAFF 1987).

Dentre as diferentes atividades industriais a emissão de poluentes atmosféricos é o principal impacto negativo da indústria de metalurgia do silício, já que, dentre os diversos processos de produção de ligas metálicas, é o que demanda maior quantidade de energia e libera os maiores volumes de material particulado. Essa é a realidade da microrregião que pode ser observada nos municípios de Bocaiuva, Várzea da Palma e Pirapora.

Polo de produção de ligas de silício, Pirapora convive com o problema das emissões atmosféricas desde a década de 70, quando se instalaram as primeiras metalúrgicas no distrito industrial da cidade. A pluma de material particulado se tornou um componente da paisagem regional e tem gerado questionamentos por parte da comunidade e pesquisadores sobre o risco (ambiental/saúde humana) associado às partículas emitidas diariamente para a atmosfera.

1.1. Hipóteses

O contexto geomorfológico regional influencia no direcionamento e distribuição dos particulados na área de entorno das indústrias e na distribuição espacial dos poluentes. As áreas adjacentes às indústrias são afetadas pela emissão de poluentes atmosféricos e as partículas depositadas, devido a sua morfologia e composição química, quando em contato com os meios bióticos e abióticos, podem liberar contaminantes como metais pesados indicando potenciais problemas ambientais desses poluentes.

1.2. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar a poluição atmosférica causada pelas indústrias de beneficiamento de Silício e Ferro-Silício em Pirapora, a partir da caracterização mineralógica, morfológica e química do material particulado identificando sua distribuição espacial; considerando os condicionantes geomorfológicos e climáticos, e o potencial de alteração da qualidade ambiental.

1.2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar o material particulado emitido pelas indústrias e mapear a área de deposição dos poluentes particulados;
- Estudar a circulação da pluma de particulados considerando o comportamento dos parâmetros atmosféricos, direção e velocidade dos ventos, e o condicionamento geomorfológico;
- Analisar o material particulado depositado em diferentes pontos do espaço urbano e na área de circulação da pluma visando a identificação das partículas de origem industrial e a definição da abrangência da pluma;
- Conhecer a morfologia e composição química das partículas atmosféricas depositadas;
- Avaliar as concentrações de metais pesados nos solos em diferentes distâncias da área de emissão dos poluentes atmosféricos;
- Discutir os possíveis impactos do material particulado atmosférico na qualidade ambiental na área de estudo.

2. A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E A EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO

A vida no planeta Terra é resultado de uma série de interações, que envolvem processos físicos e reações químicas que ocorrem na biosfera, na litosfera, na hidrosfera e na atmosfera. Esta última, composta por gases, vapor, líquidos e sólidos, tem fundamental importância para a vida no planeta, já que, em sua composição química, encontram-se elementos fundamentais para a respiração animal e a fotossíntese vegetal.

Neste sentido, Rocha (2009, p.93) menciona as constantes trocas que ocorrem na atmosfera e enfatiza não ser possível dizer se a vida sustenta a atmosfera, ou se, ao contrário, seria sustentada por ela, mas o fato é que a vida desempenha um importante papel em sua composição.

É fato que a atmosfera, na sua composição atual, é vital para o homem, uma vez que age na moderação do clima, na manutenção da água no planeta, além de contribuir no ciclo hidrológico² e atuar na proteção contra os Raios Ultravioletas (UV) como coloca Girard (2010).

A atmosfera corresponde à camada de mistura de gases que envolve a Terra, e se divide em troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. Estas camadas diferenciam-se em temperatura, composição, propriedades físicas e espessura. Cada uma delas tem sua importância para a manutenção das condições ambientais no planeta.

As camadas mais externas – mesosfera e termosfera – atuam na absorção e espalhamento da energia solar. Nelas estão situados os satélites em órbita e, por isso, são importantes para os sistemas de comunicação via rádio. Segundo Vallero (2007, p. 52), é na estratosfera que ocorre o transporte global de poluentes. Além disso, constitui uma camada importante para aeronáutica e sistemas de rádio e televisão, contribui no espalhamento da radiação e contém a camada de ozônio (proteção UV).

Do ponto de vista ambiental, destaca-se a troposfera, a camada mais próxima da superfície terrestre que se estende até aproximadamente 16 km (10-16) de altitude, destaque por se a única camada que mantém contato direto com a crosta terrestre e os seres vivos. É a camada onde se encontra a vida e ocorrem os fenômenos atmosféricos. A temperatura diminui com a altitude, resultado do calor emanado pelo solo dissipando-se na atmosfera. A

² A baixa temperatura na tropopausa serve como uma barreira que congela o vapor de água em cristais de gelo que caem de volta para a superfície da Terra. Se o vapor de água fosse capaz de subir acima dessa camada poderia ser fotodissociada pela intensa radiação UV e se perder no espaço tendo como resultado a diminuição gradativa da quantidade de água no planeta (GIRARD 2010, p.41- 43).

temperatura varia de uma média de 15°C ao nível do mar a -56°C no limite superior na tropopausa (ROCHA 2009, p.95; GIRARD 2010, p. 43 e LENZI 2011, p.21). Essa camada contém 85% da massa da atmosfera (BAIRD e CANN 2011, p. 50).

A maioria dos estudos sobre poluição do ar se refere à troposfera, pois é nela onde ocorrem intensa movimentação e transformação dos componentes gasosos e das partículas emitidas pelos oceanos e continentes, ou seja, pelos outros dois importantes compartimentos, hidrosfera e litosfera (ROCHA 2009, p.96). A biosfera, em suas diferentes formas de vida, contribui com a poluição por meio das emissões de gases pela respiração e decomposição dos seres vivos, além de pólenes, vírus, fungos, bactérias e através da atuação humana.

Jacobson (2002, p.54-56) e Girard (2010, p.43) apresentam a divisão da Troposfera em Camada Limite Planetária (CLP) "Planetary Boundary Layer" e Atmosfera Livre "*Free Troposphere*". A CLP, que interage direto com a superfície da Terra, se estende da superfície até entre 500m e 3000m de altitude, é onde todos os humanos vivem e nela ocorrem muitos dos fenômenos climáticos. É nesta região da atmosfera que o aumento da poluição é preocupante, pois ali se acumulam os poluentes emitidos próximos da superfície. Quando os poluentes saem dessa camada, eles viajam horizontalmente longas distâncias antes de serem removidos do ar.

Uma diferença destacada pelos autores entre a CLP e Atmosfera Livre é a resposta às mudanças de temperatura na superfície, que varia de menos de uma hora, no primeiro caso, até um longo período de tempo, no segundo caso.

Cerca de 10% (50 a 300m) da CLP compõe a Camada Limite Superficial (CLS) "*Planetary Surface Layer*", região de fortes mudanças na velocidade do vento com a altitude. Marques Filho (1999, p.33) ressalta que, dentre algumas aplicações da CLS, tem-se a dispersão e a diluição dos poluentes do ar.

Apesar da variação das camadas, a troposfera apresenta uma composição química característica. A composição do ar seco não poluído na troposfera divide-se, basicamente, entre os componentes principais: Nitrogênio (N_2 - 78,084%) e Oxigênio (O_2 - 20,946%); e os componentes secundários: Argônio (Ar - 0,934%) e o Dióxido de Carbônico (CO_2 - 0,035% variável). Além destes, tem-se os gases nobres Neônio (Ne - 18,18ppm), Hélio (He - 5,24ppm) e Xenônio (Xe - 0,087ppm) (MANAHAN, 1994; JACOBSON 2002, p. 62; ROCHA 2009, p. 96; GIRARD 2010, p.45; BAIRD & CANN 2011, p. 50)

Os compostos que ocorrem em menor concentração, o 1%, além do Nitrogênio e oxigênio, variam bastante na literatura, são citados metano, hidrogênio, dióxido de nitrogênio, enxofre e ozônio.

O vapor de água, geralmente não é incluído nessa composição geral, pois sua concentração depende da temperatura, precipitação, evaporação e fatores locais. A porcentagem varia do mínimo 0,1% até o máximo de 5% e os valores médios apresentam uma variação de 1% e 3%. Isso faz da água o terceiro mais abundante constituinte do ar. Se o vapor de água é excluído, a concentração dos maiores componentes é notavelmente constante. De maneira geral, na ausência de poluição, o que importa é que em parte da superfície da Terra, o ar que se respira é o mesmo. Esta homogeneidade resulta da mistura causada pela contínua circulação do ar na troposfera (GIRARD, 2010, p.45 - 46).

Outros compostos também fazem parte da atmosfera, em concentrações traço em partes por milhão ou partes por bilhão, variam intra e entre as camadas da atmosfera. Apesar da atmosfera, em geral, ser descrita apenas pelos gases que a constituem, sua composição inclui sólidos e líquidos dispersos³. Os metais pesados⁴, por exemplo, podem está adsorvidos a partículas sólidas dispersas no ar.

Portanto, compondo o sistema Terra, a atmosfera é parte integrante da dinâmica que permite a vida no planeta. Segundo Lenzi (2011), sua evolução relaciona-se com a história evolutiva da vida na Terra e o último momento que influenciou a formação e constituição da atmosfera foi o aparecimento do ser humano, com suas máquinas, seus inventos e sua consequente interferência no meio ambiente ou Biosfera, principalmente com a emissão de gases e particulados na atmosfera. "*Os milhões de carros, chaminés, incêndios etc ... jogam diariamente para a atmosfera toneladas e toneladas de CO₂, NO_x, SO₂, produtos orgânicos voláteis, particulados inorgânicos (cinzas, fumaças etc.) e particulados orgânicos*" (LENZI 2011, p.8).

As alterações na composição da atmosfera, ocasionadas pela contribuição humana, têm consequências do ponto de vista físico, químico, meteorológico e para a qualidade do ar.

2.1. A poluição da atmosfera

Conceitualmente entende-se como poluição atmosférica, a presença de compostos que, dependendo das suas propriedades e concentrações, alterem a qualidade do Ar. Para RAVEN, BERG e JOHNSON (1995, p.125) a poluição atmosférica está relacionada com a geração de

³ Gases são diferenciados de partículas em duas formas. Primeiramente, gás consiste de átomos ou moléculas individuais, enquanto partículas consistem de agregados de átomos ou moléculas unidas; assim, partículas são maiores que um simples átomo ou molécula de gás. As partículas contém líquidos e sólidos, enquanto gases estão na fase própria. (JACOBSON 2002, 3).

⁴ 4 Discussão do termo: DUFFUS, J. H. Heavy Metals – A Meaningless Term. Chemistry International , v. 23, n. 6, Nov. 2001.

efeitos prejudiciais ao meio ambiente, incluindo paisagens naturais, vegetação, animais, solo, água, estruturas naturais e artificiais, como também sobre a saúde humana

A poluição da atmosfera é um tema recorrente na atualidade quando se trata de questões ambientais. As principais abordagens versam sobre o impacto das atividades humanas na qualidade do ar. No entanto, a presença de compostos que afetam essa qualidade também podem ser decorrentes de fontes naturais. Estas incluem, a exemplo, partículas do solo (argilas, areias), cinzas de incêndios, fumaça, esporos de fungos e sais.

As emissões atmosféricas por fontes naturais incluem uma série de gases advindos dos processos naturais que ocorrem nos solos, nos ecossistemas marinhos, das atividades geológicas (gêiseres ou vulcões) e da fauna. Um subconjunto denominado fontes biogênicas compreende somente as emissões resultantes de várias atividades biológicas que ocorrem na vegetação, atividade microbiana e etc (EPA 1996, p.1-2).

A mais conhecida fonte natural de material particulado são as emissões vulcânicas, devido à intensidade dos impactos que, às vezes, ocorrem num período de tempo relativamente curto. Lenzi (2011, p. 132) afirma que "a ação vulcânica além do vapor de água, fumaça etc., leva para a atmosfera poeiras vulcânicas que ao se depositarem tomam o aspecto de cinzas", essas, geralmente, apresentam em sua composição química contaminantes como metais pesados (RIETZLER, FONSECA e LOPES 2001).

Uma grande erupção vulcânica ocorrida na Islândia em 1783 produziu partículas de ácido sulfúrico suficientes para cobrir a Europa em um "grande *fog seco*" por todo verão, matando muitas pessoas. Naquele País, o fluoreto emitido pelo vulcão foi o pior problema, uma vez que foi comprovado ter sido fatal para plantações, gado e pessoas (BAIRD e CANN 2011, p. 157).

A história da poluição atmosférica (e ambiental) tem como marco a Revolução Industrial, a partir da qual ocorre o aumento do uso de combustíveis fósseis e o início das emissões nas unidades fabris de produção, resultando na interferência na composição da atmosfera. O aumento da produtividade proporcionado pela industrialização teve um alto custo ambiental, já que, naquele momento não existia uma preocupação com este aspecto e os efeitos dos impactos sobre a saúde eram desconhecidos.

A grande quantidade de fumaça da queima do carvão e as emissões pelas chaminés das indústrias, no século XIX, se tornaram sinônimos de prosperidade (GIRARD, 2010, p.41; COUTO, 2003, p.1). Na cidade, a emissão veicular, que na metade do século XX se tornou significativa, tem como agravante o contínuo lançamento e crescente aumento da frota veicular (JACONDINO, 2005; LOUREIRO, 2005).

A concentração das emissões nas cidades-industriais associada à diversificação dos processos industriais e do número de poluentes acentuaram a degradação da qualidade do ar . O "progresso" se contrapunha a um cenário caracterizado pela degradação da qualidade ambiental e deterioração da saúde humana.

Apesar dos primeiros registros de problemas com a poluição atmosférica serem anteriores à industrialização, no entanto, é nesse contexto que se intensificam os efeitos sobre a saúde da população e compartimentos ambientais.

Segundo Tadano (2012, p.2), no século XX, a presença cada vez maior de veículos a combustão, associada à industrialização e condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão de poluentes provocou, em diversas regiões do planeta, a ocorrência de vários fenômenos críticos e alarmantes de poluição atmosférica excessiva, registrando perdas de vidas ou danos à saúde (TAB. 1).

TABELA 1 - Grandes episódios de poluição atmosférica no mundo.

| Ano | Local | Poluente | Consequências | Fonte |
|------|---------------------------|---|--|---|
| 1283 | Nottingham, (Inglaterra) | Nuvens de fumaça preta da queima do carvão mineral (residências). | — | (DANNI-OLIVEIRA, 2008) |
| 1873 | Londres (Inglaterra) | Nuvem de Fumaça | 243 óbitos a mais que o normal | (SCOTT, 1953) |
| 1930 | Vale do Meusa (Bélgica) | Queima de fornos de carvão e Gás de indústria (MP e SO ₂) | 60 (ou 63) mortes 6.000 doentes dois dias depois | (NEMERY, HOET e NEMMAR , 2001.) (JACOBSON , 2002.) |
| 1931 | Manchester Inglaterra | Espessa Névoa | 592 Mortes | (WARK <i>et al.</i> , 1998). |
| 1948 | Donnora Pensilvânia (EUA) | Combustão das indústrias (MP e SO ₂) | 20 óbitos 7.000 doentes nos próximos três dias (50% da população) | (HELFAND, LAZARUS e THEERMAN , 2001.) (JACOBSON, 2002.) |
| 1952 | Londres (Inglaterra) | MP e SO ₂ | 4.000 óbitos nas duas semanas seguintes. 8.000 em meses | (LOGAN, 1953.) (LENZI, 2011) (BAIRD e CANN, 2011.) |
| 1966 | Nova York | — | 8 mortes | (BRAGA, PEREIRA e SALDIVA, 2014.) |

O marcante episódio em Londres em 1952 foi precedido por um evento em 1948. Logan (1949, p.78) destacou que essa fumaça – que encobriu a cidade de Londres e uma boa parte da Inglaterra no fim de novembro de 1948 – estabeleceu um recorde não em densidade, mas em duração e, como esperado, um aumento da mortalidade em função de infecções respiratórias.

Em 1952, registrou-se o maior número de mortes devido à emissão de poluentes atmosféricos. As mortes ocorreram tanto na semana do episódio como dois meses depois. Este evento marca início das ações para remediação da qualidade do ar na capital londrina. Apesar disso, em 1956, foram registradas mais mortes associadas a emissões atmosféricas: "essa fumaça, entre quatro e seis de janeiro causou quase 1000 mortes na grande Londres. Essa foi a terceira maior mortalidade desde o evento de 1948" (LOGAN 1956, p.725). Além destes, outros eventos foram registrados em Londres ao longo da história. Jacobson (2002, p.86) lista aumento na mortalidade em 1880 (700-1.100), 1892 (1.000), 1957 (30-800) e 1962 (340-700).

Diante desses eventos iniciam-se os estudos da relação entre a qualidade do ar e seus efeitos na saúde da população, no entanto, um longo caminho ainda deveria ser percorrido. Segundo Nemery, Hoet e Nemmar (2001, p.707), o desastre no vale do Meusa, em 1930, forneceu evidências incontestáveis de que a poluição do ar pode matar e, por isso, atraiu considerável atenção da comunidade científica. No entanto, pouco foi feito, já que a poluição do ar foi considerada uma inevitável consequência da prosperidade. Além disso, a responsabilidade da indústria sobre esses efeitos foi minimizada.

Apesar da demora nas medidas de controle da poluição do ar, os eventos catastróficos ocorridos em Londres e episódicos nos Estados Unidos iniciaram ações para o controle da emissão de poluentes. Um marco inicial se dá na década de 1960, quando foi criado um programa federal de poluição atmosférica, ligado ao Departamento de Saúde Educação e Bem Estar Social dos Estados Unidos da América (BRAGA, PEREIRA e SALDIVA, 2014).

Braga et al.(2001) ressaltam algumas ações de controle ambiental que se desenvolveram a partir dos episódios de poluição: (1) liberação de verba pelo congresso norte americano para estudos (1955); (2) os "*Clean Air Acts*" de 1956 e 1968 que ampliaram o controle de emissão de poluentes atmosféricos industriais, regulamentando as emissões de óxidos de enxofre e fumaça preta; (3) o estabelecimento de padrões de qualidade do ar (partículas totais, dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e chumbo (Pb) nos EUA (1960); (4) criação da Agência de Proteção Ambiental norte-americana (U.S. EPA), em 1970 e (5) a concessão à EPA de poderes para determinar os critérios técnicos de controle das substâncias tóxicas com base nos seus efeitos na saúde (1990).

Os autores supracitados colocam que na Europa, em 1976, uma comissão de países europeus (*Comission of the European Communities* – CEC), estabeleceu padrões de qualidade

do ar para SO₂, CO, NO₂, material particulado e oxidantes fotoquímicos e, desde então, a legislação tem sido aprimorada baseando, inclusive, nos padrões definidos pela EPA.

O controle ambiental nos países desenvolvidos incentivou a mudança das indústrias para os países em desenvolvimento, de legislação amena ou inexistente como aponta os estudos publicados por Braga et al. (2001, 62). Tal mudança levou a um aumento dos problemas ambientais nos países em desenvolvimento, iniciando novos episódios de poluição.

É uma característica histórica: cada vez que um país não desenvolvido inicia seu desenvolvimento industrial, a qualidade do ar externo piora significativamente. A situação continua a piorar até que um grau significativo de riqueza seja atingido, momento no qual os controles de emissão são estabelecidos e fiscalizados, o ar começa a ser limpo. Assim, embora a qualidade do ar esteja melhorando com o passar do tempo na maioria dos países desenvolvidos, está piorando nas grandes cidades dos países em desenvolvimento (BAIRD e CANN 2011, p. 180).

No Brasil, a região Sudeste – a mais urbanizada e industrializada do país – registra os maiores problemas com a poluição atmosférica nas regiões metropolitanas e polos industriais.

A cidade de Cubatão, em São Paulo, entrou para história como polo industrial (COUTO, 2003) do país, com a instalação da Refinaria Presidente Carlos Bernardes – Cubatão (RPBC). Segundo Valarini (2011), em 1980, Cubatão era a cidade mais poluída do mundo, ficando conhecida mundialmente como "Vale da Morte". A autora destaca que os problemas se iniciaram em 1956 e 1957, com os primeiros casos de intoxicação. Nos anos seguintes, ocorreram reclamações quanto à poluição e ao odor (1961), precipitação de um pó preto (1963), intoxicações por carbonocloro (1968). Contudo, foi somente na década de 1980, com o nascimento de crianças anencéfalas, que se iniciou, efetivamente, o controle ambiental com as ações e estudos da CETESB.

Tanto no cenário nacional como no mundial, tem-se ampliado a preocupação com a qualidade do ar devido ao maior conhecimento dos efeitos da poluição sobre a saúde humana. Cançado (2003, p.14-15) ressalta que recentes estudos têm demonstrado que a poluição atmosférica é responsável por vários efeitos deletérios sobre a saúde humana, incluindo aumento das consultas de emergência por patologias respiratórias, exacerbação de asma, decréscimo na função pulmonar, aumento das internações hospitalares por patologias respiratórias, falta ao trabalho em adultos, aumento do absenteísmo escolar em crianças e aumento da mortalidade.

Tadano (2012, p.22) citando Bakonyi (2003) destaca que os estudos mostram, ainda, que as crianças e os idosos são mais suscetíveis à poluição atmosférica. Isto ocorre, pois a resposta a uma concentração de poluentes é diferente para cada pessoa, dependendo de sua

faixa etária, de fatores genéticos, das condições sociais, entre outros. Para as crianças, se deve ao maior consumo de ar, já os idosos são mais afetados por possuírem um sistema imunológico e respiratório frágil, além de já terem sido expostos a uma grande quantidade de poluição atmosférica ao longo da vida. Quanto aos fatores genéticos, pessoas que possuem doenças crônicas ou alergias, como bronquite e asma, são mais sensíveis à poluição do ar. Já em relação às influências da condição social, as regiões com infraestrutura precária como, por exemplo, falta de saneamento básico e asfalto, acarretam maiores riscos à saúde dos moradores devido à maior concentração de poluentes.

A dispersão dos poluentes na atmosfera é objeto de muitos estudos baseados em modelos matemáticos de transporte e deposição. Essas simulações numéricas também são utilizadas para representar 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).

Atualmente, a maioria dos trabalhos inclui o monitoramento da qualidade do ar nas grandes cidades e regiões metropolitanas, estudos e modelos de dispersão em que a preocupação central relaciona-se às emissões veiculares e industriais nos centros urbanizados e as novas instalações industriais.

São muitas as consequências da poluição da atmosfera e além dos efeitos na saúde, tem-se discutido questões ambientais como a intensificação do *Efeito Estufa*, surgimento da *Chuva Ácida* e *Smog Fotoquímico*, *Ilha de Calor Urbana*, problemas associados à "*Inversão Térmica*", criação do "*buraco*" da camada de ozônio e o tão discutido *Aquecimento Global!*⁵?

Assim, a poluição da atmosfera é muito diversa e está associada a emissão de diferentes compostos e, portanto, o impacto da poluição atmosférica no ambiente ou saúde da população depende do tipo e das características do poluente emitido.

Nas áreas industriais, são características as plumas de poluentes que podem se deslocar e transportar compostos por longas distâncias. Estes compostos, que incluem material particulado, deslocam-se vertical (inicialmente) e horizontalmente. As plumas⁶, especialmente de fontes fixas pontuais, movimentam-se condicionadas pela estabilidade da atmosfera, dinâmica dos ventos e características da superfície, condições que definem os padrões de dispersão dos poluentes.

⁵ MARUYAMA, S., 2009 Aquecimento Global? Trad Kenitiro Suguio, Oficina de Textos.

⁶ Termo utilizado para emissão contínua de poluentes, a plumas podem ser classificadas por seu formato decorrente das condições de estabilidade da atmosfera no momento (TADANO, 2012, p. 9).

2.1.1. *Os poluentes atmosféricos*

O termo poluente atmosférico é definido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA 1990) como 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: I – impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; II – inconveniente ao bem-estar público; III – danoso aos materiais, à fauna e flora. e IV – prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Jacobson (2002, p.4-30) coloca que a poluição do ar ocorre quando gases ou partículas aerossóis, emitidas antropogeneticamente, levam a concentrações suficientemente altas para causar danos diretos e indiretos para seres humanos, animais, outras formas de vida, ecossistemas, estruturas ou obras de arte.

Vallero (2007, p.3) apresenta o conceito de poluição do ar da EPA: "A presença de contaminantes ou substâncias poluentes no ar que interfere na saúde humana ou bem-estar, ou produz outros efeitos nocivos ao ambiente". O autor aponta o fato de vários poluentes serem, em outras circunstâncias, recursos e destaca que o problema dos poluentes não é resolvido com uma simples remoção, mas exige, sim, um gerenciamento do sistema que assegure as condições ideais para a saúde e a qualidade ambiental. Além disso, destaca o fato do termo contaminante estar relacionado com substância de maior perigo.

As definições acima apresentam dois aspectos que devem ser ressaltados: (1)a quantidade e (2) origem da poluição.

O primeiro refere-se à questão da quantidade, concentração e intensidade de um composto ou elemento (contaminante/poluente) determinado pelos padrões legais e baseado nos possíveis danos à saúde e ao meio ambiente. Os limites estabelecidos pela legislação são ainda questionáveis, uma vez que se tem pouco conhecimento sobre os efeitos dos contaminantes na saúde e os danos ambientais. Além disso, esses padrões resultam de discussões que envolvem além das questões científicas, interesses políticos, especialmente quando se trata das emissões antrópicas industriais. Dessa maneira, pode-se ter efeitos nocivos ao ambiente e à saúde mesmo com concentrações dentro dos padrões que atendem a legislação, principalmente a longo prazo.

O segundo refere-se à restrição das emissões que causam a poluição do ar às fontes antrópicas. A literatura é clara ao mostrar que as fontes naturais são importantes na contribuição para a degradação da qualidade do ar, portanto, a poluição do ar não se restringe ao aumento das concentrações devido às emissões decorrentes das ações humanas.

A poluição do ar é a presença de indesejáveis materiais no ar, em quantidade grande o suficiente para produzir efeitos nocivos. Esta definição não restringe a poluição do ar a causas humanas, embora normalmente falamos somente nisso... Muitos desses materiais nocivos entram na atmosfera a partir de fontes, atualmente, além do controle humano (DE NEVERS, 2000, p. 1)

Assim, considera-se que a poluição do ar ocorre quando há a presença de substâncias/poluentes em concentrações que possam interferir na qualidade ambiental e saúde humana, independentemente da sua fonte ou dos padrões ambientais legais.

De origem natural ou antrópica, os poluentes presentes na atmosfera são classificados em primários e secundários. Os primários são emitidos diretamente pela fonte e aqueles resultantes de reações químicas envolvendo os poluentes primários são definidos como poluentes secundários, estes caracterizam-se por serem resultado de reações de transformação (LOUREIRO 2005, p.14; ROCHA, 2009, p.98; BAIRD e CANN, 2011, p.120). As características de cada um desses poluentes dependem das respectivas fontes.

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.

As fontes antropogênicas podem ser classificadas, quanto ao posicionamento ou deslocamento, em estacionárias (ou fixas) e móveis. As fontes fixas, de posição constante, referem-se às unidades de produção onde ocorre a emissão de poluentes em locais específicos, como as atividades industriais, nos processos de produção ou combustão. As fontes móveis são aquelas que apresentam mobilidade no espaço, como os automóveis e maquinários, cuja posição varia ao longo do tempo, pois podem se mover ou serem movidos (LOUREIRO, 2005, p.42-43 ;IEMA, 2011, p. 6).

Considerando a emissão, as fontes fixas e móveis apresentam características relacionáveis às definições de poluição pontual e difusa. As fontes fixas são pontuais, já que a emissão ocorre em um ponto específico da superfície, "existe um ponto localizado onde ocorre a emissão". As fontes móveis são difusas, pois, devido à sua mobilidade, os poluentes podem ser emitidos em diferentes áreas da superfície, "espalhada em uma grande área" (ROCHA 2009, p. 98).

As fontes pontuais, de certa forma, possuem um comportamento mais regular, com características de emissão bem determinadas. As fontes difusas possuem uma natureza de comportamento de emissões mais dinâmica, estando muito sujeitas às variações operacionais

e ambientais. Para efeito de diferenciação quanto à forma de emissão, tem-se: Fontes pontuais (ex.: chaminés de caldeiras); Fontes difusas do tipo área (ex.: vias de tráfego); Fontes difusas do tipo volume (ex.: tanques de estocagem de combustíveis) conforme FEAM (2003, p.9).

Deve-se ressaltar que, apesar de pontual, os impactos das fontes fixas podem ser regionais ou mesmo globais, dependendo da emissão, do tamanho das partículas e da circulação da atmosfera, fatores que tem influência direta no transporte.

A movimentação da poluição atmosférica compreende três aspectos principais: a emissão, o transporte e a deposição. Segundo Rocha (2009, p.99), os processos de emissão, a transformação e a saída da atmosfera implicam reações químicas ou mudanças de fase, passando pelos vários ecossistemas terrestres, envolvendo, inclusive, os seres vivos. Essa sequência de transformações é conhecida como ciclo biogeoquímico.

As características da emissão definem a quantidade de material e propriedades físicas como tamanho são determinantes na distância que o material será transportado e as transformações que podem ocorrer durante o transporte. A saída, por sua vez, inclui a precipitação seca ou úmida na troposfera.

A precipitação seca envolve o carregamento de partículas sólidas para a superfície. Um segundo mecanismo é a precipitação úmida, em que os poluentes são parte dos núcleos de condensação e/ou são lavados para a superfície pela chuva, neve, granizo ou névoa. Silva (2006, p. 2-3) coloca que a remoção úmida ocorre pela ação de hidrometeoros (ex. gotas de chuva, cristais de gelo e etc.) e destaca que:

"Do ponto de vista histórico, Engelmann (1968), Schroder *et al* (1989) definiram então, uma remoção úmida que ocorre no interior das nuvens ("incloud", antigo "rainout") por gotículas de nuvem e outra que ocorre entre a base da nuvem e a superfície ("below-cloud", antigo "washout"), ambos ocorrendo continuamente durante o evento de precipitação, proporcionando variações na concentração dos poluentes atmosféricos" (SILVA, 2006, p. 2-3).

Uma das principais características da atmosfera é que ela é um ambiente oxidante, um fenômeno que se deve à elevada concentração de oxigênio. Quase todos os gases liberados no ar, sejam substâncias "naturais" ou "poluentes", são completamente oxidados e seus produtos finais são depositados na superfície da Terra. Assim, as reações de oxidação são vitais para a limpeza do ar (BAIRD e CANN, 2011, p.113).

As partículas podem, ainda, sair do ar a partir da aglomeração e/ou impactação e retenção pela superfície sólida de vegetação, solo e edifícios (VALLERO, 2007, p.6-59). Essa

retenção de poluentes ocorre nos denominados receptores. Segundo o autor supracitado, receptor é algo que é adversamente afetado pelo poluente do ar, pode ser uma pessoa ou animal, as plantas, a água, a própria atmosfera e as estruturas na superfície. O poluente se torna um problema quando entra em contato com o receptor.

Assim, a considerada, limpeza da atmosfera nada mais é que a mobilização dos poluentes para os demais compartimentos ambientais, iniciando um novo ciclo de poluição, não mais conhecido que aquele na atmosfera.

Calderon (2000, p.14), estudando a epidemiologia de contaminantes químicos em água potável, afirma que as operações de fundição podem aumentar a concentração de metais nas fontes de água a partir da deposição atmosférica.

Dos vários poluentes emitidos diariamente para a atmosfera, o material particulado, principalmente aqueles presentes nas fumaças das chaminés das indústrias chamam a atenção por apresentar uma fração visível. Além disso, parte desse material está presente na poeira de cada dia nas residências. Girard (2010, p. 59) define o material particulado como a mais visível forma de poluição.

2.1.1.1. O material particulado

As partículas são as mais conhecidas formas de poluição do ar, seja pela parte visível ou pelo incômodo causado à população, como irritação nos olhos, tosse e espirros.

Os particulados, assim como os demais compostos atmosféricos, podem ter origem de processos naturais e antrópicos, resultando de fenômenos físicos e/ou reações químicas. As partículas em conjunto restringem a visibilidade⁷ e, o mais importante, respirar o ar que contém material particulado é reconhecidamente perigoso para a saúde humana (BAIRD e CANN, 2011, p.154).

Para Cooper (2011, p. 50 - 111), o material particulado constitui a maior classe de poluente do ar, e destaca dentre os efeitos, o retardamento no crescimento das plantas.

O material particulado refere-se a um conjunto de partículas sólidas ou líquidas, de tamanhos micrométricos a milimétricos, suspensas no ar, que, quando dispersos na atmosfera, são denominados também de aerossóis. Para Vallero (2007, p.59), constitui um agregado de várias moléculas, às vezes similares, mas, muitas vezes não.

⁷ De Nevers (2000, p. 209) coloca que a visibilidade de um poluente e os nevoeiros se devem a presença do material particulado.

O termo partículas em suspensão abrange tamanhos desde aqueles que são visíveis, como poeiras, a outros que podem ser vistos somente com microscópios de alta potência. Partículas com diâmetros menores que 10µm são denominadas aerossóis, partículas maiores são denominadas particulados, ambas podem ser líquidas ou sólidas (GIRARD, 2010, p.46).

Para Baird e Cann (2011, p.154-155), existem muitos nomes para partículas atmosféricas: poeira e fuligem que referem-se às sólidas, enquanto névoa e neblina referem-se às líquidas. Um aerossol é uma coleção de materiais particulados, quer sejam partículas sólidas ou gotículas, dispersas no ar. Um aerossol "verdadeiro"⁸ possui partículas muito pequenas, com diâmetro menor que 100 µm.

A contradição em relação a definição dos tamanhos das partículas "aerossóis" e a terminologia apropriada a este termo fica clara na bibliografia conforme as definições de partículas e aerossol apresentados acima.

Spurny (2000) define aerossóis atmosféricos antropogênicos como sistemas aerodispersos de partículas sólidas e líquidas com diferentes tamanhos, formas e composição química.

somente uma pequena porção dessas partículas - as primárias- são dispersas na atmosfera pelo vento a partir dos solos, intemperismo das rochas, desertos, mares, vulcões, etc., são compostos inorgânicos ou orgânicos simples. A maioria das partículas dos aerossóis antropogênicos, especialmente os secundários, representam misturas químicas (SPURNY, 2000, p. 4).

O autor destaca que o tamanho, assim como a composição química dos aerossóis antropogênicos, são mais determinados pela fonte de emissão, definindo uma relação entre essas fontes e características das partículas do ar.

Vallero (2007, p.14-62) aponta que o termo partícula é usado indistintamente com o termo aerossol na ciência atmosférica e em estudos de exposição, e ressalta que o termo aerossol é frequentemente utilizado como sinônimo de material particulado. O autor destaca que um aerossol pode ser a suspensão de partículas sólidas ou líquidas no ar e inclui ambas as partículas, além de todo o vapor ou fase gasosa componente do ar.

Considerando que o uso do termo aerossóis na literatura é, às vezes, utilizado para apenas uma fração das partículas presentes na atmosfera ou em determinadas condições, será utilizado nesse trabalho a denominação de material particulado e partículas, que engloba tanto as partículas com tamanho e propriedades que atendem a definição de aerossóis, como aquelas de maiores dimensões presentes na atmosfera.

⁸ De acordo com a definição de Baird e Cann, 2011,

Embora muitos poluentes do ar sejam mais bem classificados pela composição química, partículas são primeiro classificadas de acordo com as propriedades físicas. Contudo, a composição das partículas é muito importante e altamente variável. Na verdade, conhecer de que é composta diz muito sobre sua fonte (VALLERO 2007, p.60).

As partículas diferenciam-se em forma, composição química e tamanho (TAB. 2). Consideradas esféricas para fins de medições, o tamanho das partículas revela muito das suas propriedades.

TABELA 2 - Classificação do Material Particulado pelo tamanho (Diâmetro)

| Denominação | Tamanho | Observações |
|---|----------------------------------|---|
| Partículas ultrafinas (PM _{0,1}) | <0,1µm | Maioria de origem antropogênica. |
| Partículas finas (PM _{2,5}) | <2,5 µm | Respiráveis, podem penetrar fundo nos pulmões, onde ficam retidas. Risco dos compostos adsorvidos. Aumento da morbidade e mortalidade da população, especialmente crianças e idosos. Combustão/Industrial |
| Partículas Grossas** | >2,5 µm | Formação por processos mecânicos. Curto tempo de residência e deposição próxima à fonte. São Filtradas pelo nariz e mucosas |
| Partículas Finas e Grossas PM ₁₀ (MP ₁₀) | <10 µm | Partículas Inaláveis, podem ser aspiradas para os pulmões e ficam retidas no trato respiratório superior |
| Partículas Totais em Suspensão (PTS) | <50 µm <100 µm* <500 µm*** | Concentrações de todos os particulados suspensos no ar. |

Fonte: *** WARK, WARNER e DAVIS 1927; SPURNY 2000, p. 6; JACOBSON 2002, p. 116; ROCHA 2009, p. 117; * BAIRD e CANN 2011, p. 160; **LENZI 2011, p. 130.

Os diferentes tamanhos das partículas indicam aspectos da sua origem, composição e interações ambientais. As partículas finas ou grossas se distinguem quanto à fonte, composição química, processos de remoção, propriedades óticas e atuação no sistema respiratório. Assim, reconhecer como se encontra a distribuição de um conjunto de partículas na atmosfera é fundamental em muitos estudos ambientais (ROCHA 2009, p. 117).

A especificação da composição do particulado é importante no sentido de identificar a fonte poluidora e verificar o grau de toxicidade do mesmo. Também é importante conhecer o tamanho das partículas formadoras de um particulado, pois as partículas menores de 10µm (conhecidas como PM₁₀) são inaláveis. Elas atravessam os filtros naturais do sistema respiratório e podem atingir os pulmões provocando várias doenças" (LENZI 2011, p.309-310).

O tamanho das partículas, além das características relacionadas à saúde humana (inalação/respiração), influencia no comportamento dessas na atmosfera. As partículas grossas ($> 10 \mu\text{m}$) são mais rapidamente afetadas pela gravidade e depositam-se em um ou dois dias, as partículas médias ($1 - 10 \mu\text{m}$) permanecem suspensas por vários dias e aquelas finas ($< 1 \mu\text{m}$) permanecem na troposfera por várias semanas e na estratosfera por até cinco anos. Partículas finas podem ser transportadas por longas distâncias pelos ventos antes de serem depositadas na superfície ou lavadas pela chuva ou neve (BAIRD e CANN, 2011, p.155; GIRARD, 2010, p.56).

Para as fontes naturais, as partículas grossas são, em sua maioria, primárias, originadas dos processos de desintegração. Minerais e argilas são exemplos de partículas originadas das rochas e solos, cuja composição inclui Al, Ca, Si e O. As partículas finas, por sua vez, resultam principalmente de reações químicas, classificadas como secundárias, as antropogênicas incluem aquelas originadas nos processos de fundição de metais (BAIRD e CANN 2011, p.156).

Partículas finas entre $0,1$ e $1 \mu\text{m}$ interferem na visibilidade, pois seus diâmetros são comparáveis aos comprimentos de onda da radiação visível. Já aquelas de $0,1-10 \mu\text{m}$ atuam como núcleos na condensação e, embora sejam essenciais para a formação de nuvens, nem sempre resultam numa maior quantidade de chuva. Uma grande quantidade de particulados leva à formação de vários núcleos de condensação, porém nenhum deles cresce suficiente para formar chuva. Como resultado, a poluição por material particulado pode aumentar ou reduzir a chuva de uma determinada região (ROCHA 2009, p.117).

Segundo Vallero (2007, p.65-74/72), em adição à inerente toxicidade, partículas podem funcionar como veículos para transporte e transformação de contaminantes químicos que podem alcançar os corpos hídricos, vegetação e solos.

As partículas finas, por possuírem maiores áreas superficiais, apresentam maior capacidade de interagir com outros compostos ou elementos que podem ser carregados adsorvidos ou absorvidos. De acordo com Girard (2010, p. 56), atuam com sítios de interações químicas.

Para Stern (1986, p.294) e Lenzi (2011, p.145), o maior problema dos particulados é que eles adsorvem e absorvem materiais tóxicos, como metais pesados.

Considerada sua composição química e as interações potenciais de sorção, o estudo do material particulado se apresenta como um importante objeto para o entendimento da contribuição dos poluentes atmosféricos nos compartimentos ambientais. Quando depositado

nos diferentes compartimentos ambientais, o material particulado, guardada sua composição química, pode interferir na qualidade dos mesmos (LENZI 2011, p.309).

Dado o seu peso como poluente da atmosfera, o material particulado esteve incluído nos principais estudos e entre os primeiros padrões de qualidade do ar. A sua presença é marcante nas emissões industriais.

2.1.1.2. Emissões industriais de material particulado e as questões ambientais relacionadas aos compostos de sílica.

Desde o histórico crescimento da poluição atmosférica no contexto mundial, o setor industrial é aquele com maior contribuição na emissão de particulados, competindo atualmente com os espaços urbanos.

Considerando os principais poluentes que chegam à atmosfera por fontes antrópicas, a maior contribuição do setor industrial (FIG. 1) é com o material particulado. De acordo com Girard (2010, p. 94), a contribuição dos processos industriais é de 1,3% para óxidos de nitrogênio; 11,3% monóxido de carbono; 12 % Compostos Orgânicos Voláteis; 23% óxidos sulfúricos e 34,8% para as partículas.

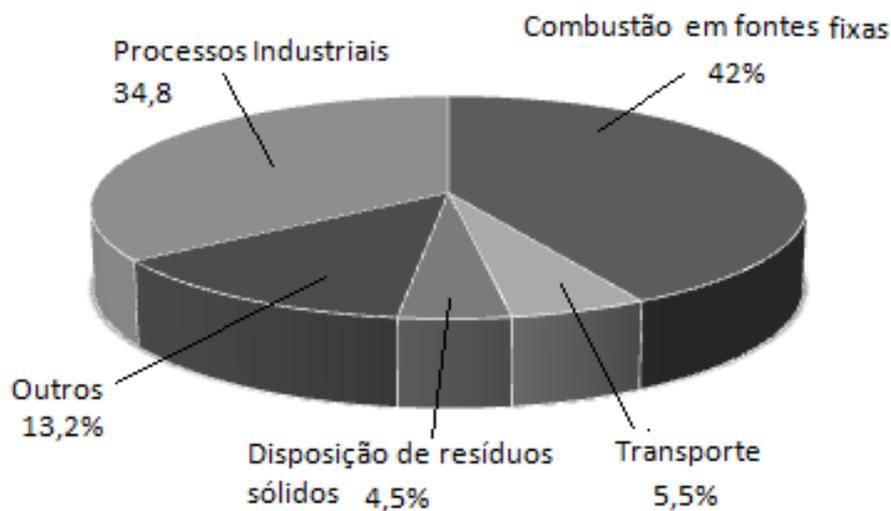


FIGURA 1 - Emissões de partículas em todo o País de acordo com a fonte.
Fonte: GIRARD 2010, p. 59.

Os processos de fundição são os mais antigos no setor industrial e, ao longo da história, estiveram associados à emissão de poluentes.

As principais indústrias associadas com a produção da poluição do ar nos séculos antes da Revolução Industrial eram a metalurgia, cerâmica e preservação de produtos animais. Na era do bronze e ferro, vilas foram expostas a muitas fontes de poeira e fumaça. Cobre e ouro eram forjados e a argila era cozida e vidrada 4000 a.C. Ferro era de uso comum e Chumbo era conhecido 1000 a.C. A maioria dos modernos métodos de metalurgia eram conhecidos antes de Cristo (VALLERO 2007, 39).

Com o desenvolvimento tecnológico, ocorreu um considerável aumento na capacidade produtiva. As siderúrgicas e metalúrgicas, com os seus processos de fundição em alto-fornos (fornos de bessmer, etc.) estão entre as grandes fontes de emissão em todo o mundo. De acordo com Gomes (2010, p. 43) praticamente todos os processos industriais são responsáveis pela emissão de partículas, em particular os supracitados. No Brasil, a tradicional indústria de base continua sendo o setor que sustenta a economia industrial nacional.

Os processos de combustão e industriais lançam uma massa de poluentes estimada de 100ton/ano (ROCHA 2009, p. 119). A chaminé foi, durante décadas, sinônimo de progresso e crescimento econômico. No entanto, com a crise ambiental e o aumento de conscientização, as alterações ambientais passaram a representar uma preocupação com o comprometido da qualidade ambiental e da saúde da população.

A necessidade de retirar a fumaça produzida no aquecimento das casas, levou a origem da chaminé, que teve sua função ampliada séculos atrás, não somente para levantar a poluição das indústrias sobre a superfície, mas também para aproveitar os ventos na dispersão horizontal, às vezes por longas distâncias. No entanto, como descrito por Jacobson (2002, p.166), as chaminés aumentaram o problema nas áreas vizinhas ao ponto de emissão. Pode-se dizer que elas contribuíram no aumento da escala de abrangência de fontes fixas pontuais de poluição do setor industrial.

Processos industriais emitem fuligem, sulfetos, cinzas volantes⁹ e metais. Cinzas volantes de processos industriais geralmente contêm Fe_2O_3 , FeO_4 , SiO_2 e vários compostos de carbonatos de vários metais que foram oxidados em diferentes temperaturas, emitidos em tamanho maior que $2\mu m$. Os metais são emitidos durante os processos de alta temperatura como fundição, em alguns casos metais pesados (ex.: arsênio, chumbo e cádmio) são vaporizados em altas temperaturas e recondensados em fuligem e cinza volante, formadas simultaneamente. De todos os metais emitidos pelos processos industriais, ferro é o mais abundante. (JACOBSON 2002, p.127; GIRARD 2010, p.172).

⁹ Fly Ashes, Bottom Ashes...

Os materiais emitidos são específicos para cada processo industrial, como a cinza volante da queima do carvão, principalmente, nas termoelétricas e a microssilica (material particulado) na metalurgia do silício.

Os compostos de silício são os mais abundantes na crosta terrestre e podem ser classificados em cristalinos e amorfos, de acordo com a estrutura.

A sílica cristalina está presente em atividades, como mineração, metalurgia, cerâmica, pedreiras e jateamento de areia, que incluem processos de fragmentação do quartzo. A exposição dos trabalhadores aos particulados da sílica cristalina está associada a problemas de saúde ocupacional como a silicose e o câncer de pulmão (IARC 1997, BON 2006 e FERREIRA, et al. 2008).

Na metalurgia do silício e ferro-silício, a exposição dos trabalhadores a sílica cristalina ocorre durante o processo produtivo, pelo manuseio de matéria prima (quartzo-areia) (IARC 1997, BON 2006). Estudo sobre trabalhadores expostos a sílica em Belo Horizonte mostra que 8,7% dos pacientes atendidos no Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Minas Gerais exercem atividade na metalurgia, setor que ocupa a quarta posição entre as atividades com maior ocorrência (CARNEIRO, et al. 2002, p. 333).

A sílica amorfa, por sua vez, pode ter origem natural ou por processos de fusão. Este último é o caso dos compostos particulados de microssilica, produzida por fornos de arco elétrico¹⁰ da produção de ligas de silício ou de ferro-silício, que pode ser coletada por filtros ou emitida para atmosfera como componente do material particulado.

A emissão de poluentes atmosféricos ocorre nas diversas atividades industriais, e no caso da metalurgia de silício, constitui-se no principal problema ambiental devido à emissão de grandes quantidades do material particulado. Esse material particulado é composto basicamente pelo subproduto do processo da metalurgia do silício, uma sílica amorfa, que pode ser denominada sílica ativa, sílica volatizada, fumo de sílica (BIANCHINI 2010, 31, ALBUQUERQUE e LIMA 2014) ou microssilica, de maior uso na atualidade e considerado mais apropriado já que se refere a partículas sólidas.

Microssilica é o nome mais comercial da sílica amorfa, usada na produção de cimento Portland ou adicionada ao concreto para melhorar as propriedades como resistência e permeabilidade (SILVA e HELENE 1993, HORFFMANN 2001, DO CARMO e PORTELLA 2008, BIANCHINI 2010, AMORIM 2010 e FONSECA 2010).

¹⁰ Grandes fornos elétricos de fusão do tipo arco-voltaico, que operam a temperaturas acima de 2000°C.

Segundo Dal Molin (2005) e Mehta & Monteiro (2008), a redução do quartzo produz vapores de monóxido de silício gasoso (SiO), que se oxida em contato com o ar e condensa, na zona de baixa temperatura do forno (parte superior), em partículas esféricas minúsculas compostas basicamente por dióxido de silício (SiO_2). Estas partículas podem ser removidas através da filtração dos gases expelidos, por filtros manga. Estes autores colocam a microssílica como um resíduo do processo produtivo.

Em contraposição, na atualidade, a microssílica não é mais vista como resíduo e sim como um subproduto, tendo em vista o seu uso e o valor econômico. No entanto, o aproveitamento da microssílica depende de um sistema de coleta por filtro de manga que poucas indústrias possuem devido ao elevado custo.

O teor de sílica emitido varia de acordo com a pureza da liga de silício (75 a 99% de Si), e quanto mais alto o teor de sílica na liga, maior o teor de sílica ativa no material particulado (NEVILLE, 1997; MEHTA E MONTEIRO, 2008). Conforme as matérias primas utilizadas, o tipo do forno, os procedimentos operacionais empregados, o tipo de liga produzido, dentre outros, se obtêm diferentes quantidades de sílica ativa por tonelada de liga metálica produzida, que pode variar de 90kg/ton (Silício 50%), 350kg/ton (Silício 75%) a 550 kg/ton (Silício Metálico) (BIANCHINI 2010, 32).

Quando utilizado o sistema de controle da emissão de particulado como o filtro de manga, o material é coletado, pode ser comercializado e resolve parte do principal problema ambiental envolvendo as indústrias metalúrgicas, a emissão atmosférica de material particulado.

3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA REGIÃO

A área de estudo localiza-se entre os municípios de Pirapora e Buritizeiro e compreende uma porção adjacente às áreas urbanas. Está inserida na microrregião (FIG. 2) de Pirapora e Mesorregião Norte de Minas Gerais.

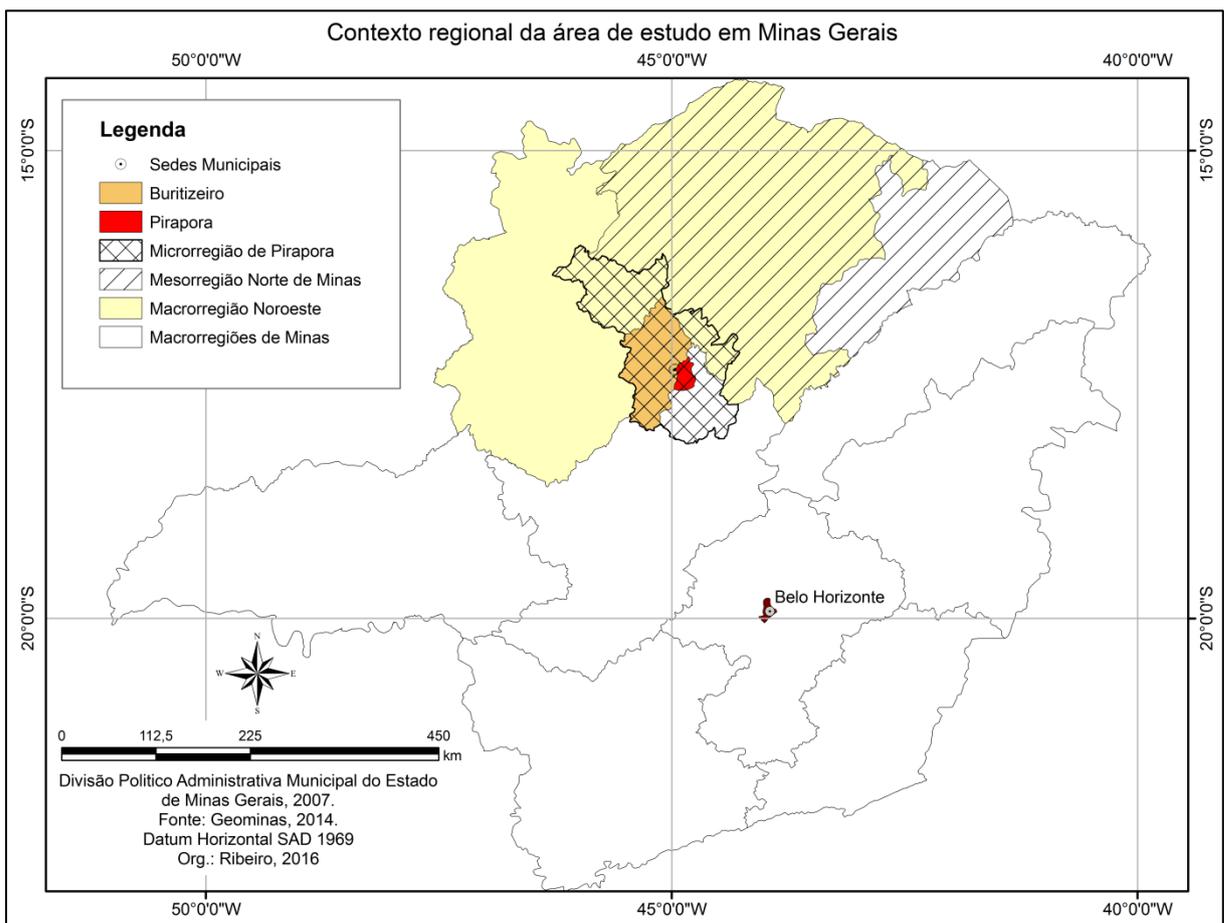


FIGURA 2 - Mapa do contexto regional da área de estudo.

A porção de maior interesse compreende um segmento que engloba a área central entre os municípios de Pirapora e Buritizeiro (FIG. 3). No município de Pirapora, localizado à margem direita do Rio São Francisco, está instalado o maior distrito industrial da microrregião, que inclui empresas do ramo têxtil, cerâmica e metalurgia de Ferro-Silício (Fe-Si) e Silício Metálico (Si). A área industrial está situada na porção central da área de estudo, onde ocorre a emissão dos particulados atmosféricos, objeto desta investigação.

O Município de Buritizeiro, localizado à margem esquerda do Rio São Francisco, tem sua porção leste-central como potencial ambiente de circulação e deposição desses particulados.

Na região localiza-se distrito industrial de Pirapora, o segundo maior do Norte de Minas, e inclui 3 das maiores indústrias metalúrgicas de Si e Fe-Si do país. Essas indústrias estão localizadas à margem do Rio São Francisco e chamam a atenção pela emissão de plumas de fumaça compostas, principalmente, por material particulado.

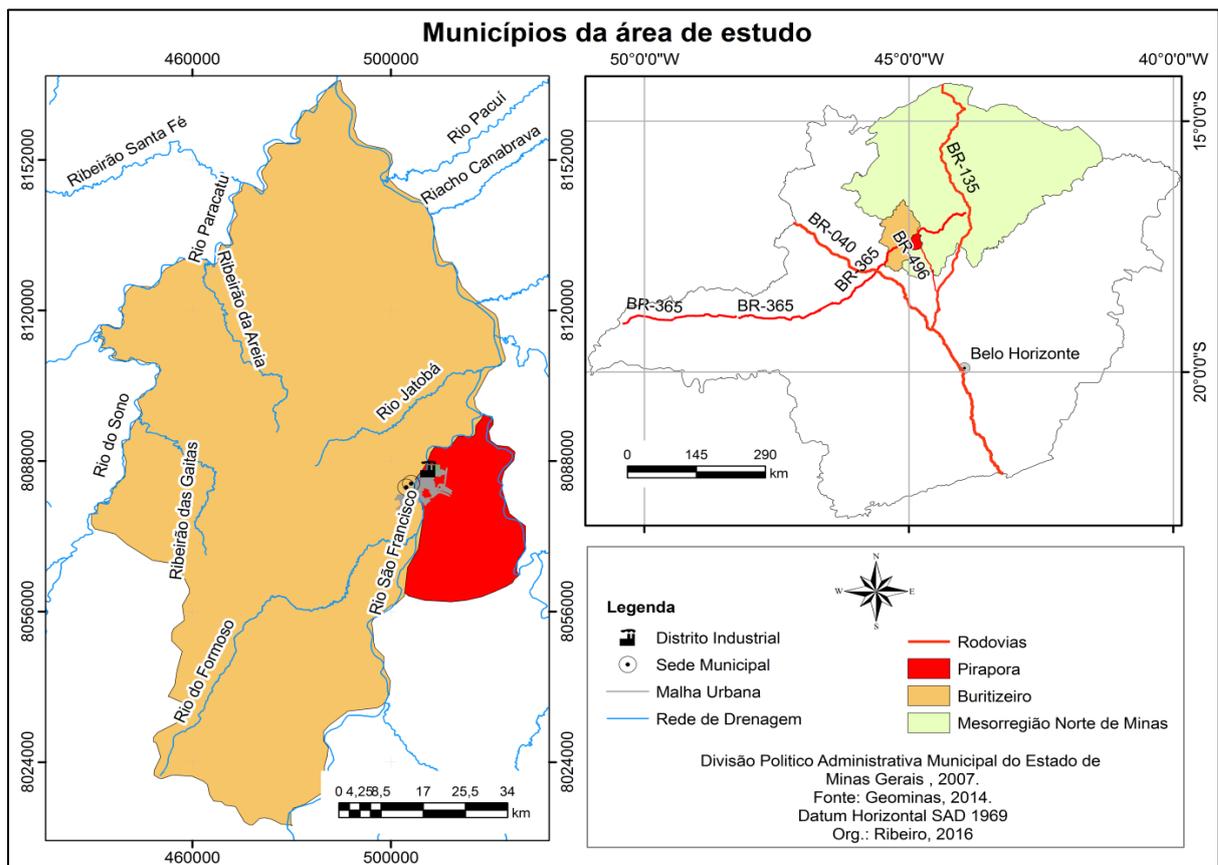


FIGURA 3 - Acesso a área de estudo, localizada nos municípios de Pirapora e Buritizeiro.

O acesso à área é feito pela BR-040, a partir de Belo Horizonte no sentido Brasília. Uma primeira opção de trajeto é pela BR-135 até o trevo de Curvelo, seguindo pela BR496 até Pirapora. A segunda opção, a partir da BR-040, saindo no trevo JK, segue pela BR-365 até Buritizeiro. A área dista cerca de 350 km de Belo Horizonte.

3.1. Aspectos fisiográficos

Do ponto de vista geoestrutural, a área de estudo está inserida no Cráton do São Francisco (TROMPETTE et al., 1992) de embasamento Arqueano/Proterozóico Inferior sobreposto por coberturas sedimentares Proterozóicas da Bacia do São Francisco e Fanerozóicas da Bacia Sanfranciscana (CAMPOS e DARDENNE, 1997a).

A Bacia do São Francisco é localmente caracterizada pela presença dos arenitos arcoseanos (topo da Bacia na região) com ocorrências locais de Argilitos e Siltitos da Formação Três Marias do Grupo Bambuí. Estes, têm grande representatividade na área de estudo, podendo ser observado em afloramentos tanto no leito, quando rochoso, dos canais fluviais, quanto nas bordas erosivas entre as cotas de 600 e 700m.

A cobertura Fanerozóica na Bacia Sanfranciscana (FIG. 4) é regionalmente caracterizada pelos depósitos mesozoicos do Grupo Areado (Eocretáceo), composto pelas Formações Abaeté, Quiricó e Três Barras; do Grupo Mata da Corda (Neocretáceo), com as Formações Patos e Capacete e as Coberturas Cenozoicas da Formação Chapadão, definidas como coberturas arenosas inconsolidadas recentes de caráter elúvio-coluvionar ou aluvionar (CAMPOS e DARDENNE, 1997b).

O Grupo Areado, sotoposto ao Grupo Bambuí, é marcado pela presença dos arenitos eólicos da Formação Três Barras que, segundo Sgarbi (1991, p. 344), ocorrem realçados na topografia da região, limitados por escarpas abruptas que se sobressaem na topografia devido a sua maior resistência à erosão dessas rochas em relação às adjacentes. Essa característica pode ser observada principalmente nas áreas de contato com o Grupo Mata da Corda, que contribui para a sustentação dessas escarpas erosivas. Segundo o autor, o grau de alteração dos arenitos é menor onde existe o capeamento por rochas vulcânicas, as quais inibem a percolação vertical de águas meteóricas devido ao seu comportamento relativamente impermeável (SGARBI, 1991, p. 347).

As coberturas Cenozoicas estão sobrepostas aos litotipos dos Grupos Areado e Mata da Corda e mais restritamente aos litotipos do Grupo Bambuí (FIG. 4). Localmente, destaca-se a presença das concreções ferruginosas em diferentes níveis topográficos bordejando e protegendo as escarpas dos morros residuais do avanço erosivo.

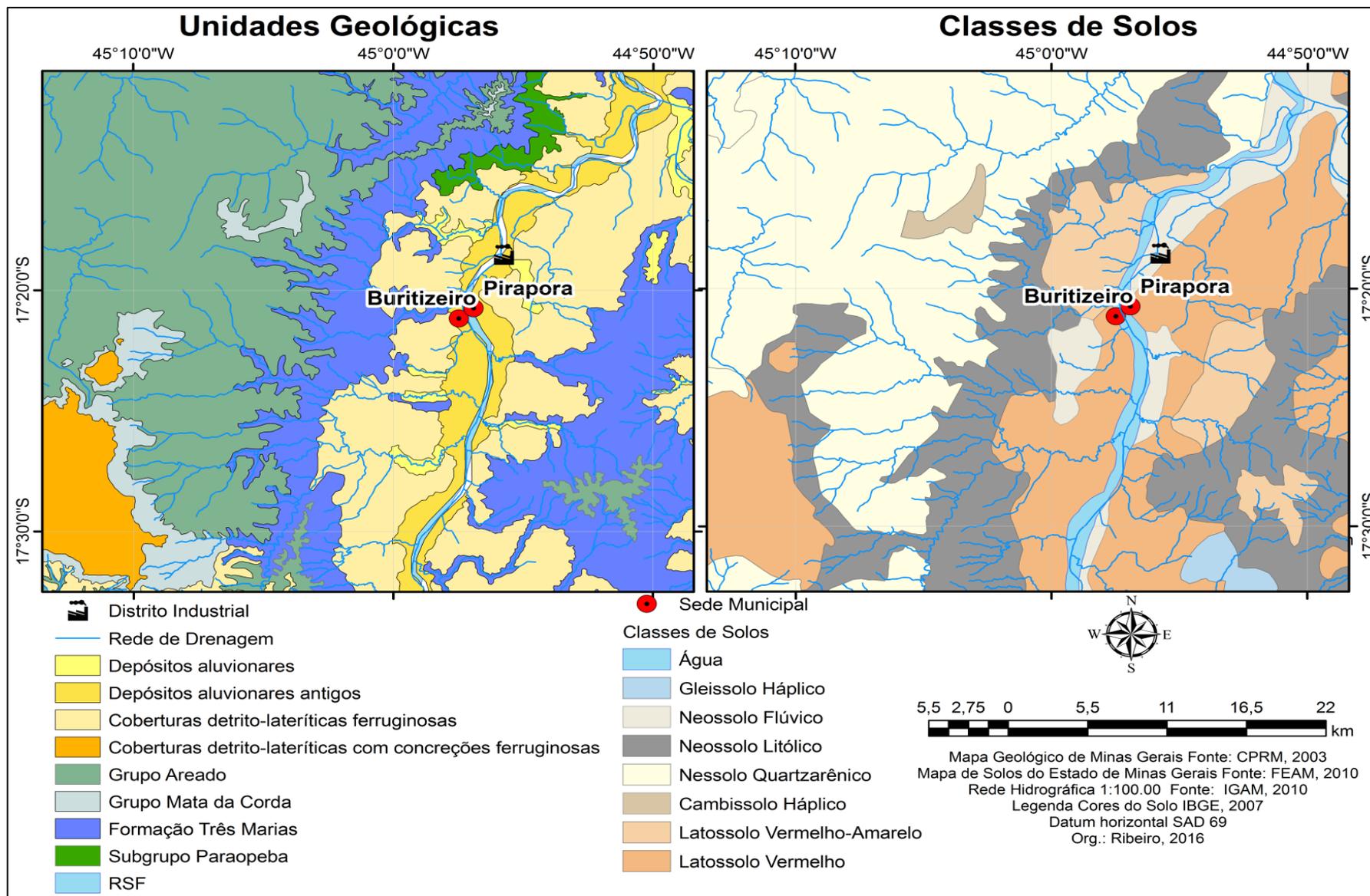


FIGURA 4 - Mapas da unidades geológicas e classes de solos na área de estudo.

Quanto aos solos (FIG. 4), de acordo com o mapeamento de solos de Minas Gerais de 2010, publicado pela FEAM, são definidas seis classes principais para a área de estudo: Cambissolo Háplico, Gleissolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, Neossolo Litólico e Neossolo Quartzarênico. Os Latossolos e os Neossolos Quartzarênicos apresentam ocorrências em relevo plano, suave-ondulado e ondulado. Predominam os Neossolos Quartzarênicos, que ocorrem no contexto litológico do Grupo Areado na superfície geomorfológica intermediária. Os Latossolos ocorrem tanto no piso da depressão como nas áreas dos topos planos das unidades tabulares; enquanto os Neossolos Litólicos ocupam as bordas erosivas nas áreas de maior declividade. Os Neossolos Flúvicos estão nas áreas da planície do Rio São Francisco, mas ocorrem também nos baixos cursos dos seus afluentes. Ainda associados à rede de drenagem tem-se os Gleissolos nas áreas de cabeceiras de drenagem, em Veredas.

Geomorfologicamente, Melo (2008, p. 97) aponta dois conjuntos de relevo para a região: a Depressão Sanfranciscana (500 a 600 m de altitude) e os Planaltos Residuais do São Francisco que segundo a autora, encontram-se escalonados em dois níveis topográficos, um com altitudes entre 800 a 910 m e outro, mais rebaixado, com altitudes entre 650 a 750 m (FIG. 4). Valadão (1998, p. 213) coloca que na porção central do estado de Minas Gerais, amplas e recorrentes coberturas cretácicas ocupam o topo de chapadas esculpidas pela erosão regressiva dos afluentes das margens esquerda e direita do atual Rio São Francisco.

Neste trabalho, será considerada a compartimentação (FIG. 5) em três unidades proposta por Baggio (2002): a Tabular (superfície de cimeira), a Intermediária e a Depressão Interplanáltica (piso da depressão). O Piso da depressão 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 (900m), 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.

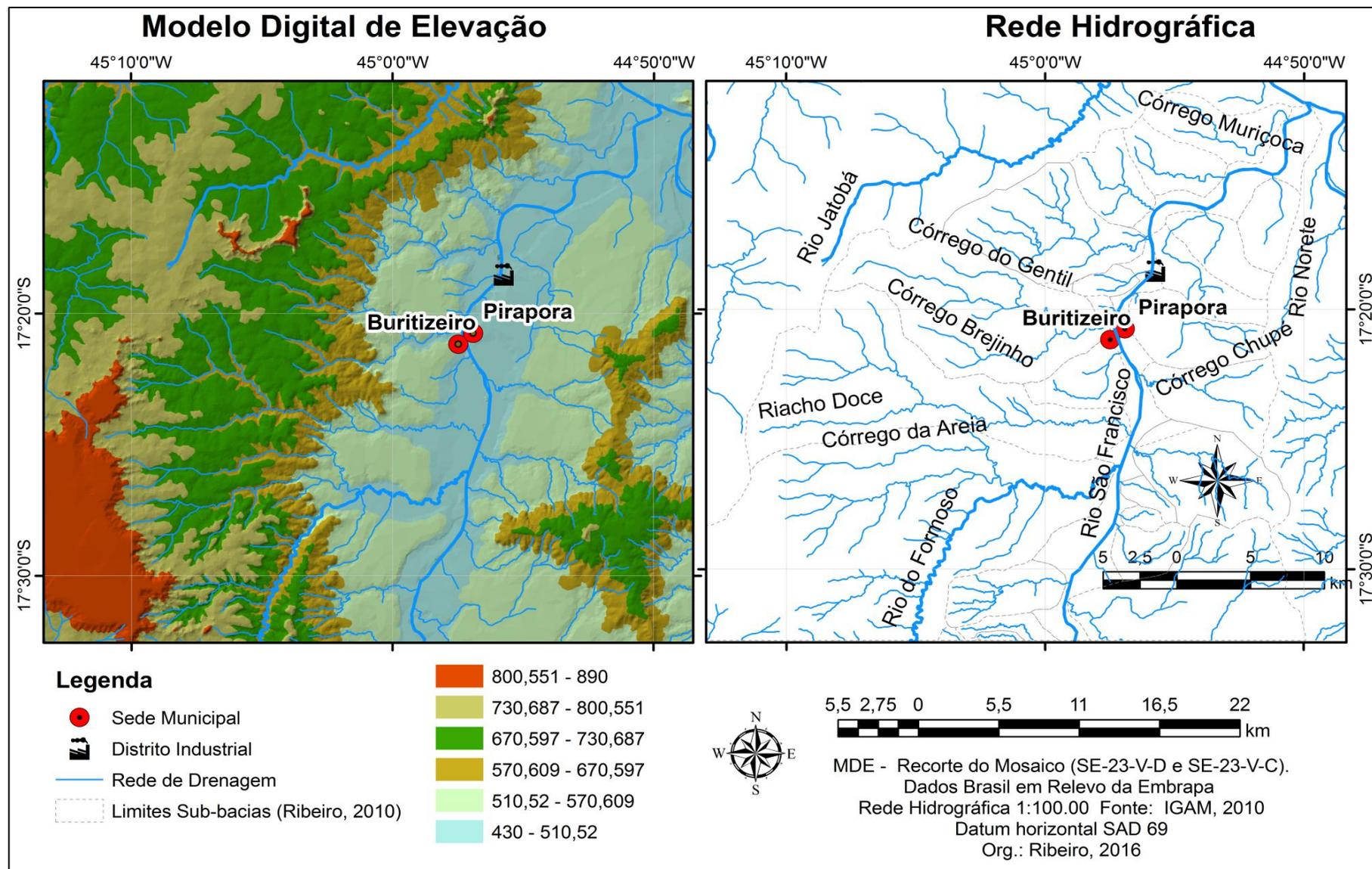


FIGURA 5 - MDE e rede de drenagem da área de estudo.

Do ponto de vista hidrográfico (FIG. 5), 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 são delimitadas pelos divisores internos: Chapadão dos Gerais e Serra do Jatobá em Buritizeiro e Serra do Repartimento em Pirapora.

A maior bacia inserida na área de estudo é a do Rio do Formoso¹¹ no seu baixo curso. As bacias menores, inteiramente na área de estudo, são as dos Córregos Doce, Lontra, das Pedras, Quatzino, Areia, Taboca e Muriçoca na margem esquerda. Na margem direita, estão as sub-bacias dos córregos Marambaia, do Coqueiro e Entre Rios.

A sazonalidade caracteriza o clima na região (FIG. 6), ocorrendo duas estações bem definidas. Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante na região é definido como 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).

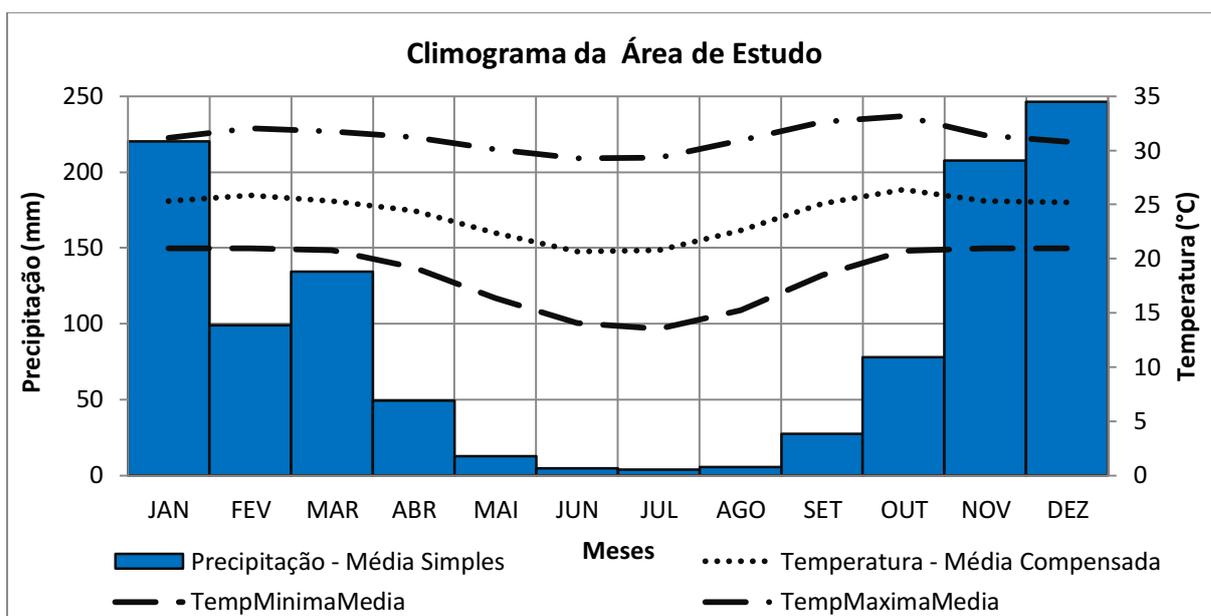


FIGURA 6 - Médias de Precipitação e temperatura média compensada na área de estudo. Fonte: INMET, 2014.

Baseado nos dados históricos do INMET, de 1961 a 2013, da Estação Convencional de PIRAPORA - MG (OMM: 83483 - Latitude -17,35/ Longitude: - 44,91 /505,24 m), a média da precipitação total anual fica em torno de 1000 mm, a temperatura média compensada mínima é de 20,6° (FIG. 6) e ocorre no mês de Junho e a máxima de 25,8° em Fevereiro.

¹¹ Área de drenagem de 826km² (TRINDADE, 2006).

As chuvas concentram-se entre novembro e março, e os meses mais secos são junho, julho e agosto, sendo que em vários anos não ocorre nenhuma precipitação nestes meses. Nesse período mais seco, a presença de poluentes na atmosfera contribui para a diminuição da qualidade do ar, devido a maior dificuldade de dispersão dos particulados.

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).

Os subsistemas veredas são ambientes de destaque e, geralmente, encontram-se associados às nascentes, estando também bastante degradados devido às mudanças no uso e ocupação do solo que ocorrem nas últimas décadas (VIANA, 2006; MELO, 2008; MORAES, 2010).

3.2. As mudanças no uso da terra e a atividade industrial

A incorporação do Norte de Minas na área de atuação da SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste) tem reflexos diretos no contexto atual de uso e ocupação do solo dos municípios.

Os aspectos físicos, sociais e econômicos dessa região de Minas Gerais justificaram a sua inclusão na área de atuação da SUDENE, a região definida naquele momento como a zona de Minas Gerais, compreendida no Polígono das Secas. Instituída pela Lei nº 3.962/1959, em 2001, a SUDENE foi substituída pela ADENE (Medida Provisória nº 2.146-1), no entanto, foi novamente instituída em 2007, pela Lei complementar nº 125.

Segundo Gama (2006, p. 42), "O norte de Minas que apresenta contrastes naturais e sociais semelhantes aos do Nordeste do País, foi inserido na RMNe (Região Mineira do Nordeste), e assistido pelas políticas públicas gerenciadas pela SUDENE, que direcionou as atividades implantadas na região." A autora destaca que, nesse contexto, a industrialização era peça-chave.

Em Pirapora, a instalação da sede municipal, em 1912, e a chegada da Ferrovia, em 1918, são marcos importantes da evolução da cidade. No entanto, segundo Dumont (2007, p. 42) com a criação da SUDENE, Pirapora dá um passo rumo à industrialização e ao crescimento socioeconômico. Essa realidade não foi diferente no município de Buritizeiro. As mudanças decorrentes das ações da SUDENE, na região de Pirapora, tiveram relação

direta com a mudança do uso e ocupação da terra no município de Buritizeiro, descrito por Gama, Paula e Lima (2003). Este, por sua grande extensão territorial e aspectos fisiográficos favoráveis, recebeu grandes unidades produtivas voltadas para a monocultura.

Buritizeiro, como outros municípios do Norte de Minas, obteve incentivos da superintendência, para a implantação de atividades voltadas para o reflorestamento e carvoejamento, objetivando fornecer carvão às indústrias implantadas em Pirapora, em Várzea da Palma e em outras áreas do Sudeste (GAMA, 2006, p. 43).

Dumont (2007, p. 49-50) ressalta que, a partir da criação da SUDENE, Buritizeiro desenvolveu-se com a implantação de projetos agropecuários, com monoculturas de soja, café, algodão e grandes plantações de eucalipto, e o município de Pirapora transforma-se em Pólo industrial dinâmico e atuante.

Diante dessa realidade inicia-se um processo de transformação que envolve aspectos culturais, sociais, econômicos e ambientais.

A mudança no perfil da população (FIG. 7) mostra bem essa mudança. Com a chegada das indústrias na cidade de Pirapora e as monoculturas no espaço rural de Buritizeiro, a população migra para as cidades em busca de novas oportunidades.

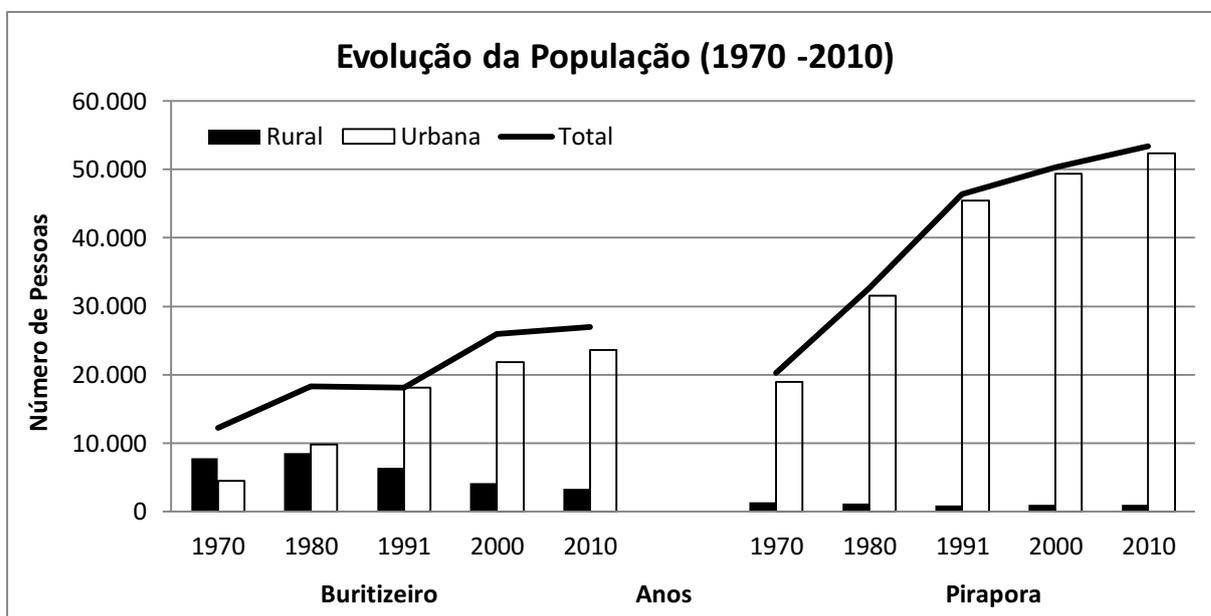


FIGURA 7 - População rural e urbana em Pirapora e Buritizeiro entre 1970 e 2010. Fonte: IBGE, 2014.

Pirapora, como pólo da microrregião, tem o maior crescimento populacional nas últimas décadas, resultado da atração exercida sobre as cidades vizinhas. Em Buritizeiro, a população migra do campo para a cidade. Essa mudança ocorrida nesses municípios

acompanha as mudanças em nível estadual e federal, um contexto em que a industrialização e a urbanização consolidaram a nova organização espacial do Brasil.

A figura 7 mostra o crescimento populacional nos últimos 40 anos e a concentração da população no espaço urbano. Essa mudança é ainda mais clara no município de Buritizeiro, em que se observa a redução da população rural e o aumento da população urbana. Para Baggio (2002, p. 30) "essa expressiva taxa de crescimento foi decorrente do processo urbano-industrial ocorrido no entorno do pólo de Pirapora, passando a sede municipal de Buritizeiro a ser uma cidade dormitório para o núcleo urbano vizinho".

Aspectos como extensão territorial e dados da população marcam a diferença entre Pirapora, de menor extensão, maior densidade populacional e vocação industrial, e Buritizeiro, maior extensão, menor densidade populacional e vocação agropecuária.

Em Pirapora, a implantação do distrito industrial reafirmou a posição de pólo da cidade no contexto regional (micro). Nesse sentido, para Souza (2008, p. 90-108), trata-se de uma cidade que apresenta indústrias variadas, no caso metalúrgicas, têxteis e minerais não-metálicos sendo que tal diversificação industrial foi possível através da já citada implantação do Distrito Industrial na década de 1960, um dos mais importantes distritos industriais do Norte de Minas. A área anteriormente denominada Cidade Industrial passa a ser chamada de Distrito Industrial em 1964 (DUMONT, 2007; SILVA e AFONSO, 2009).

A presença da metalurgia no distrito industrial de Pirapora fortaleceu a função industrial da cidade, uma vez que são as unidades com maior capacidade produtiva. São três grandes empresas: “Ligas de Alumínio SA” (Liasa), a “Cia. Ferro Ligas de Minas Gerais” (MinasLigas) e a “Inoculantes e Ferro Ligas Nipo-Brasileira” (Inonibrás).

A Liasa é a maior empresa de produção de silício metálico na América do Sul, foi instalada em novembro de 1966, iniciando a produção em 1972. É a pioneira na produção de silício na América latina. A planta opera com quatro fornos elétricos de redução, com uma capacidade de produção de 46.000t/ano (LIASA, 2014).

A Inonibrás iniciou suas operações em dezembro de 1983. Sua produção atualmente está voltada para o atendimento exclusivo ao mercado externo (Japão) para utilização em processos de refino de metais em fundições de aço e produção de ferro fundido. Segundo a empresa "preocupada com o socioambiental, foi pioneira na região com a implantação do Sistema para tratamento de emissão de gases atmosféricos em forno elétrico" (INONIBRÁS, 2014).

A Companhia Ferroligas Minas Gerais – MINASLIGAS - iniciou suas atividades em 1980 e, atualmente, conta com oito fornos, que viabilizam uma produção anual de até

60.000t/ano de Ferro Silício 75% e de 40.000t de Silício Metálico, além de um volume expressivo (5.000t/ano) de Microsilícia (MINASLIGAS, 2014).

A dinamização da economia regional pelo distrito industrial de Pirapora teve como consequência uma série de problemas ambientais. No período de instalação, o Brasil ainda não contava com uma legislação ambiental, sendo permitida, por exemplo, a instalação de um Distrito Industrial às margens do Rio São Francisco (área de APP), que se justificava pela maior facilidade de acesso à água.

Problemas ambientais, como lançamento de efluentes líquidos (RIBEIRO, 2007; RIBEIRO, 2010; TRINDADE, 2010) e poluição da atmosfera (BRAGA, 2007), são temas recorrentes no contexto ambiental local e regional. A emissão de particulados atmosféricos tem como fonte principal os alto-fornos das indústrias metalúrgicas de Ferro Silício e Silício Metálico.

3.2.1. As emissões atmosféricas de partículas na metalurgia do silício: contextualização e aspectos gerais

A primeira produção industrial de ferroligas em escala industrial no Brasil ocorreu em 1935, em 1966 já eram 6 e, na década de 1970, tem-se o maior crescimento com um aumento de 127 mil toneladas em 1972 para 552 mil toneladas em 1980 (FEAM 2010b, p.1).

A produção de ferroligas é segmentada de acordo com a substância utilizada na liga, dentre elas, existem as de silício que incluem o Ferro-silício e o Silício Metálico. A produção destas ligas em Minas Gerais corresponde a 27% da produção mundial, segundo dados da FEAM de 2010.

Em Minas Gerais, são 22 empreendimentos de Ferroligas em 16 municípios, dos quais 13 produzem Ferro-Silício e/ou Silício Metálico. Os Municípios de Pirapora e Várzea da Palma concentram o maior número de fornos (FIG. 8) na metalurgia do silício.

Desconsiderando o oxigênio, o silício é o elemento mais abundante na crosta terrestre, presente na composição química e mineralógica da maioria das rochas, é o principal elemento do grupo de minerais formadores de rochas, os silicatos. Destes, destaca-se o quartzo, com a fórmula molecular SiO_2 , componente básico da metalurgia do silício.

O silício tem aplicações variadas na metalurgia como agente redutor e como liga metálica no aço, latão e bronze. Em estado altamente purificado, é usado em dispositivos

fotoelétricos, transistores, chips e outros componentes eletrônicos (MORI, SANTOS e SOBRAL, 2007, p.15).

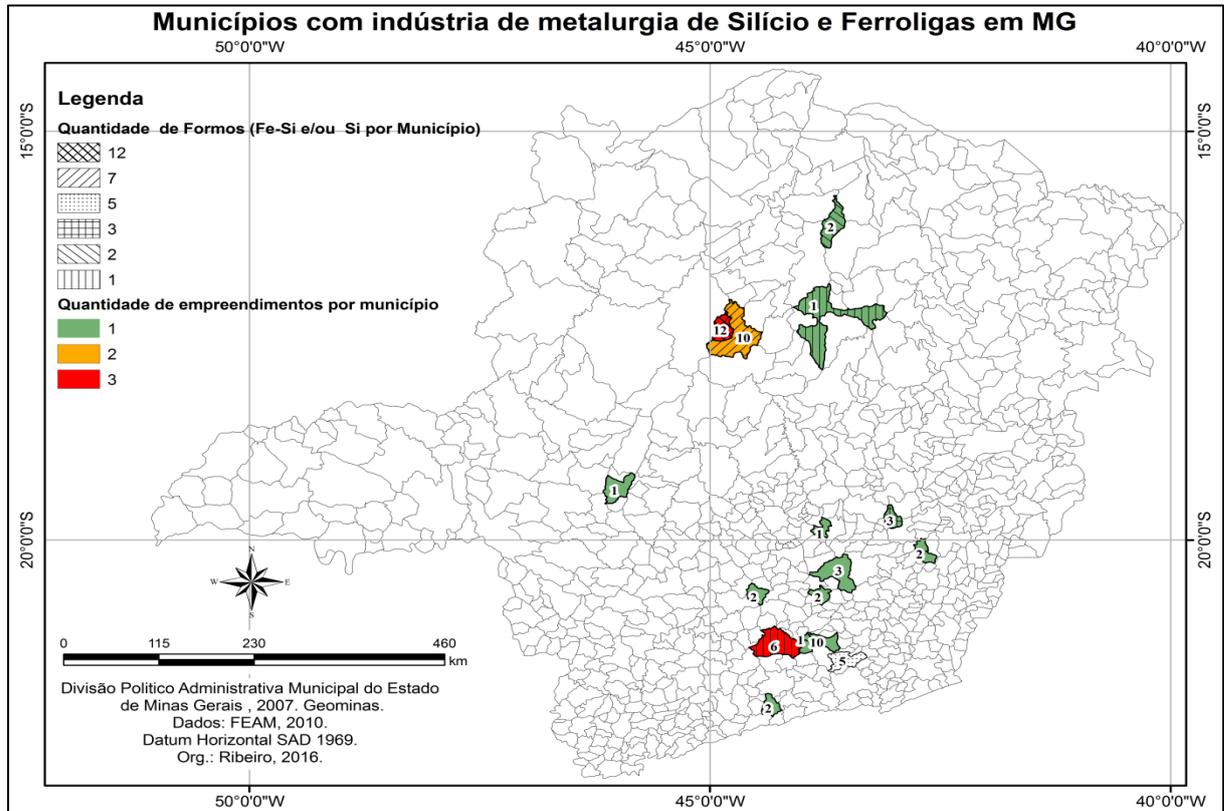


FIGURA 8 - Distribuição espacial das Ferroligas em Minas Gerais. Os números indicam a quantidade total de fornos por município.

As ligas de silício são classificadas de acordo com a quantidade deste elemento na liga: Ferro-Silício, quantidade de silício menor que 96% e, Silício metálico, com porcentagem de silício em torno de 96%. O processo de produção inclui a matéria prima (quartzo), os fundentes (bauxita ($AlO_x(OH)_{3-2x}$), alumina (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), olivina ($Mg_{1,5}Fe_{0,5}SiO_4$), calcário ($CaCO_3$) e dolomita [$CaMg(CO_3)_2$]), e os redutores (carvão mineral ou vegetal e/ou coque) (FEAM 2010a, p.35). No processo pode ser usado também Barita ($BaSO_4$).

A produção das ligas de silício são as que demandam maior quantidade de energia, o Ferro-Silício 75% consome entre 8.500 a 10.000 kWh/t e o Silício Metálico entre 11.000 e 14.000 kWh/t, cinco vezes a demanda para produção do Ferro Gusa. É também, neste segmento, onde se tem as maiores emissões atmosféricas pelos fornos de fundição.

As emissões (FIG. 9) incluem o material particulado e os compostos gasosos. Estes contêm dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO),

dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos aromáticos e metais pesados (depende do processo)(FEAM, 2010b, p.60).

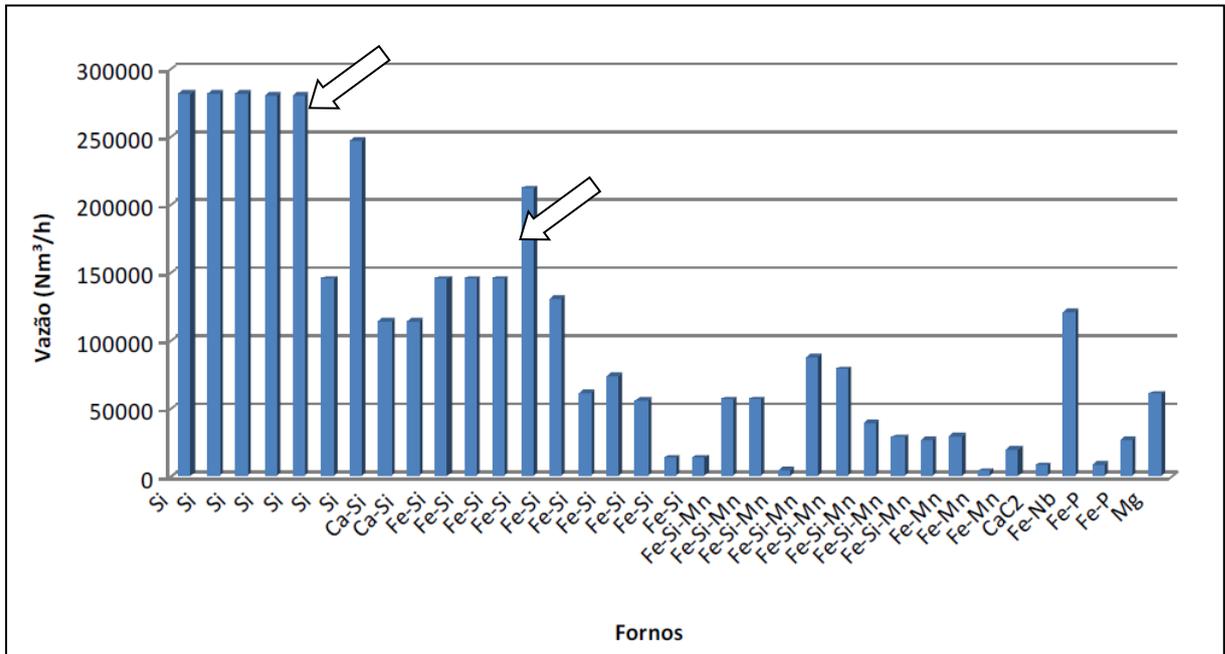


FIGURA 9 - Vazão dos fornos de produção de ligas em Minas Gerais em 2010. As setas indicam as maiores emissões da metalurgia de Silício Metálico e Ferro-Silício em comparação com os demais processos de produção de Ferroligas. A vazão refere-se ao total, incluindo o Material Particulado. Fonte: (FEAM, 2010b, p. 139)

O tratamento das emissões nos fornos é comumente feito por meio dos filtros de manga, utilizados para coletar o material particulado. No entanto, grande parte das empresas não possui um sistema de tratamento das emissões atmosféricas.

Segundo FEAM (2010), em Minas Gerais, 47% dos fornos não possuem filtros, o que corresponde a 28 de um total de 60 fornos. Outro aspecto analisado refere-se ao sistema de monitoramento das emissões que é realizado somente em 24 fornos e, destes, apenas 8 possuem filtros.

Em 2010, dados dos 8 fornos com filtro somaram um lançamento de 119,48 ton/ano, para os 16 fornos sem sistema de filtragem, o lançamento ficou entre 31.260 e 52.440 t/ano (FEAM 2010a, p.143-144). Estes dados demonstram a importância do uso de um sistema de tratamento dos efluentes atmosféricos evidenciando uma redução em até 40 vezes as emissões atmosféricas.

A reduzida quantidade de empreendimentos com sistema de tratamento das emissões atmosféricas demonstra a dimensão do problema ambiental da poluição atmosférica na

metalurgia. A grande diferença entre as emissões dos fornos com filtros e sem filtro confirma que o processo é eficiente e permite questionar a não utilização deste.

Em relação a esta questão, é conhecida a longa batalha devido ao conflito de interesses entre as questões ambientais e os interesses político-econômicos e, nos países em desenvolvimento, ainda persiste a tendência em prevalecer os interesses econômicos justificados pelo desenvolvimentismo. Além disso, a ausência de estudos do impacto das emissões cria um cenário de desconhecimento dos problemas ambientais, principalmente em longo prazo.

Segundo FEAM (2010), em 19/7/2005, a extinta Câmara de Atividades Industriais (CID) do COPAM celebrou o “Acordo Setorial para Adequação Ambiental para o Setor de Ferroligas e de Silício Metálico das Indústrias do Estado de Minas Gerais”, onde ficou estabelecida:

- A promoção de melhorias entre os anos de 2005 e 2013 para empresas que estavam operando.
- A implantação de filtros dos fornos de ferro-silício⁷⁵ e silício metálico no período de 2009 a 2013.
- A realização do controle das emissões atmosféricas aplicando os padrões vigentes para qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA nº 03/1990 e o padrão de lançamento de emissões atmosféricas para fontes fixas não listadas definido na DN COPAM no 11/1986 com o monitoramento da qualidade do ar na área de influência das unidades industriais efetuado para o parâmetro “Partículas Inaláveis – PM10”, sendo que o número e a localização das estações automáticas definidos para pontos críticos, por meio de um estudo de dispersão atmosférica.
- A implantação de estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar cuja operação e manutenção deverão ser feitas pelos empreendedores, a quem caberá fornecer os resultados em tempo real a FEAM.

Em relatório apresentado em 2010, a FEAM relata que o acordo vem sendo cumprido pelas empresas, no entanto foi solicitado prorrogação do prazo para alguns aspectos. Um deles é a instalação dos filtros para os quais o prazo máximo de 2013 foi estendido até 2016.

Em Pirapora (área de estudo), apenas 5, de um total de 12 fornos, estão com filtros instalados. Entre 2014 e 2015, foram solicitadas novas alterações no cronograma de instalação dos filtros das indústrias em Pirapora, estendendo o prazo máximo até 31/12/2016 para a instalação dos filtros em atraso, que tinham previsão de instalação para 2014 e 2015.

Dentre as justificativas para o atraso na instalação dos filtros, segundo o Parecer Único: N° 1163550/2015 e N° 0300743/2014 - SIAM, estão os custos, ressaltados pelas empresas no contexto da crise, especialmente do setor energético, que levou a paralisação das atividades em 2013, com alguns fornos inoperantes até o momento (2016). Neste sentido, as empresas argumentam que ocorreu uma redução na quantidade total de material emitido para a atmosfera.

Além disso, as empresas ressaltaram que foi necessário revisar os projetos elaborados no ano de 2011, uma vez que os sistemas para os filtros tinham sido projetados para atender o parâmetro de 150mg/Nm³ de material particulado conforme preconizava a DN COPAM n° 11/86, diferente do parâmetro de 50mg/Nm³ exigido na atual DN COPAM n° 187/2013.

Quanto ao monitoramento da PM₁₀, o relatório mostra que das 18 estações instaladas em Minas Gerais, somente uma (Localizada na FUNAM, em Pirapora) apresenta padrões desconformes com a legislação. Percebe-se por este resultado que a situação do município, no contexto estadual, deve ser foco de atenção no que se refere a poluição do ar. A cidade de Pirapora tem duas estações de monitoramento, a supracitada e outra localizada no SAAE.

Por fim, espera-se que, ao fim do novo prazo acordado, a realidade das emissões atmosféricas tenham apresentado avanços tanto no que se refere à instalação dos filtros quanto ao monitoramento da qualidade do ar.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos empregados neste trabalho envolvem quatro etapas principais (FIG. 10). A primeira refere-se à caracterização e ao estudo da distribuição espacial da pluma de particulados a partir da análise de dados de clima, geomorfologia e imagens de satélite. A segunda compreende os trabalhos de campo e coleta de amostras. Esta fase inclui o monitoramento do material particulado em estações de amostragem nos municípios de Pirapora e Buritizeiro. A terceira inclui as análises laboratoriais para caracterização granulométrica, mineralógica e química do material particulado emitido; composição química e morfologia das partículas atmosféricas e análise das concentrações de metais pesados do solo. Ainda em laboratório, foram obtidas fotomicrografias do material particulado para identificação das partículas de origem industrial na área de circulação da pluma de poluição. Por fim, na quarta etapa, foi realizada a avaliação ambiental considerando a distribuição das partículas e as concentrações dos metais pesados presente no material particulado e no solo.

4.1. Distribuição espacial da pluma de particulados

A caracterização da dispersão da pluma de particulados foi realizada utilizando imagens de satélite. Para a escolha do tipo de imagem, foi considerada a resolução espacial e temporal e a possibilidade de acesso aos dados. Dentre as imagens disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), optou-se por trabalhar com aquelas do Landsat 5 TM.

A resolução temporal do Landsat 5 é de 16 dias, com uma área de abrangência de 185 x 185 km (imagem inteira). A resolução geométrica das imagens nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 é de 30 m e, para a banda 6, a resolução é de 120 m. A imagem da área de estudo corresponde à órbita 219, ponto 72, do município de Buritizeiro – MG. Foram utilizadas imagens obtidas entre os anos de 1984 e 2011, dentre as quais foram selecionadas aquelas que apresentaram melhor qualidade e baixa frequência de ruídos ou ocorrência de nuvens. Do total de amostras disponíveis no catálogo de imagens¹², 17,2 % apresentaram ruídos ou coberturas por nuvens que impossibilitaram a análise de direção e medida da extensão da pluma.

¹² Conferir: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>

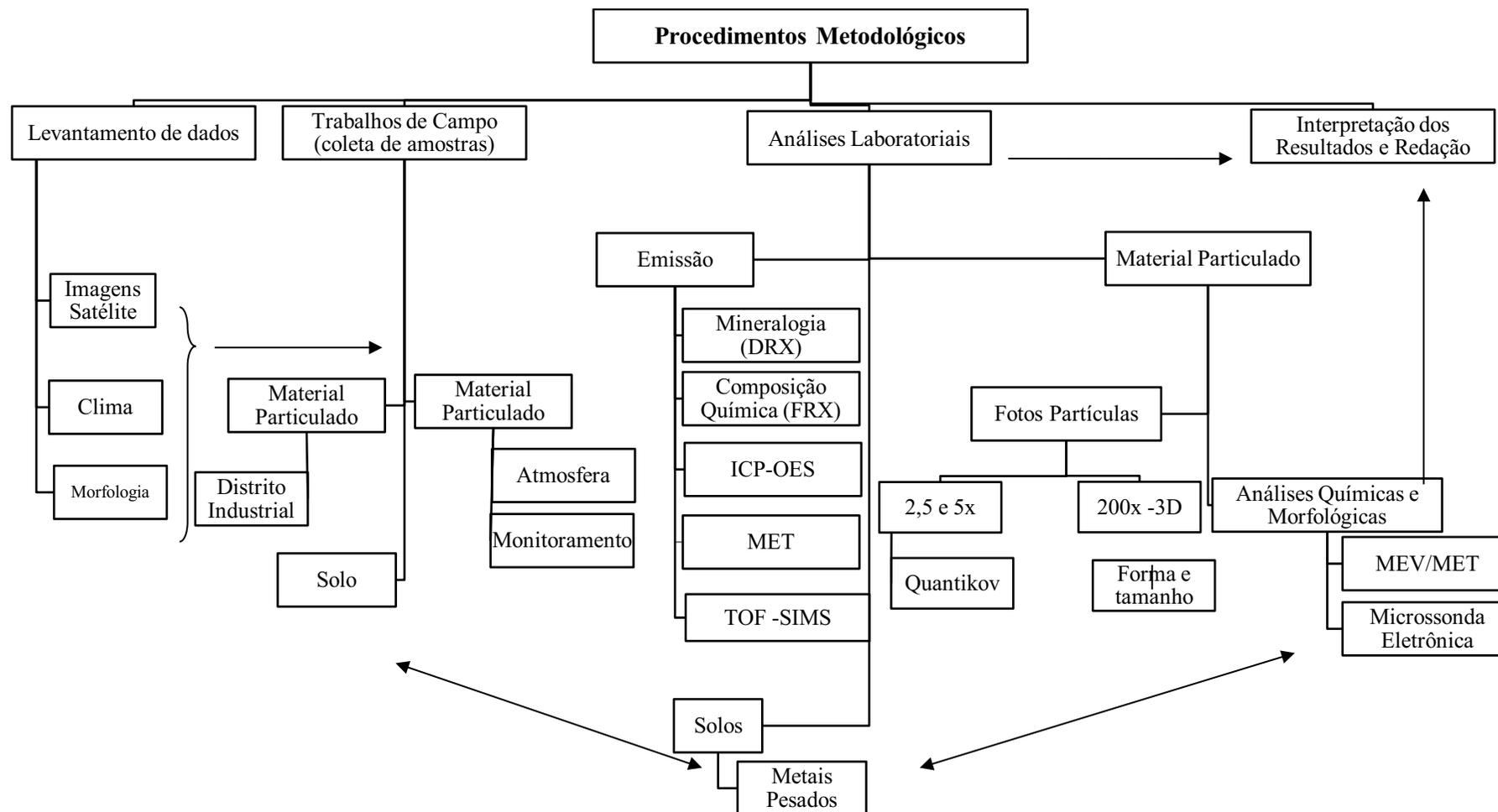


FIGURA 10 - Fluxograma de atividades.

O maior número de imagens corresponde aos últimos dez anos. Quanto à distribuição mensal, destacam-se os meses que correspondem ao período de clima seco (principalmente julho), quando, devido a menor ocorrência de nuvens, é possível a obtenção de imagens com menor interferência das nuvens.

Foram realizados testes visando encontrar a melhor composição para identificação da pluma de particulados. Neles, duas composições se destacaram: RGB312 no visível e a falsa cor RGB 413. A sensibilidade da banda 4 à morfologia do terreno mostrou maior contraste da pluma com a superfície na composição RGB-413 (FIG. 11) assim essa composição foi a que apresentou melhor resultado na identificação da pluma.

Segundo o INPE (2014), a banda 1 ($0,45\mu\text{m} - 0,52\mu\text{m}$) apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial; a banda 3 ($0,63\mu\text{m} - 0,69\mu\text{m}$) tem bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação, é utilizada para delimitar a mancha urbana e, por fim, a banda 4 ($0,76\mu\text{m} - 0,90\mu\text{m}$) apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, 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.

Foram trabalhadas 215 imagens no software Arcgis 10.1, usando a ferramenta "*composite bands*". O primeiro procedimento foi a elaboração da composição colorida obtendo o melhor contraste pluma-terreno. Posteriormente, a imagem foi georreferenciada utilizando a rede de drenagem e pontos obtidos em campo. Após estes procedimentos, foram efetuadas análises da direção e medidas as distâncias alcançadas pela pluma. Estes dados foram organizados em uma tabela do Excel e, posteriormente, analisados a distribuição de frequência da direção e extensão da pluma.

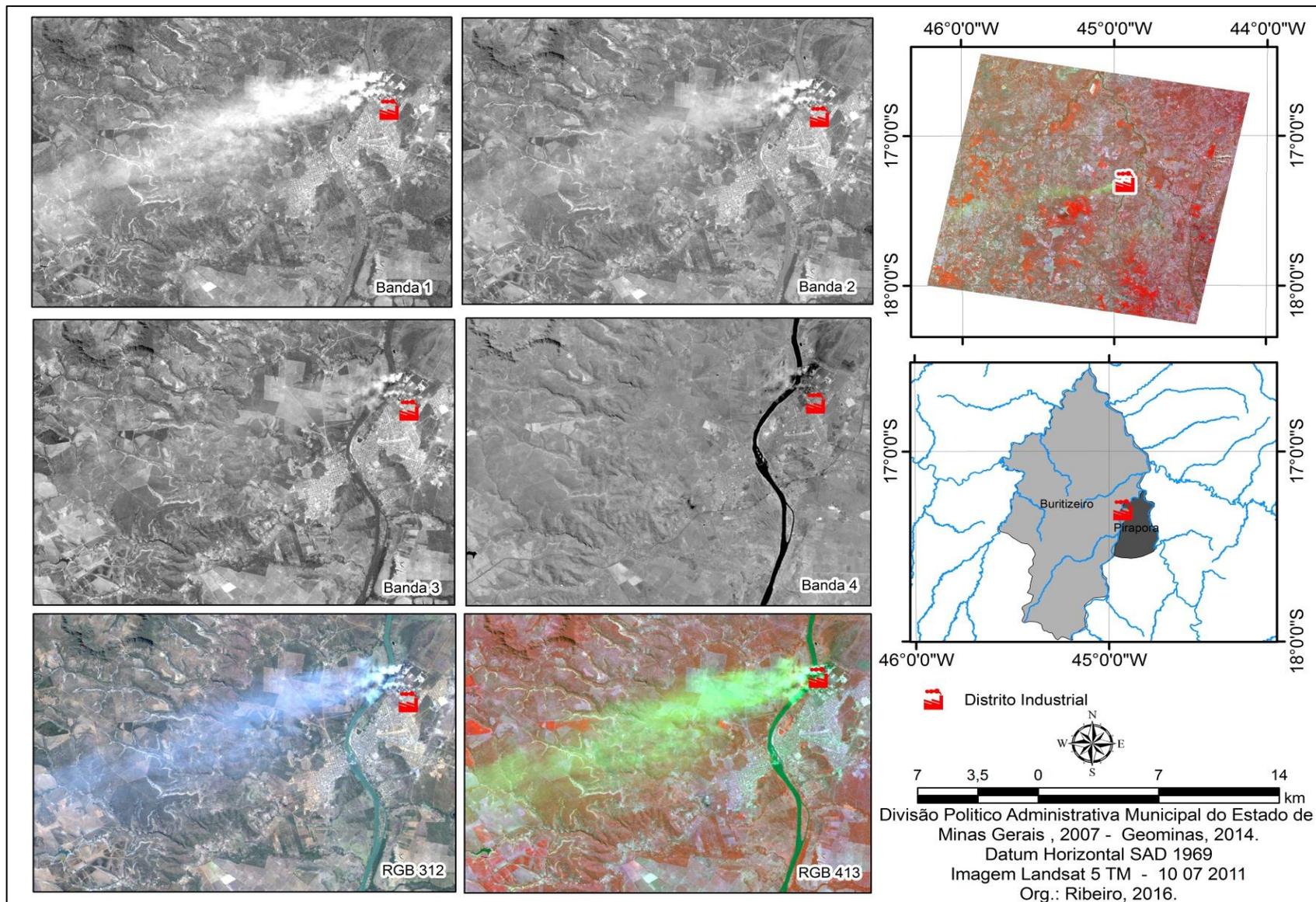


FIGURA 11 - Pluma de particulados nas Bandas 1, 2 3 e 4 em composições coloridas visível (312) e falsa cor (413) - Imagens Landsat 5 TM.

4.1.1. Dados climáticos

Os dados do clima foram obtidos em dados das de duas estações (TAB. 3) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas em Pirapora (uma convencional - OMM:83483 e uma automática - OMM:86759).

TABELA 3 - Estações climatológicas no município de Pirapora

| 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 |

Os dados históricos de precipitação e temperatura foram utilizados para a confecção do climograma. Tendo em vista a necessidade de um maior tempo de monitoramento para a caracterização de aspectos climáticos, optou-se pela estação convencional, cujos dados foram obtidos de 01/01/1961 até 01/01/2014, através do sistema Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para construção do climograma, priorizaram-se os anos com médias completas para todos os meses.

Nos estudos de poluição da atmosfera, a chuva é um elemento importante, uma vez que a precipitação atua na limpeza da atmosfera, pois as partículas integram os núcleos de condensação constituindo-se, dessa forma, num mecanismo de transferência dos poluentes da atmosfera para os compartimentos ambientais da superfície.

No estudo do comportamento dos ventos foram analisados os elementos velocidade e direção. Com as médias mensais estabelecidas, foi construído um gráfico que caracteriza a direção preferencial e velocidade dos ventos nos últimos 53 anos.

Para caracterização da velocidade e direção dos ventos ao longo do ano trabalhou-se com as informações da estação automática A545, disponibilizadas pelo INMET. Esta estação foi instalada em 04/07/2007, sendo que, da série histórica disponível, foram utilizados os dados de 2011, pois esses apresentavam menor número de falhas e que estão correlacionados com a maior extensão mapeada da pluma de particulados.

A rosa dos ventos de velocidade e direção foi elaborada no WRPLOT View Freeware 7.0, software gratuito da Lakes Environmental (<http://www.weblakes.com/products/wrplot/>). A base de dados foi organizada conforme tabela 4 (TAB. 4).

TABELA 4 - Modelo de organização dos dados para entrada no WRPLOT, exemplo para o primeiro dado de 2011.

| Id | Ano | Mês | Dia | Hora | Direção vento | Velocidade do vento | Precipitação |
|------|-----|-----|-----|------|---------------|---------------------|--------------|
| 1111 | 11 | 1 | 1 | 1 | 29 | 1,5 | 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.

4.1.2. *Condicionantes geomorfológicas*

O terreno tem papel importante na orientação do fluxo do vento e na distribuição e deposição da pluma de particulados, por isso dentre os aspectos da superfície, a topografia e morfologia do terreno estão entre os principais.

As unidades geomorfológicas foram caracterizadas com base em trabalhos prévios e levantamentos de campo. Dados SRTM (SE-23-V-D - SE-23-X-C) foram utilizados para a elaboração de um modelo digital de elevação (MDE) e perfis topográficos nos softwares Arcgis 10.1 e Surfer 8.0. Para elaboração do MDE foram processados dados SRTM (86m) e geradas curvas de nível de 10m visando obter uma melhor definição dos contornos.

De posse dos dados, foram identificadas as principais barreiras orográficas e superfícies de deposição do material particulado. Essas informações, associadas ao estudo de direção dos ventos e imagens de satélite, contribuíram para definição do quadrante da área de trabalho em que foram coletadas as amostras e realizado o monitoramento.

4.1.3. *Delimitação da área de estudo: monitoramento e coleta de amostras*

Para delimitação da área de amostragem (FIG. 12), foram considerados os seguintes aspectos: a localização do distrito industrial, o estudo de direção preferencial dos particulados em imagens de satélite, distâncias médias alcançadas pela pluma e as barreiras orográficas locais. A partir desses dados, definiu-se um quadrante que engloba a possível área de deposição dos particulados.

A delimitação da área de monitoramento e amostragem inclui além da área de influencia no espaço urbano, a área de circulação da pluma no espaço rural.

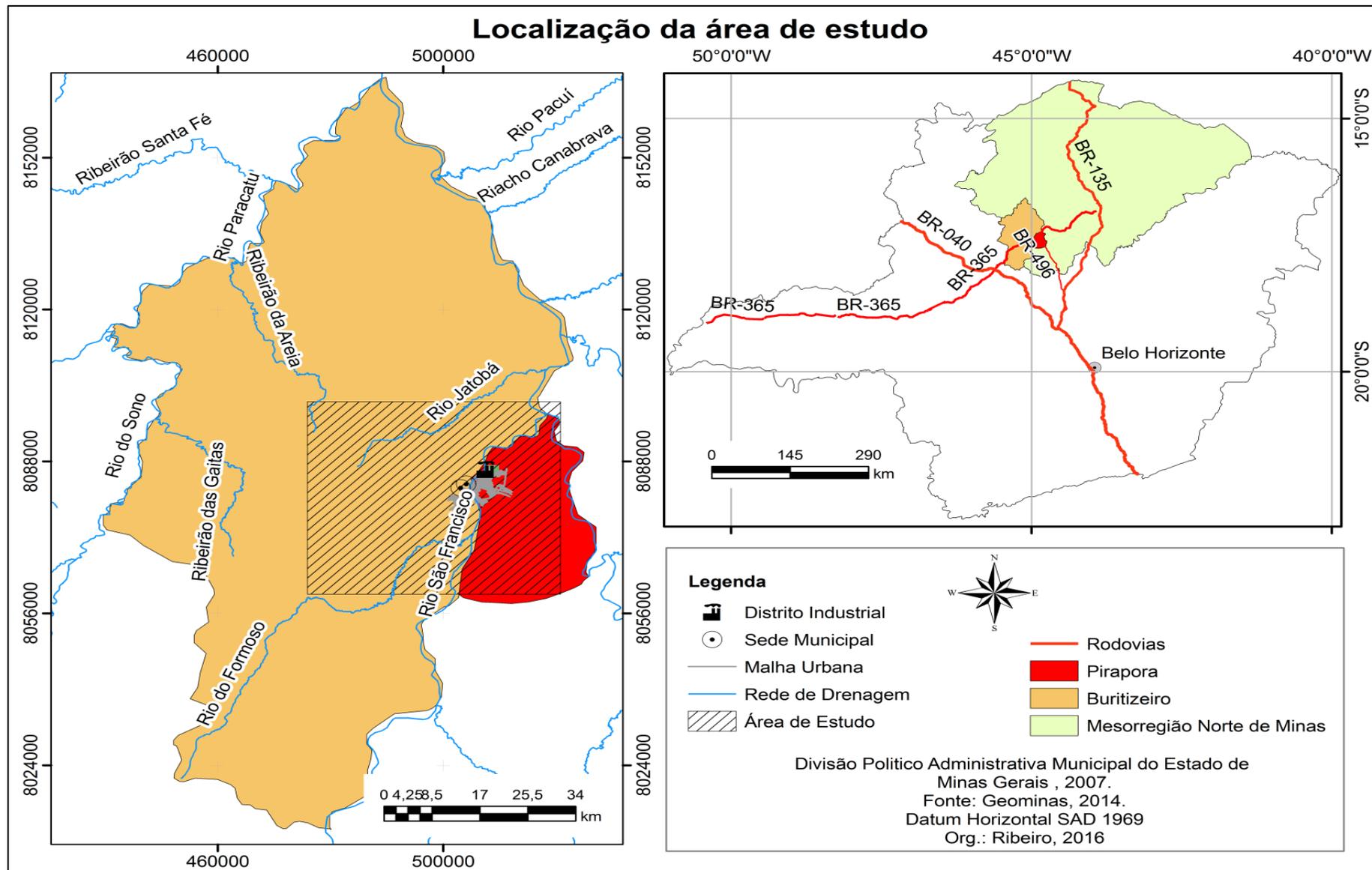


FIGURA 12 - Área de estudo entre os municípios de Pirapora e Buritizeiro. Hachurado indica a área delimitada para monitoramento e coleta de amostras.

4.2. Amostragem material particulado na atmosfera

Para Lenzi (2011), uma das dificuldades de se estudar os particulados da atmosfera é a coleta de amostras. Segundo o autor, vários métodos estão sendo usados pelos pesquisadores ambientais, mas destaca a filtração por bombeamento de um determinado volume de ar e posterior análise do filtro. Segundo ele, esses métodos de coleta, em geral, ocupam certo número de equipamentos e, por isso, é difícil usá-los em monitoramento onde vários pontos de coleta são requeridos.

Uma alternativa, viável economicamente, para a coleta de materiais particulados são os sistemas passivos em que o material se deposita em uma superfície.

Materiais particulados suspensos na atmosfera se decantam espontaneamente devido a força da gravidade. Este princípio pode ser usado para amostrar particulados no ar. Estes podem ser recolhidos em um recipiente limpo e seco. Esta alternativa aos sistemas acima mencionados é o emprego do método das Precipitações Sólidas Atmosféricas (PSA). Onde é recolhido em recipiente apropriado o particulado que espontaneamente se decanta (LENZI, 2011, p. 310).

O autor ressalta que a pequena quantidade de material coletado pode dificultar a análise, além dos resultados não serem expressos em volume ($\mu\text{g m}^{-3}$), o mais usual.

Brait e Anton (2010), em estudo no qual apresentam desenvolvimento e aplicação de sistema passivo de coleta de poluentes atmosféricos para monitoramento de Cd, Cr, Pb, Cu, Fe, Mn, Zn e particulados totais, assinalam alguns pontos sobre sistemas passivos:

- o desenvolvimento de sistemas passivos data de 1973, com o desenvolvimento do primeiro sistema de amostragem passivo para obtenção de dados quantitativos;
- a principal desvantagem é que não permitem alteração na taxa de amostragem e não possuem adequada sensibilidade quando expostos por curto período de tempo;
- devido ao seu modo de operação, a amostragem passiva conduz a uma série de vantagens práticas, incluindo a relação custo/benefício, pouco treinamento necessário para manusear os dispositivos, além de não haver necessidade de fonte de energia para seu funcionamento;
- enquanto a implantação física destes sistemas é bastante simples, a estratégia de amostragem envolvida na escolha do número e tipo de amostradores passivos para implantação, localização, hora e duração da exposição, bem como na quantificação dos poluentes de interesse, exigem uma reflexão cuidadosa;

- o conhecimento da fonte de poluição, quantidades, bem como dos métodos analíticos utilizados para a quantificação são alguns dos importantes fatores necessários para uma correta interpretação de dados.

O estudo efetuado pelos autores mostrou que é possível monitorar os níveis de elementos de interesse presentes na atmosfera, por meio do sistema de coleta passiva de material particulado atmosférico por eles desenvolvido, denominado SISCO (Sistema de Coleta de Poluentes Atmosféricos).

Considerando a aplicabilidade e a comprovada eficiência de sistemas passivos de coleta de material particulado, neste trabalho, o monitoramento foi realizado com esses coletores passivos.

Os coletores (FIG. 13) são formados por uma estrutura de aço (e/ou alumínio) com um suporte onde é colocada uma película adesiva. As películas são compostas de uma base transparente na qual se encontra fixada uma película adesiva dupla face. Em campo, a película é colocada no suporte, retirada a proteção e afixada no coletor.



FIGURA 13 - Amostragem de particulados em campo. Em sequência: posição em campo, coletor e películas adesivas.

Depois de definida a área a ser monitorada, o local para instalação do suporte considerou as condições locais de ressuspensão de partículas do solo (evitar o acúmulo excessivo destes materiais) e a segurança.

Posteriormente, definiu-se o tempo de exposição de um mês. Após o período de 30 dias a película é retirada do suporte e acondicionada em recipientes (modelo placa de petri ou caixa CD - livres de contaminação), nos quais ficam armazenados aguardando as análises laboratoriais.

4.2.1. Monitoramento e pontos de amostragem

O monitoramento foi realizado em dois períodos (FIG. 14). O primeiro durante seis meses em quatro pontos de amostragem no espaço urbano de Pirapora e Buritizeiro (MP01). O segundo, durante um ano, em sete pontos de amostragem, incluindo a área rural de movimentação preferencial da pluma (MP02) nos municípios de Pirapora e Buritizeiro.

Nos pontos (TAB. 5) localizados na área rural foram coletadas cinco amostras de solos, 1 localizada no município de Pirapora e as outras quatro no município de Buritizeiro. Para Rocha (2009, p. 23), se o problema é avaliar a emissão de poluentes por uma indústria, a coleta deve ser, preferencialmente, feita no horário de maior atividade da mesma.

No período do segundo de monitoramento, no espaço urbano e rural, 08/2013 - 08/2014, ocorreram interrupções parciais (diminuição da produção) em todas as indústrias a partir do segundo semestre de 2013 e a paralisação total da produção por algumas indústrias em Janeiro de 2014, situação que permaneceu até o primeiro semestre de 2016.

As paralisações devem -se ao fato do processo de metalurgia do silício demandar um alto consumo de energia e, no contexto da crise energética, tem-se a vantagem econômica da comercialização das cotas de energia pela indústria.

A paralisação dos fornos implica redução na emissão de particulados, fato que foi considerado na interpretação dos dados do segundo monitoramento já que a quantidade de poluentes emitidos foi reduzida significativamente.

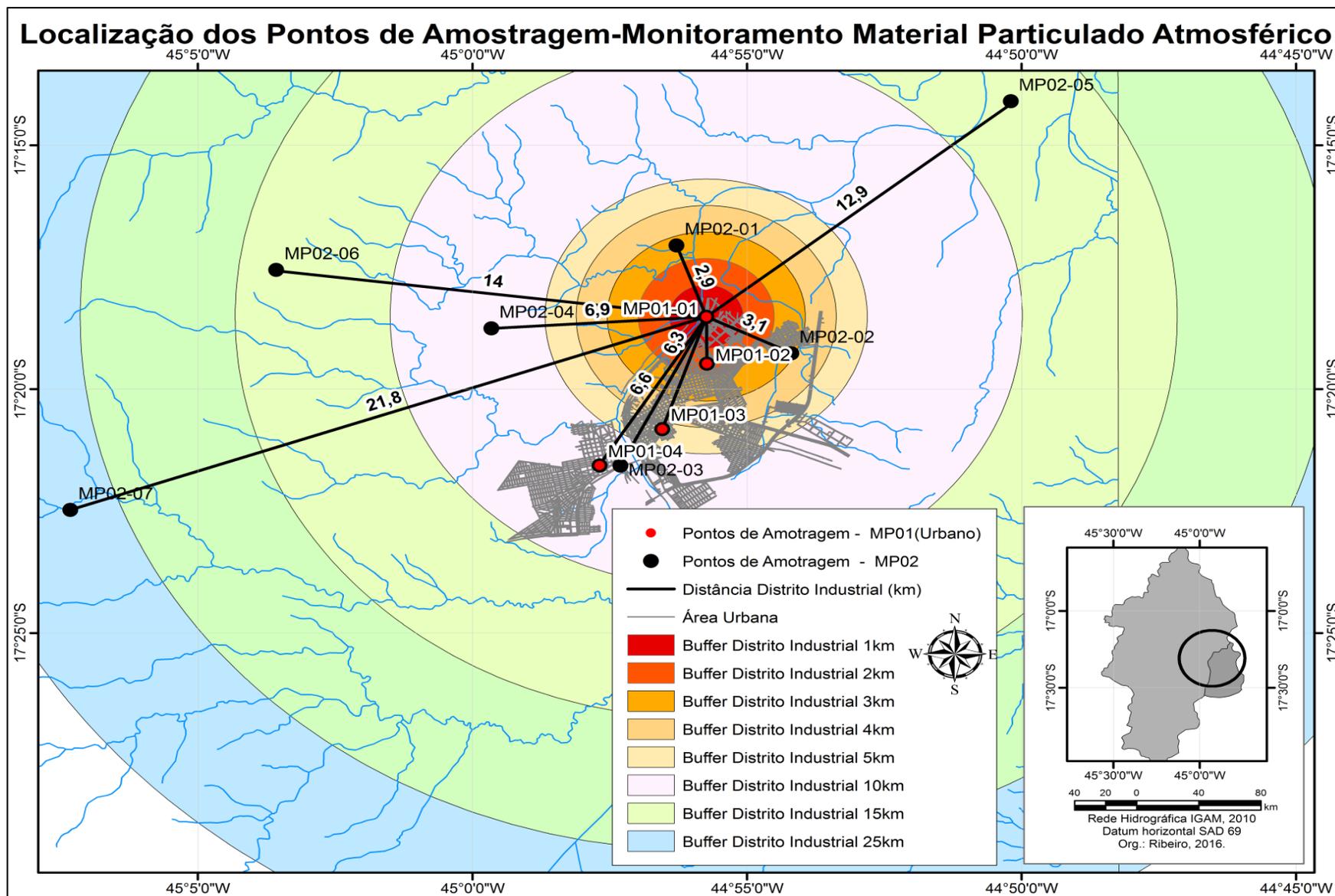


FIGURA 14 - Localização dos pontos amostragem e a distância do distrito industrial (km).

TABELA 5 - Aspectos gerais dos pontos de amostragem

| Ponto | Distância DI (km) | Orientação | Coordenadas (UTM - 23K) | Altitude(m) | Descrição (Uso do Solo) | Município | Classe Solo (FEAM,2010) | Geomorfologia** |
|-----------|----------------------|------------|----------------------------|-------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| MP01 - 01 | - | - | 8086298,418 507548,343 | 487 | Distrito Industrial | Pirapora | Neossolo Flúvico | Depressão Interplanáltica |
| MP01 - 02 | 1,8 | S | 8084527,929 507565,461 | 499 | Urbano | Pirapora | Latossolo Vermelho | Depressão Interplanáltica |
| MP01 - 03 | 4,5 | SSW | 8082054,939 506127,291 | 508 | Urbano | Pirapora | Latossolo Vermelho Amarelo | Depressão Interplanáltica |
| MP01 - 04 | 6,5 | SW | 8080678,81 504103,456 | 513 | Urbano | Buritizeiro | Latossolo Vermelho | Depressão Interplanáltica |
| MP02 - 01 | 2,85 | NNW | 8088998,037 506587,664 | 502 | Rural/Fazenda Martins | Caio Buritizeiro | Latossolo Vermelho Amarelo* | Depressão Interplanáltica |
| MP02 - 02 | 3,1 | SE | 8084917,125 510290,424 | 508 | Urbano | Pirapora | Latossolo Vermelho | Depressão Interplanáltica |
| MP02 - 03 | 6,3 | SW | 8080674,701 504777,602 | 501 | Urbano | Buritizeiro | Latossolo Vermelho | Depressão Interplanáltica |
| MP02 - 04 | 6,9 | W | 8085860,216 500612,482 | 556 | Rural/Agropecuária | Buritizeiro | Latossolo Vermelho Amarelo* | Depressão Interplanáltica |
| MP02 - 05 | 12,9 | NE | 8094443,674 517376,218 | 488 | Rural/Agricultura | Pirapora | Latossolo Vermelho* | Depressão Interplanáltica |
| MP02 - 06 | 14 | WNW | 8088073,323 493675,158 | 714 | Rural/Cerrado | Buritizeiro | Neossolo Quartzarênico* | Superfície Intermediária |
| MP02 - 07 | 21,7 | WSW | 8078996,738 487034,599 | 645 | Rural/Vereda Cerrado | - Buritizeiro | Neossolo Quartzarênico* | Superfície Intermediária |

*Coleta de Amostras de Solo ** Unidades geomorfológicas conforme: BAGGIO, 2002.

4.3. Análises laboratoriais

Os procedimentos metodológicos incluíram análises granulométrica, mineralógica, química, microquímica e morfológica.

4.3.1. Procedimentos para caracterização do material particulado emitido

Duas amostras representativas material particulado emitido pelas indústrias, foram analisadas quanto às características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas. O conhecimento das propriedades físicas e composição química do material emitido é fundamental para a avaliação do potencial de contaminação ambiental, que pode está associado a emissão, assim como para a identificação das partículas de origem Industrial.

As análises granulométricas foram realizadas com o analisador de tamanho de partículas HELOS (Partikelgrößenanalyse - H2387 & QUIXEL - SYMPATEC) em três intervalos de tamanho: 4,5 μm a 875 μm (R^{135}), 0,9 μm a 175 μm (R3), 0,18 μm a 35 μm . Utilizou-se, como dispersante, solução aquosa de Pirofosfato de Sódio ($\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) a temperatura controlada de 25° C. Dois gramas (2g) da amostra foram diluídos em 5ml da solução dispersante adicionada ao recipiente do analisador de volume de 1 litro. A leitura foi realizada depois de dispersão por 60s (ultrassom) e pausa de 5s.

Para caracterização mineralógica, utilizou-se o aparelho difratômetro de fabricação Panalytical, modelo X'Pert³ Powder (Tube: Cu LFF (glass), ADS). A identificação das fases cristalinas (minerais) foi obtida por comparação dos difratogramas de Raios-X das amostras com o banco de dados do ICDD – International Center for Diffraction Data / Joint Committee on Powder Diffraction Standards – JCPDS (Sets 01 – 50; 2000).

As amostras compostas foram homogeneizadas, moídas em Grau de Ágata e prensadas manualmente formando pastilhas para leitura. A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore versão 2.1b.

Para obter a composição química total as amostras foram homogeneizadas e 05 gramas foram misturados a 01 grama de resina WAX (aglomerante) e completada com ácido bórico até o preenchimento das pastilhas. Em seguida as pastilhas foram prensadas em prensa hidráulica e efetuada a leitura no equipamento de Fluorescência X (AXIOS) da Panalytical.

¹³ R = refere-se a curva de tamanho usada para leitura no equipamento.

Utilizou-se a Espectrometria de Massa por Íons Secundários (*TOF-SIMS 5 - Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry*) para análise química do material particulado emitido. Preparou-se 2 seções polidas no laboratório de laminação do CPMTc. Para confecção das seções polidas as amostras foram colocadas em suspensão em resina (Araldite), secas e polidas.

A análise dessas seções polidas foi realizada com objetivo de obter informações químicas (cátions e íons) da superfície e seu mapeamento em imagens químicas de superfície. As imagens químicas foram obtidas com área de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$, $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ e $96 \times 96 \mu\text{m}^2$.

Por fim, a concentração elementar (metais pesados), foi realizada a partir da digestão ácida e determinação usando equipamento ICP-OES (Vista MPX, Varian). As amostras foram preparadas por dois processos de digestão.

O primeiro processo consta em fusão alcalina com Tetraborato de Lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) para a determinação dos elementos Al, Ca, Ba, K, Mg e Si. Uma alíquota de 0,25g de amostra é misturada com 2,5 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ e fundida durante 20 minutos a 1050°C em um cadinho de platina. A pastilha fundida é dissolvida em 100ml de HCl 1:10 e transferida para balão volumétrico de 200 ml.

O segundo processo foi utilizado para os elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Na, Ni, Pb, Zn. Na digestão usa-se uma mistura de Ácido Clorídrico (HCl) e Ácido Nítrico (HNO_3). 1g da amostra é misturado em um Becker de 250 ml, com 30 ml de HCl e 10 ml HNO_3 . A mistura é submetida a aquecimento em chapa a 180°C até redução a 10ml, então são adicionados 50ml de água e esta solução é aquecida até estabilização das reações do material e transferida para balão volumétrico de 100 ml. Depois de resfriada (25°C), a solução é avolumada, filtrada e analisada.

Para a análise do carbono as amostras foram queimadas em fluxo de O_2 a 1350°C , e o CO_2 medido a partir da absorção da radiação infravermelha.

4.3.2. Caracterização química e morfológica do material emitido e das partículas atmosféricas

A Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) foi utilizada para caracterização química e morfológica do material emitido e das partículas atmosféricas. Para análise do material particulado emitido analisou-se a amostra em seção polida coberta com fina camada de carbono. Para as partículas atmosféricas, o mesmo procedimento foi realizado; um recorte

da película adesiva de coleta foi afixado no suporte com fita adesiva de carbono, recoberto com carbono e analisado quanto à morfologia e composição química.

Microanálises utilizando Microsonda Eletrônica também foram realizadas com as amostras do material particulado emitido e partículas atmosféricas. As amostras foram cobertas com camada de carbono e analisada com equipamento modelo CAMECA SX-100 (*Electron probe X-ray microanalyzer* (EPMA) que forneceu a morfologia e composição química.

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizada apenas nas amostras de partículas atmosféricas, para tal amostras foram fixadas em suporte de 12mm (*stubs*) com solução grafita/prata coloidal, secas por 24 horas e, posteriormente, recobertas com uma fina camada de ouro. Com este método obteve-se a morfologia e química (EDX).

4.3.3. *Distribuição espacial do material particulado*

O material particulado foi fotografado em microscópio com aumento ocular de 10x (ZEISS - Leica DMLP) e da objetiva de 2,5 e de 5,0. O maior aumento tem por objetivo capturar melhor as imagens das partículas menores, que, por vezes, não tiveram boa visualização no aumento menor. Para algumas amostras, foi necessário utilizar um aumento de 50x, devido ao tamanho das partículas. De posse dessas imagens foi possível verificar a ocorrência de partículas de origem industrial.

As imagens foram também utilizadas na quantificação das partículas nas quais foram realizados testes utilizando o software Quantikov. Para tanto, foram utilizados os parâmetros área, comprimento, diâmetro, perímetro, e número total de objetos.

Para esta etapa foram escolhidos três pontos de amostragem na parte urbana. O primeiro corresponde ao distrito Industrial (0km), o segundo representa o espaço urbano de Pirapora(4,5 km) e o terceiro localizado na cidade de Buritizeiro (6,6km).

Criado com o objetivo de facilitar a análise e o processo de quantificação de micropartículas (como partículas e poros), a partir de imagens digitalizadas ou câmeras de vídeo (PINTO, 1996), o programa Quantikov tem compatibilidade com o Windows e está disponível para uso de forma gratuita.

O programa inclui módulos de processamento digital de imagens, quantificação de parâmetros geométricos, morfologia matemática e geração automática de gráficos e tabelas. (CAMPELLO, 2006. p. 94).

O programa utiliza medidas diferenciais, que anteriormente à introdução de microcomputadores eram trabalhosas de serem utilizadas manualmente, tornando o processo de estatística e verificação de imagens consideravelmente mais prático e acurado (PINTO, 1996).

O Quantikov classifica e diferencia os diversos elementos em cada imagem de acordo com seus tons de cinza, sob um fundo normalmente branco ou esbranquiçado. De forma a padronizar o trabalho, foi escolhido um "tom de cinza de corte", em que somente os elementos abaixo desse tom sejam diferenciados do "fundo". Foi escolhido o corte de cinza em 130, pois depois de exaustivos testes, demonstrou os melhores resultados na individualização de partículas em contraste com a matriz. A partir das fotos das películas escolheu-se uma foto que possuía a distribuição mais uniforme e que não apresentava ruídos que pudessem atrapalhar a análise.

Feita a binarização (corte no tom desejado), todas as partículas escuras da imagem foram selecionados e analisadas quanto a área, o diâmetro, o comprimento e o perímetro. Foi também realizada uma comparação entre a quantidade total de partículas em cada imagem, nos dois aumentos (2,5X e 5,0X).

Quanto à escala, tendo em vista o objetivo de comparação entre os pontos, utilizou-se a escala padrão do programa (micrômetro). Para cada uma das fotos trabalhadas, foi obtido um histograma mostrando a quantidade de partículas que estavam distribuídas para cada tom de cinza (FIG. 15).

Os dados do histograma foram colocados em uma planilha e realizadas as análises estatísticas. As análises estatísticas bem como os gráficos *Box Plots* foram feitos usando o programa estatístico *Statistica* versão 7.1 for Windows (Stat Soft Inc. 2006). Foram realizados testes de correlação ANOVA e Análise de Componente Principal (PCA).

A análise de PCA é, dentre as técnicas de ordenação, uma das mais difundidas, pois permite a estruturação de um conjunto de dados multivariados cuja distribuição probabilística não precisa ser conhecida (JOLLIFFE 1986, PLA 1986). Segundo Valentin (1995), a ordenação é um conjunto de técnicas pelas quais variáveis ou amostras são posicionadas em relação a um ou mais eixos, de tal maneira que suas posições proporcionem o máximo de informação sobre semelhanças. Em suma, o princípio de ordenação consiste em simplificar, condensar e representar sistematicamente vastos conjuntos de dados, na esperança que as inter-relações ecológicas se tornem mais claras (VALENTIN 1995). Portanto, a análise de PCA possibilita conhecer a relação entre os pontos de amostragem com base nos parâmetros avaliados.

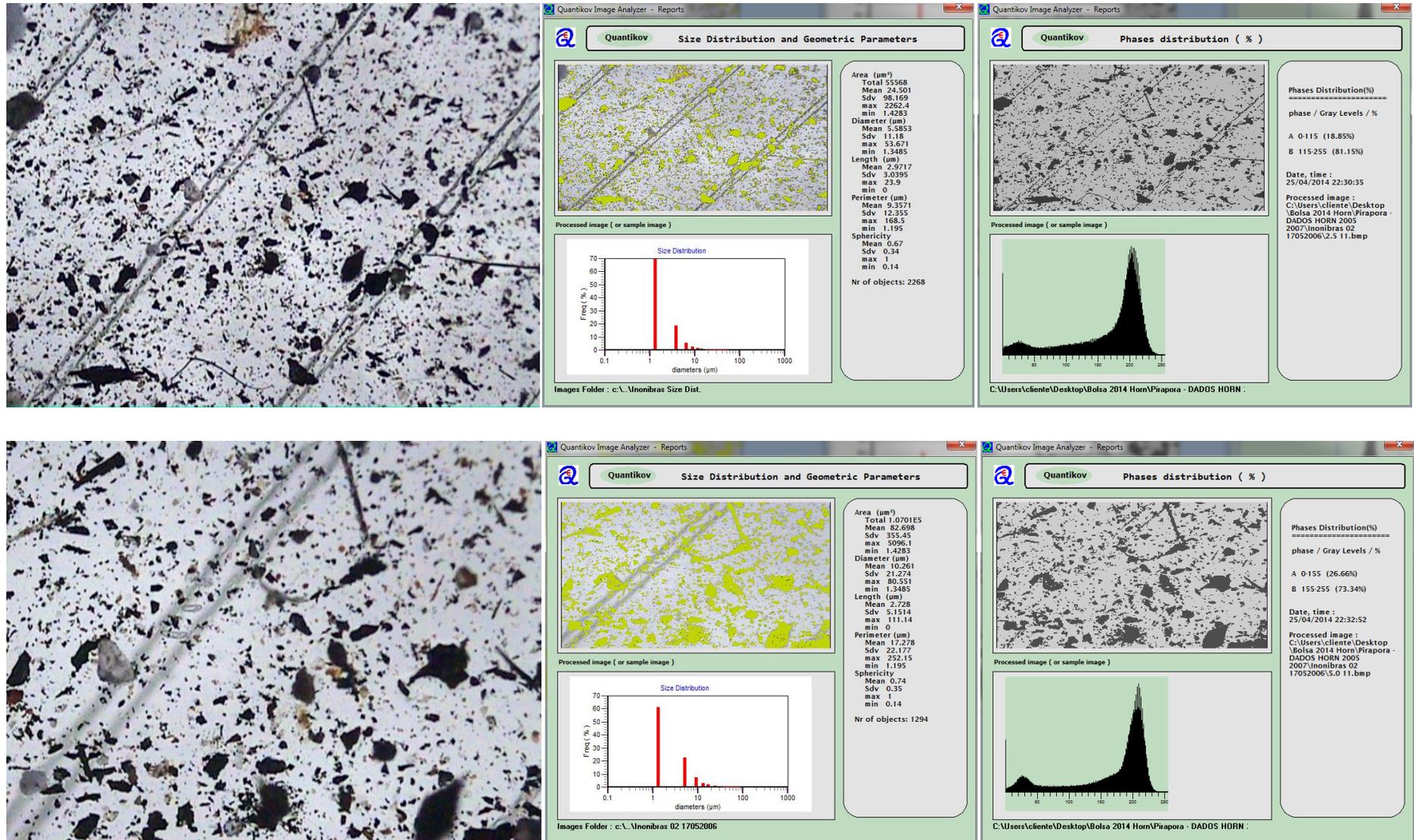


FIGURA 15 - Fotografias das partículas e o output do programa Quantik com os histogramas de distribuição dos tamanhos (Parâmetros geométricos) e distribuição de fases.

Para caracterização da forma e tamanho das partículas, foram tiradas fotomicrografias em microscópio digital (KEYENCE VH-Z20R RZ 20x-200x), que possibilitaram a obtenção de imagens em três dimensões 3D em aumento de até 200x.

4.3.4. Concentrações de metais pesados no solo

Dentre os compartimentos ambientais foram analisadas amostras de solos. Definiu-se como pontos de amostragem aqueles onde foram realizados o monitoramento dos particulados. Os pontos localizados na área urbana foram descartados devido à pavimentação, cobertura por entulhos, pilhas de estéril e lixo que dificultava a coleta e comprometeria a avaliação ambiental já que a coleta foi realizada na camada superficial do solo.

A coleta das amostras de solo (FIG. 16) foram realizadas em três classes de solos: Latossolo Vermelho Amarelo (MP02-01 e MP02-04); Latossolo Vermelho (MP02-05) e Neossolo Quartzarênico (MP02-06 e MP02-07).

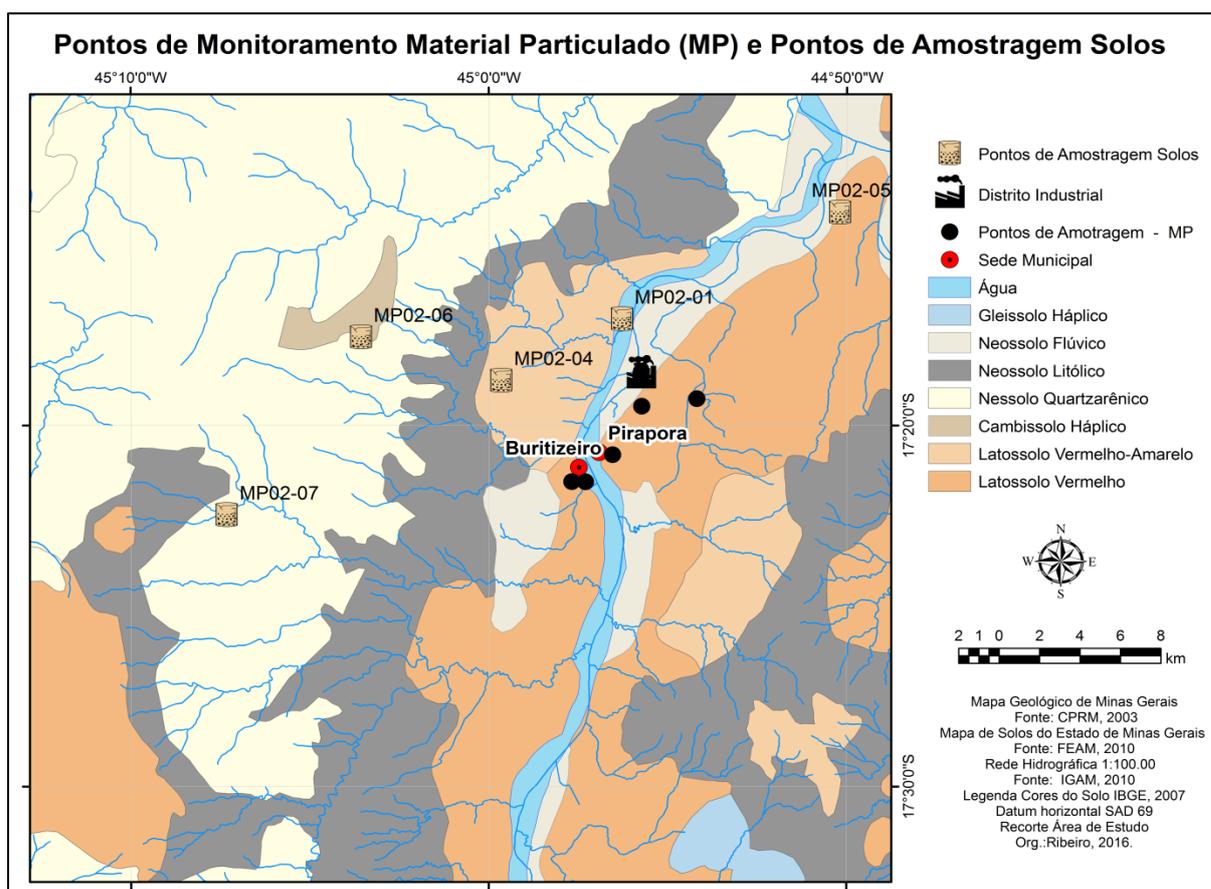


FIGURA 16 - Pontos de coleta de amostras de solos e classes de solos correspondentes.

As amostras de solos (compostas) foram coletadas utilizando o método descrito no Manual¹⁴ de Coleta de Solos para Valores de Referência de Qualidade no Estado de Minas Gerais desenvolvido pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) (ABRAHÃO e MARQUES, 2013).

Foram abertas 5 minitrincheiras (FIG. 17) uma central e as outras 4 na direção dos pontos cardeais (N, S, L, O). As amostras foram coletadas na camada superficial, até 20 cm de profundidade.



FIGURA 17 - Minitrincheira aberta para coleta do solo.

Após a coleta as amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e encaminhadas para análise em laboratório. A análise textural foi realizada utilizando o método da pipeta no laboratório de solos do IFMG- Campus Bambuí.

Para obter as concentrações de metais pesados 0,5g de amostra (< 0,0063mm) foram digeridas (10ml HNO₃ 65%) em micro-ondas utilizando o método EPA - 3051. Depois de digeridas as amostras foram avolumadas (balão 50ml) e encaminhadas para leitura via ICP-OES.

Os resultados das análises de solos foram avaliados considerando a variação das concentrações de metais de acordo com a distância da fonte de poluição e também

14

Conferir:http://www.feam.br/images/stories/solo/manual_coleta_solos_para_vrqs_projeto_solos_de_minas_feam.pdf

comparados com os valores de referência de Qualidade dos solos estabelecidos pela Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011.

4.4. Mapas

Os mapas foram elaborados no software arcgis 10.1. As bases de dados do IGAM, FEAM e CPRM juntamente com dados de levantamento direto foram usados na confecção dos mapas de caracterização da área e pontos amostragem.

Para elaboração do mapa de qualidade ambiental foi utilizada a ferramenta Krigagem em duas bases de dados: as concentrações de metais pesados nos solos para o espaço rural e as informações de direção da pluma e área total das partículas para o espaço urbano. As concentrações dos metais foram usadas como uma única informação, produto da somatória dos valores em cada ponto. Os dados das partículas foram obtidos no software Quantikov. Para funcionamento da ferramenta os pontos para os quais as informações não estavam disponíveis foram preenchidos com valor zero. Assim, os mapas mostram a variação dos metais e das partículas nos ambientes rural e urbano.

5. COMPORTAMENTO DO VENTO E ASPECTOS GEOMÓRFICOS QUE CONDICIONAM A MOVIMENTAÇÃO DA PLUMA DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE PIRAPORA - MG¹⁵

A degradação da qualidade do ar se apresenta 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 para a atmosfera.

O vento é o mecanismo de transporte dos compostos na atmosfera. Considerado meio de dispersão de poluentes, dependendo da magnitude da velocidade e da variação da direção, é um dos condicionantes meteorológicos determinante no estudo da poluição (BOUÇAS, 2009 p.21; ALVES, 2013 p. 32). O entendimento do deslocamento horizontal dos poluentes na atmosfera fornece informações fundamentais sobre a dimensão da área de impacto desses poluentes.

Os dados meteorológicos históricos de Pirapora demonstram a direção predominante de ventos de Nordeste (NE) (31,70% do dados), definindo um eixo de deslocamento principal Nordeste - Sudoeste (NE-SW). Ventos de Sul (S) e Sudoeste (SW) também são bastante significativos, correspondendo, respectivamente a, 14,31 e 7,98%.

A classe de velocidade (FIG. 18) predominante nos últimos 53 anos varia entre 1 - 1,99m/s (70,14%), seguida pela classe entre 2- 2,99 (26,99%). Testes de correlação mostram que essas duas classes de velocidades relacionam-se, positivamente, com a direção preferencial dos ventos de NE. A associação entre a direção preferencial dos ventos e as maiores velocidades indicam um maior potencial de dispersão dos poluentes.

Neste contexto, 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 nesta direção.

Guardadas as variações, a porção SW apresenta-se como a área de maior potencial de circulação, deposição e acúmulo do material particulado. Isto se deve a maior frequência de ocorrência dos ventos de NE. Cooper e Alley (2011, p. 614) destacam que os princípios meteorológicos e o conhecimento dos padrões de circulação em macro e micro escala são os principais fatores no efetivo controle da poluição do ar e a rosa dos ventos traz uma boa estimativa dos padrões locais de dispersão dos particulados. Os autores também chamam

¹⁵ Resultados iniciais em texto de artigo submetido a revista Geographias (UFF).

atenção para a topografia como um dos importantes fatores que afetam a circulação na superfície.

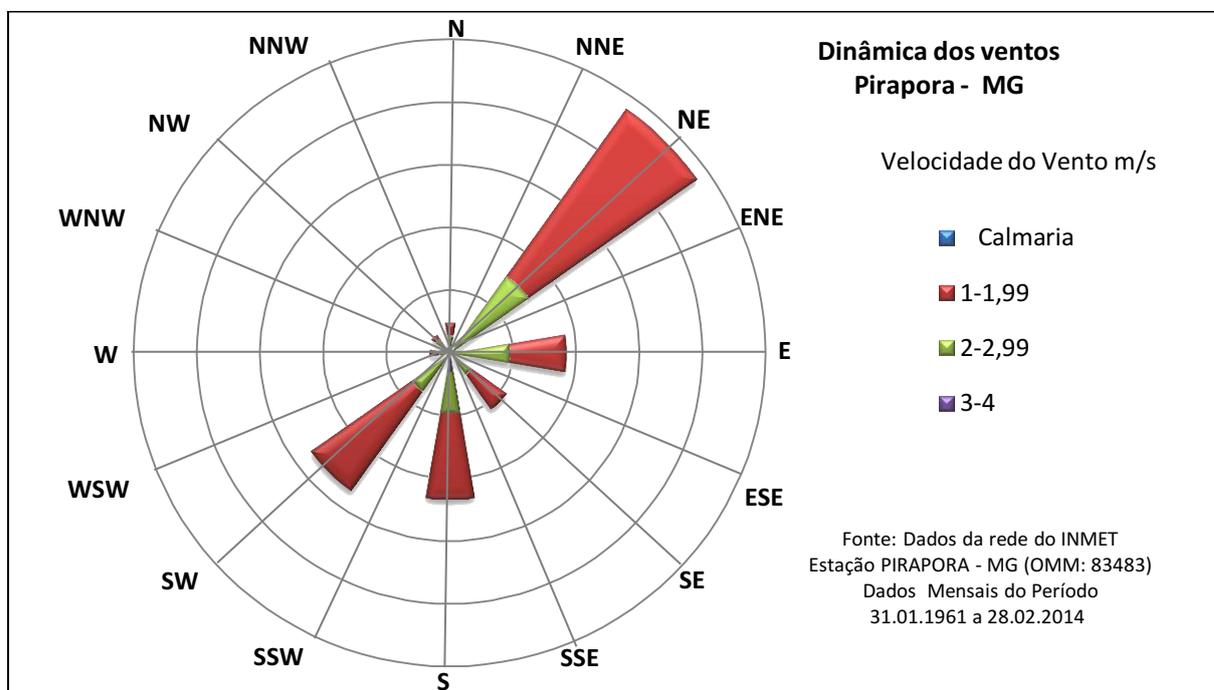


FIGURA 18 - Rosa dos ventos. Observar a direção preferencial dos ventos de NE, SW e S. Rosa dos ventos obtida com os dados médios mensais, no período de 01 de Janeiro de 1961 e 28 de Fevereiro de 2014, da estação convencional de Pirapora.

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 guiam a dispersão de poluentes e a sua deposição no solo, uma vez que estão imersos na atmosfera.

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

Em Pirapora, o estudo da dispersão da pluma nas 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 do vetor de fluxo dos ventos de NE.

A direção da pluma (FIG. 19) 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 para 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).

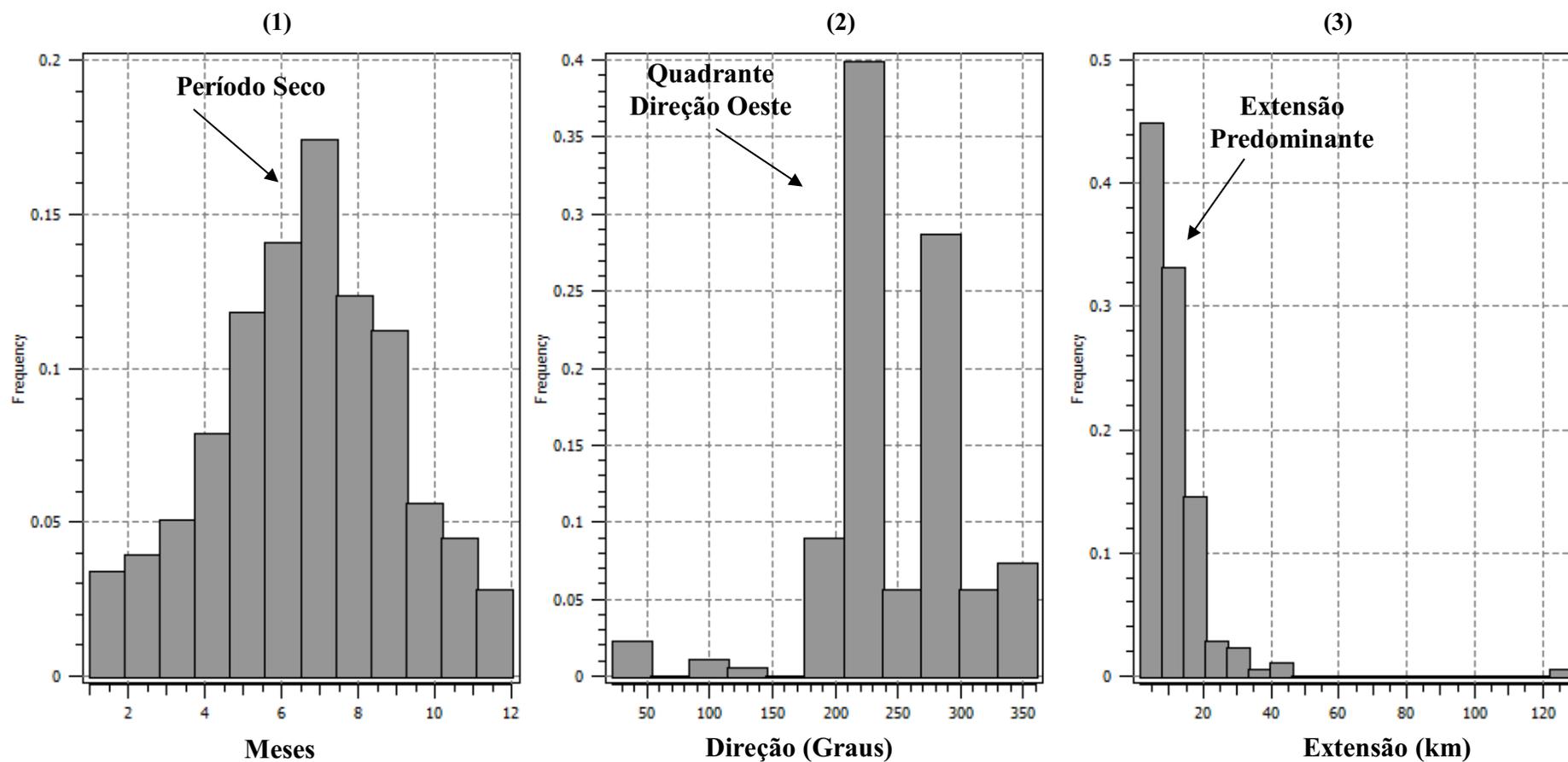


FIGURA 19 - Distribuição de frequências mostrando as (1) imagens analisadas por mês, (2) a direção da pluma em graus e (3) a extensão da pluma em km. Análise estatística realizada no software The Stanford Geostatistical Software (SGeMS) disponível em <http://sgems.sourceforge.net/?q=node/77>.

A maior frequência observada no histograma de direção 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 analisando a pluma de maior extensão/densidade¹⁶, a média foi de 24,85 km. Perfis de 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 essa variação da abrangência da pluma, maior frequência até 20km e ocorrências entre 20 e 45km. Isolado a direita do mesmo gráfico tem-se a maior distância mapeada.

Como a literatura mostra que 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 para entender a extensão máxima alcançada pela pluma em 2011, analisou-se os dados climáticos para o referido ano.

5.1. Variação anual dos vento e movimentação da pluma em longa distância

O comportamento do vento em 2011 (FIG. 20) foi sintetizado no estudo de velocidade e direção por meio da rosa dos ventos, elaborado no WRPLOT View 7.0. Sua composição total revela um padrão bem definido dos ventos de Leste (E).

As rosas dos ventos (FIG. 20) mostram o comportamento médio da direção e intensidade do vento em 2011. A direção visualizada em (A) refere-se à sua origem, conforme coloca Gomes (2010, p.69) "a direção do vento é sempre de onde este sopra e a poluição transportada se desloca para o quadrante oposto". Assim, em (B) tem-se uma projeção do vetor de fluxo desse vento, mostrando o escoamento (e o dos poluentes) preferencial do vento para o quadrante W.

¹⁶ Considerou-se maior densidade da pluma quando alcançada distância superior a 15km da fonte.

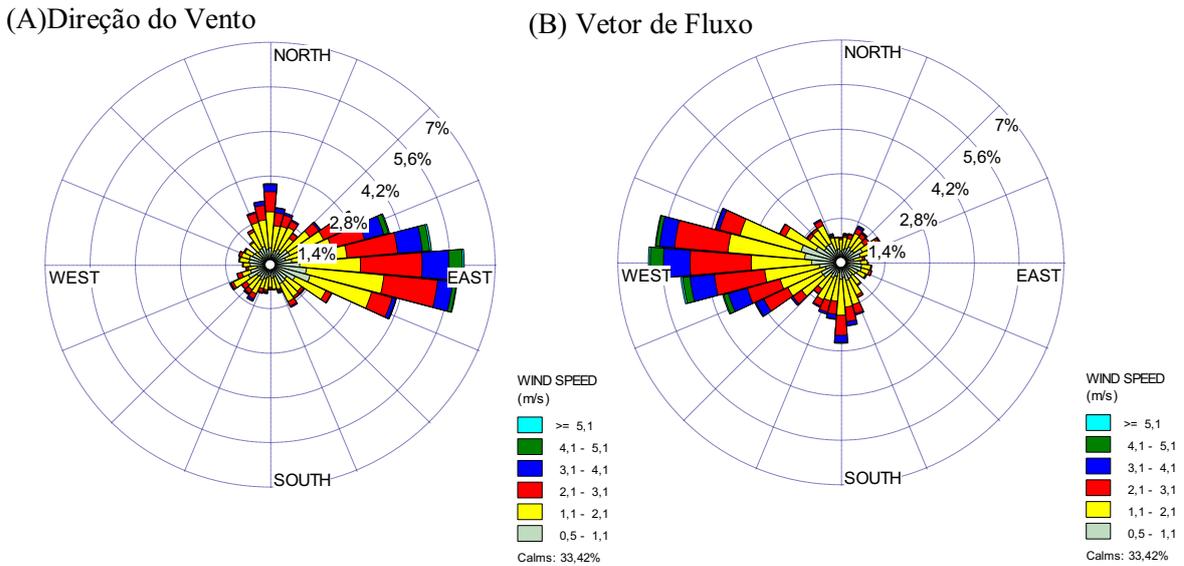


FIGURA 20 - Direção e velocidade do vento em 2011.

A velocidade média anual de 1,08m/s mostra que a movimentação da pluma é mais frequente na zona de entorno da fonte. Verifica-se a alta frequência de calmaria, em 33,4% dos dados (FIG. 21) que condiciona um baixo potencial de dispersão e transporte dos poluentes na área.

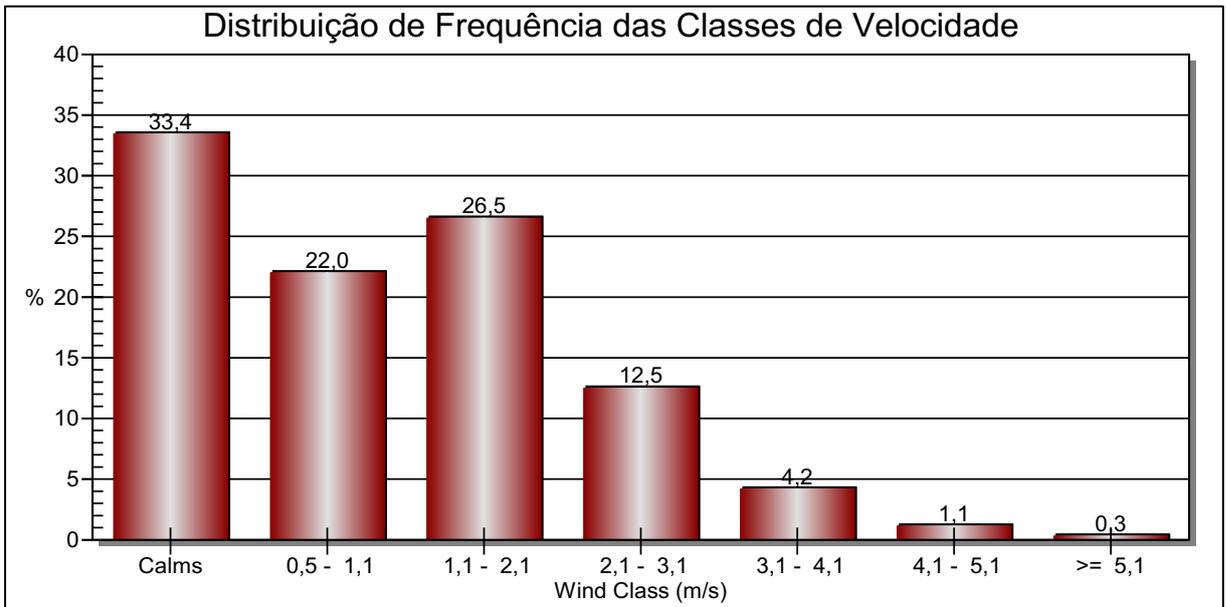


FIGURA 21 - Velocidade do vento em 2011.

De Nevers (2000, p.106) ressalta que "a maioria dos serviços meteorológicos registram qualquer vento menor que 1 m/s como calmaria, devido a dificuldade de medição de

velocidades tão baixas pelos instrumentos". Para Albuquerque (2010, p. 110), a calmaria é definida por velocidades abaixo de 0,5 m/s. Neste trabalho, considerou-se a definição colocada por esta autora, devido à sua maior utilização nos estudos nacionais.

A intensidade de maior frequência 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%).

Os ventos de Nordeste indicados pela série histórica dos dados mensais e os de Leste obtidos com análise dos dados horários do ano de 2011 (FIG. 22) mostraram um padrão claro da direção dos ventos. Estes resultados explicam a maior parte da movimentação da pluma no período analisado. No entanto, nas imagens foram observados padrões de circulação secundários bastante característicos e visando entender a variação da movimentação da pluma ao longo do ano realizou-se a análise da variação mensal dos ventos para o ano de 2011.

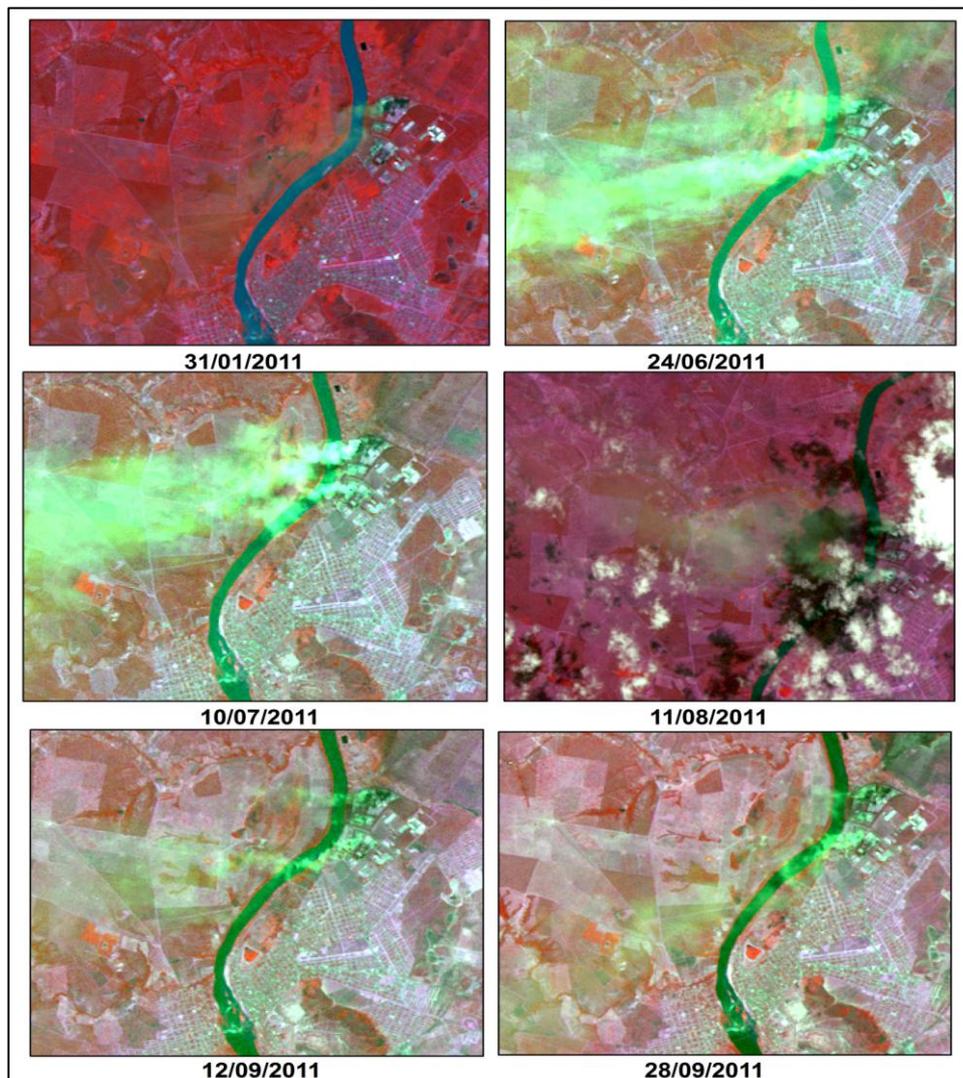


FIGURA 22 - Variação da dispersão e direção de movimentação das emissões industriais em 2011. Escala de visualização 1:100.000. Visualizar padrão de circulação da pluma. Observar a presença de nuvens na imagem do dia 11/08/2011.

A variação dos ventos ao longo do ano (FIG. 23 e 24) implica em diferentes padrões de dispersão dos particulados atmosféricos e áreas distintas de deposição.

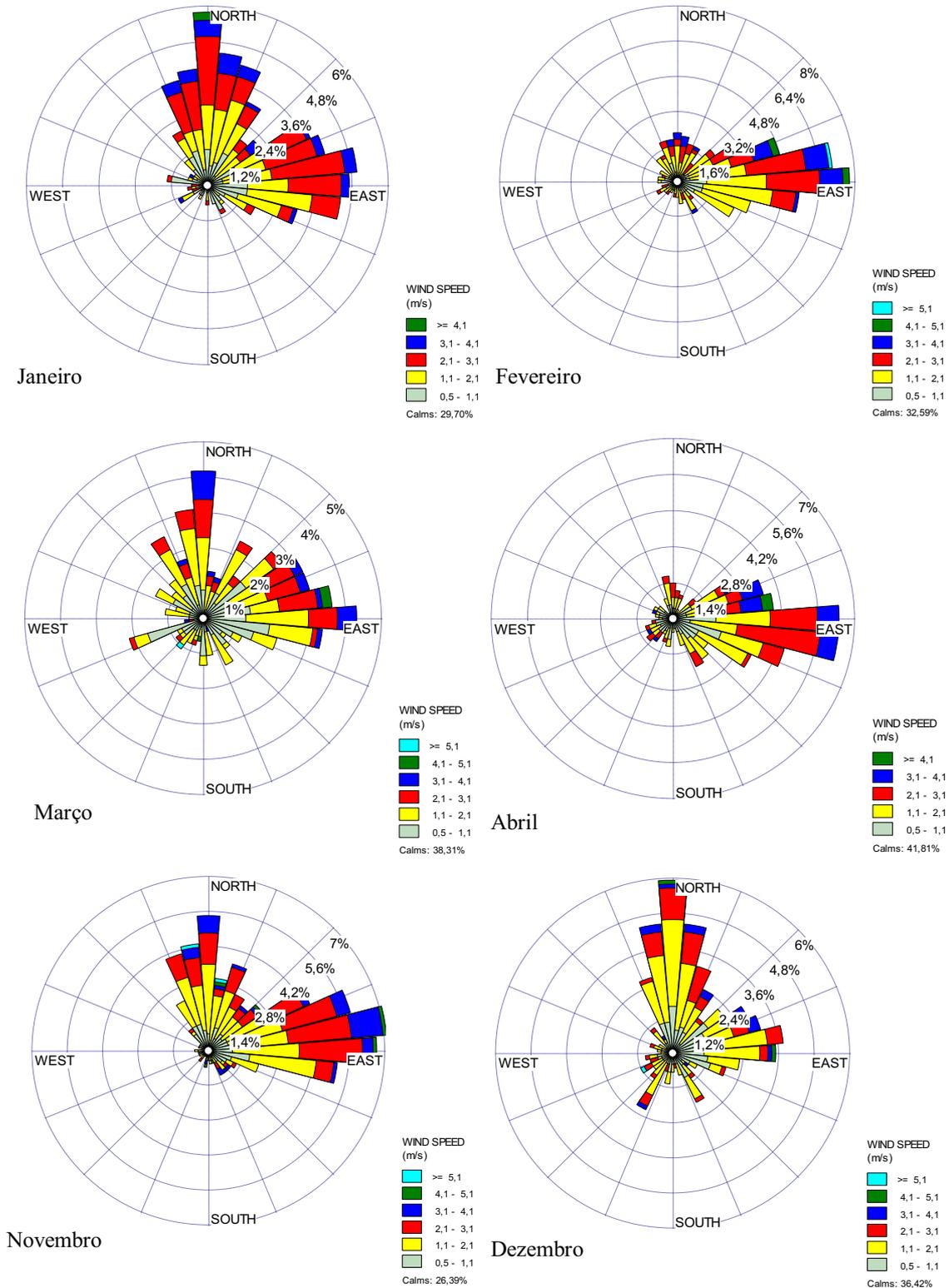


FIGURA 23 - Evolução da velocidade e direção dos ventos em 2011.

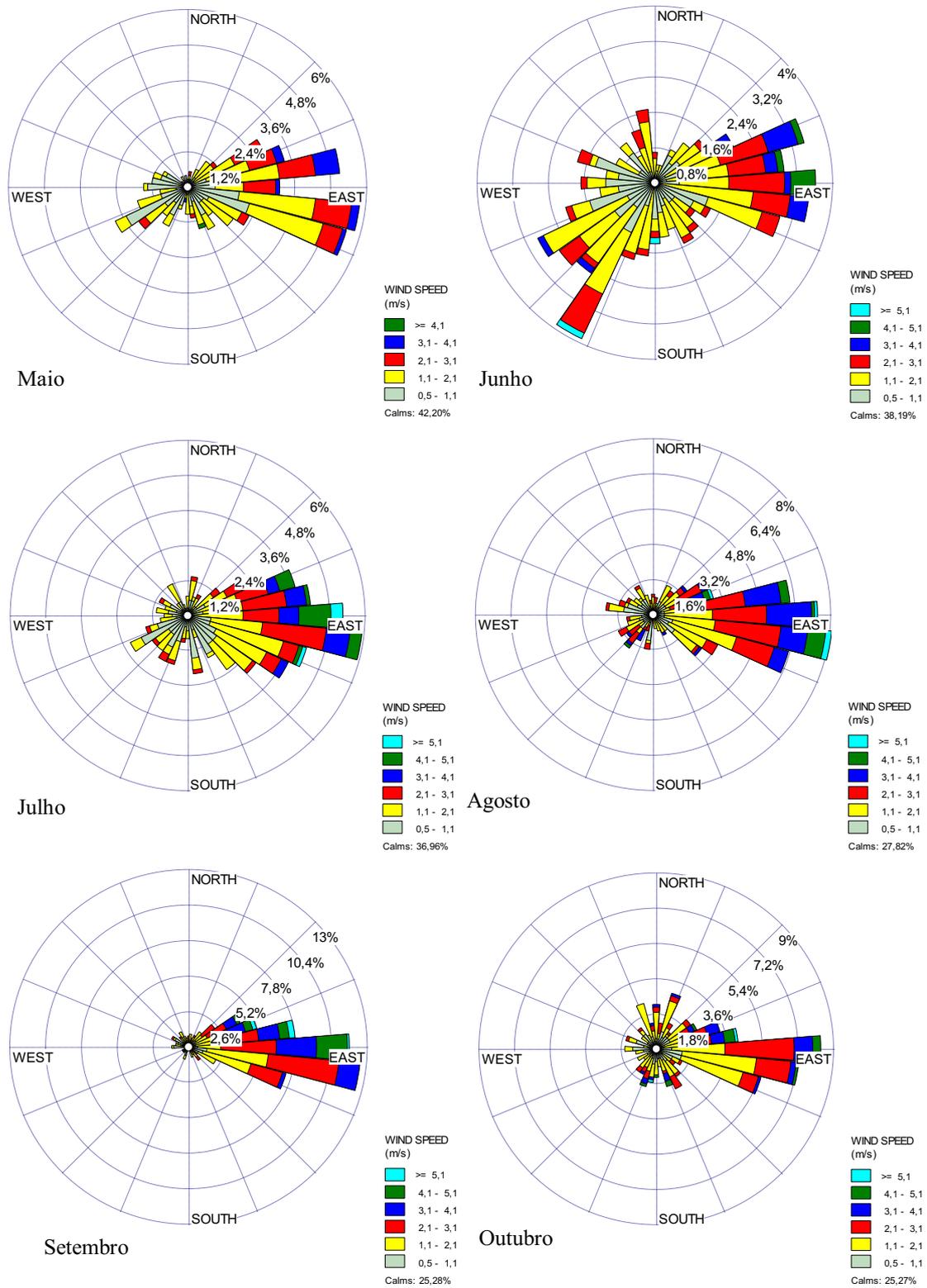


FIGURA 24 - Velocidade e Direção dos ventos em 2011.

Os ventos entre os meses de novembro e março fluem, principalmente, de leste e norte (FIG. 23) e definem um vetor de dispersão para S e SW, contribuindo para a circulação da pluma nestes quadrantes. Estes ventos de N são mais expressivos nos meses de dezembro e janeiro, período no qual superam aqueles de direção L.

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

No período entre maio e outubro (FIG. 24), predominam os ventos de leste, sendo este período de clima seco e frio que caracteriza a direção preferencial dos ventos na área de estudo.

O padrão claro de dispersão para oeste, condicionado pelos ventos de leste entre julho e outubro, chama atenção 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.

No mês de julho, em que se constata uma alta porcentagem dos ventos de leste e maiores velocidades ($>5,1\text{ m/s}$), observou-se a maior distância alcançada (FIG. 24) pela pluma condicionada por este padrão de velocidade descrito.

Assim, pode-se inferir que a maior intensidade do vento possibilitou uma maior dispersão (transporte) dos poluentes expandindo o efeito da poluição à escala regional (50 a 500 km segundo Vallero, 2008 p. 77) e, conseqüentemente, aumentando a área de potencial impacto.

Em junho (FIG. 25), verifica-se que existe uma mudança na dispersão da pluma indicando que a direção do vento apresenta uma tendência diferente. Essa variação é mostrada pelo vetor de sudoeste na rosa dos ventos condicionando a dispersão da pluma para Norte.

Diante do exposto, está claro o controle exercido pelos fatores meteorológicos (ventos) no deslocamento da pluma para direção oeste e sudoeste. Portanto, mudanças na direção do vento ao longo do ano refletem no comportamento da pluma ocasionando padrões secundários de dispersão para norte e sul.

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, constituiu-se na mais frequente área receptora do material particulado.

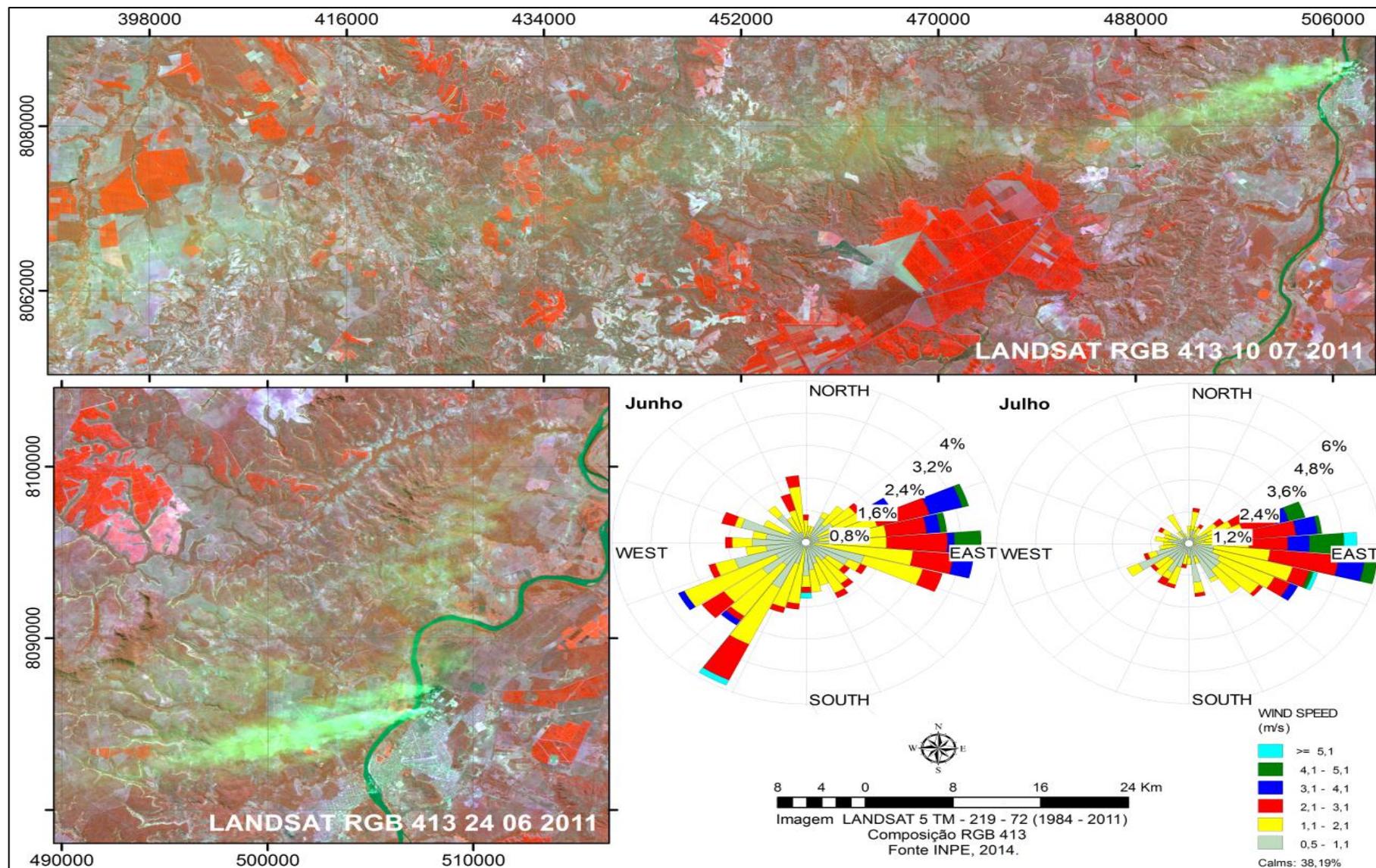


FIGURA 25 - Direção do vento e movimentação da pluma. (1) Concentração dos ventos de leste e altas velocidades em julho (> 5,1 m/s) condicionando o perfil da pluma maior que 100km. (2) Vetor de ventos de sudoeste e dispersão secundária da pluma para norte em junho.

A direção preferencial da pluma obtida a partir da análise das imagens de satélite apresentou relação 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 esse condicionamento da circulação da pluma, tanto pela direção preferencial do vento quanto pela intensidade do mesmo.

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

A movimentação vertical e horizontal da pluma dificulta a obtenção de fotos, 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). Ainda na década de 1970, Torsani e Viswanadham (1982) afirmavam que "as técnicas de sensoriamento remoto tem 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 ampliou 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 INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) 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 computacionais de dispersão, as imagens de satélite podem ser um instrumento no estudo da dispersão de plumas de poluição atmosférica.

5.2. Controle geomorfológico

O relevo pode interferir no deslocamento da pluma influenciando na movimentação e deposição desses poluentes. Essa interferência está relacionada à circulação da atmosfera na

superfície, onde feições morfológicas podem atuar como barreiras (corredores) por meio da força de fricção.

As unidades do relevo na região são caracterizadas por três compartimentos principais; a superfície de cimeira ou Tabular 900m (I), intermediária 700m (II) e o piso da depressão (Depressão Interplanáltica) 470m (III) (VALADÃO, 1998; BAGGIO, 2002; MELO, 2008). 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.

Do ponto de vista geomorfológico, destaca-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 do Alemães) a norte (FIG. 26).

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, respectivamente.

A partir deste contexto geomorfológico e do comportamento da pluma de particulados observado nas imagens, foram identificados dois corredores geomorfológicos (FIG. 27). O primeiro, de eixo preferencial NE-SW, onde ocorre a circulação de 45,4% do fluxo com direção preferencial 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 a movimentação dos particulados a oeste alcançando as distâncias máximas (FIG. 28).

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

Para Cheremisinoff (2002, 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. Segundo Medeiros (2003, p.48), o processo de dispersão dos poluentes na atmosfera depende principalmente do relevo da região, das condições meteorológicas, da topografia e das características das fontes emissoras.

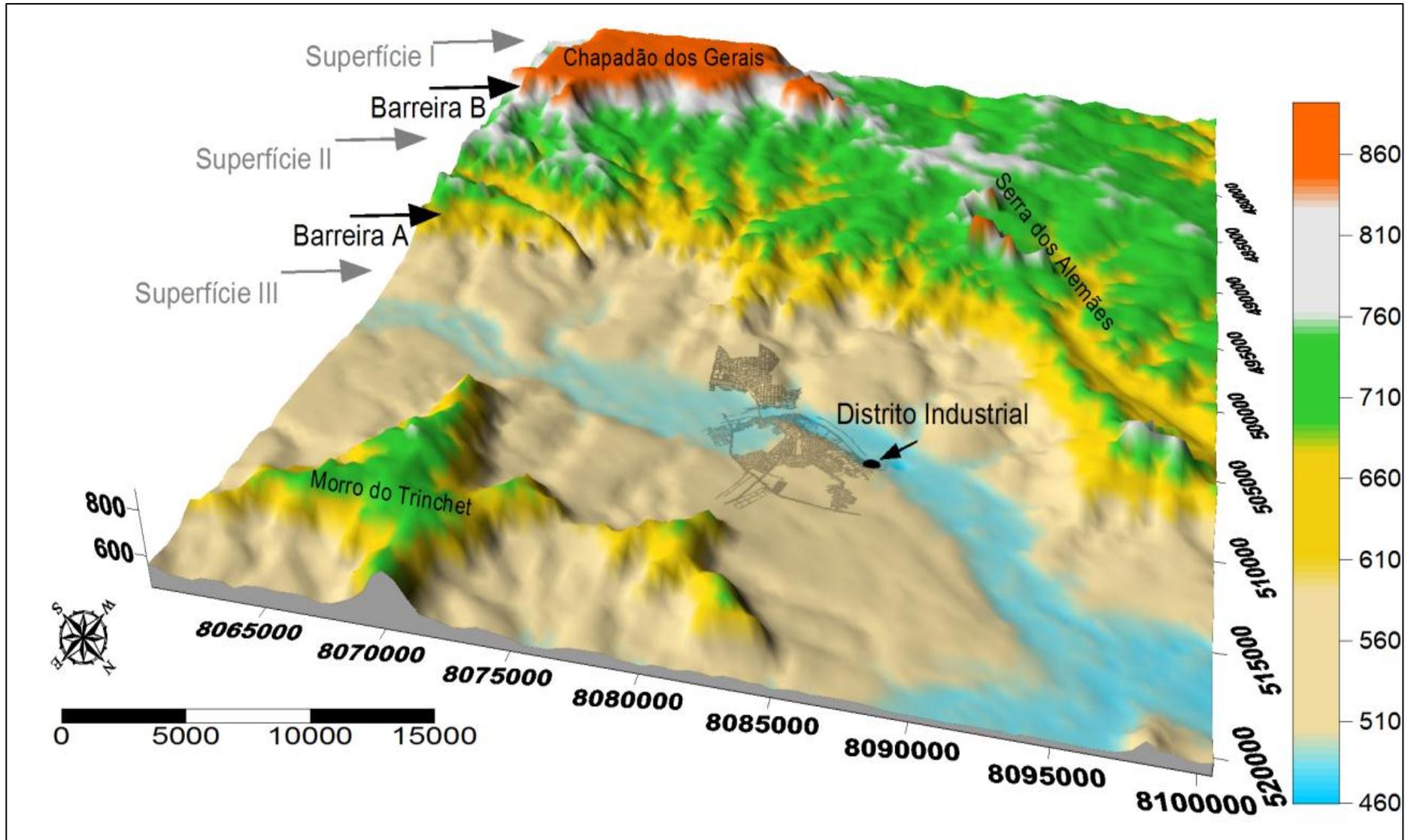


FIGURA 26 - Modelo Digital de Elevação. Feições geomorfológicas e barreiras orográficas (amarelo e cinza). Em laranja, a superfície tabular, em verde a superfície II (Intermediária) e em bege a área o piso da depressão (Superfície III). Em azul, planície de inundação do Rio São Francisco.

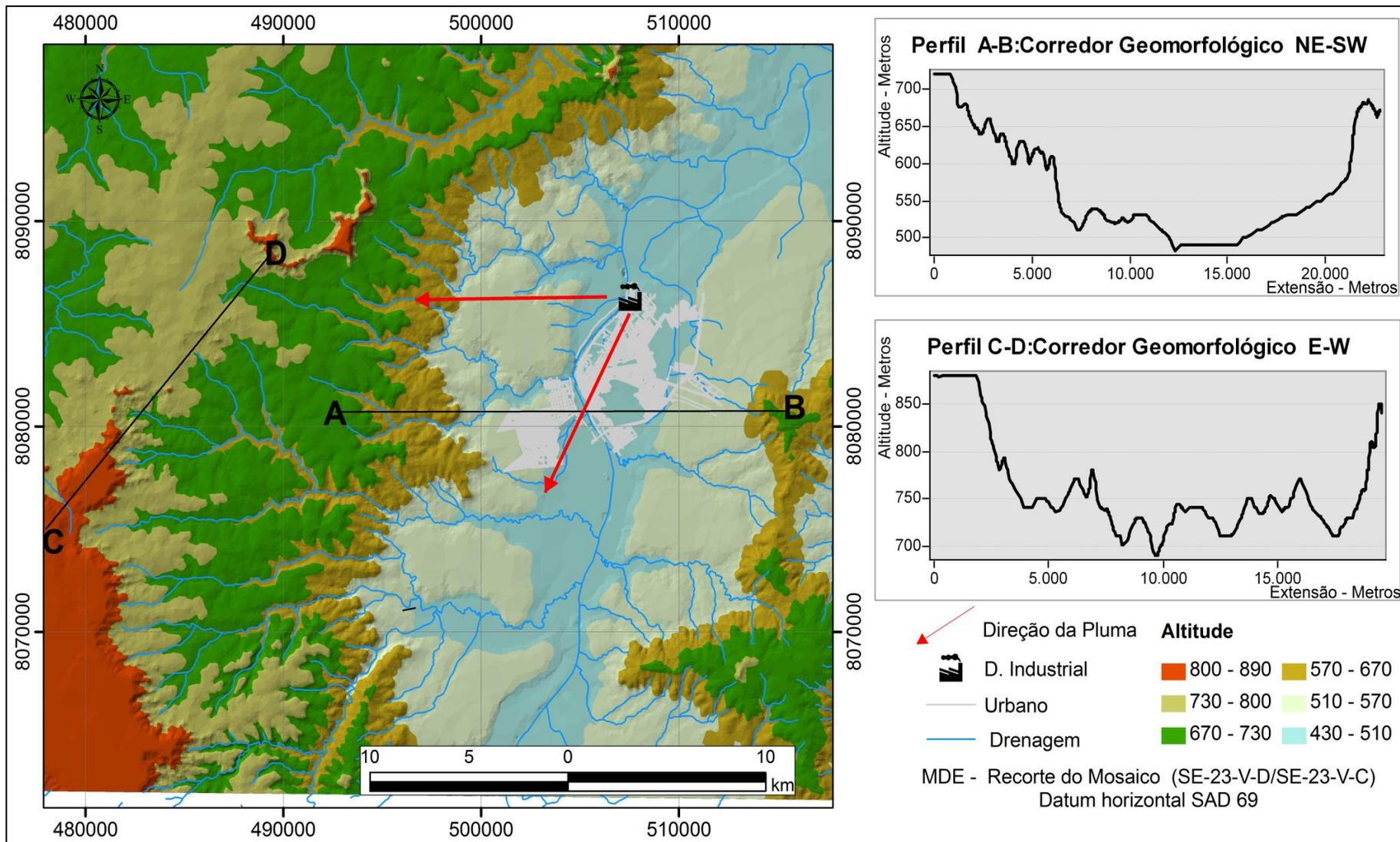


FIGURA 27 - Perfis topográficos mostrando a área rebaixada onde a pluma circula, preferencialmente, condicionada pela topografia (Perfil topográfico).

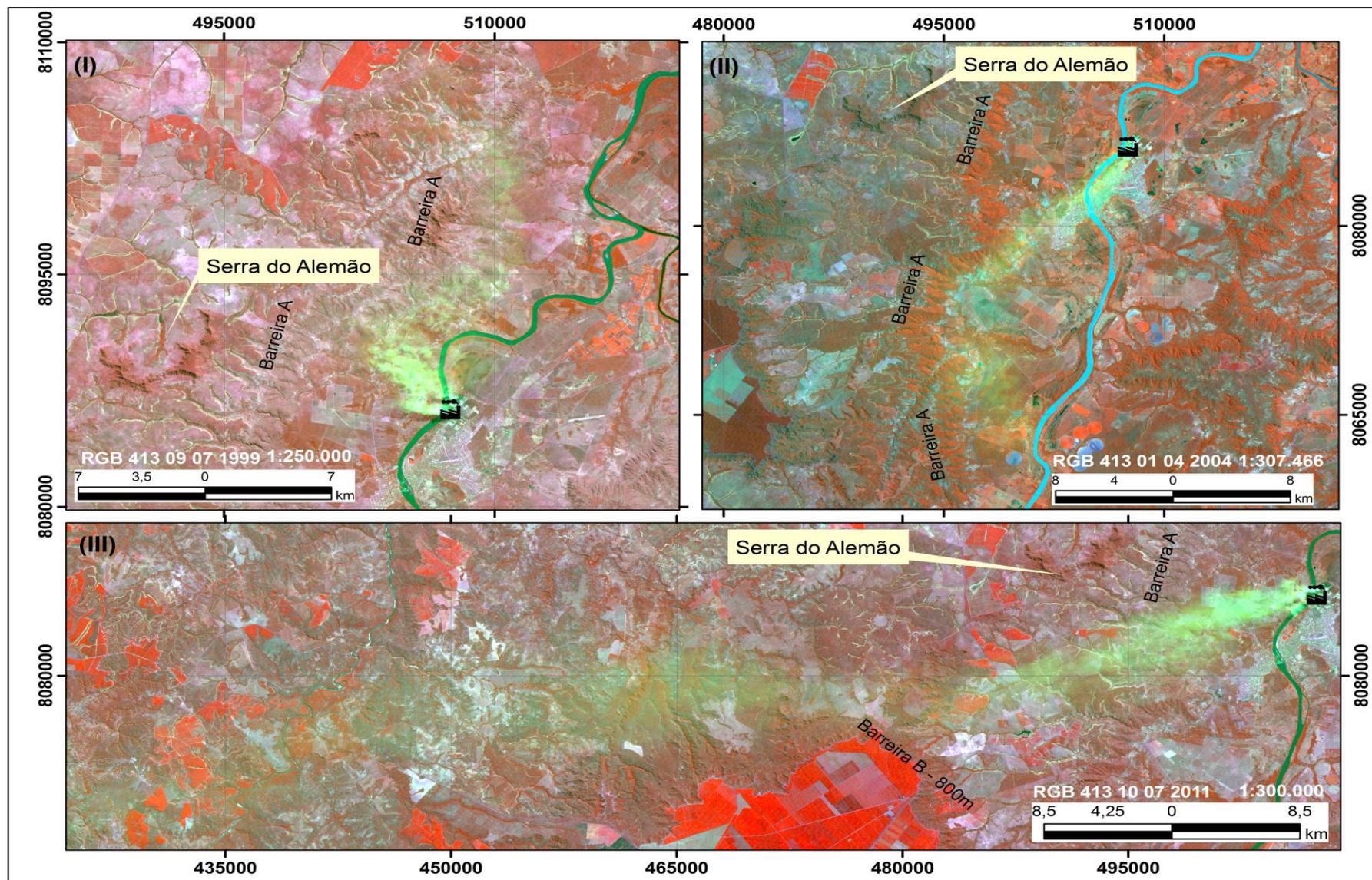


FIGURA 28 - Distribuição da pluma de particulados e o condicionamento geomorfológico. Observar pluma e o contraste com a rugosidade do terreno. Circulação da pluma para Norte(I) e sul (II) condicionada pela Barreira A e deslocamento para Oeste (III) passando pela Barreira B.

Portanto, 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 maiores velocidades dos ventos, a pluma se desloca para oeste, seguindo pelo corredor E-W condicionado pela barreira B. A grande distância alcançada pela pluma e sua direção preferencial indicam as áreas que podem apresentar riscos ambientais relacionados à deposição de particulados.

O histórico da circulação dos particulados atmosféricos observado nas imagens de satélites demonstrou 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 para oeste.

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, direcionando, por exemplo, a escolha dos locais de amostragem e ações dos órgãos governamentais quanto ao monitoramento da qualidade do ar, no quadrante sudoeste.

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 associados aos dados da fonte de emissão poderão fornecer informações complementares sobre o comportamento da pluma de particulados.

Os dados da movimentação 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 adicionam um vetor de circulação da pluma para Sul, onde se localizam os centros urbanos. Além disso, o corredor geomorfológico de circulação da pluma de material particulado coincide com o espaço urbano dos municípios, expondo a população aos poluentes que podem causar efeitos crônicos na saúde. Neste contexto deve se ter atenção especial às crianças e aos idosos que são mais vulneráveis aos efeitos adversos da presença de partículas na atmosfera.

Vale ressaltar que o quadrante leste, especialmente o sudeste, não vem sendo afetado pelos poluentes emitidos na área industrial, isto se deve a baixa frequência de ventos de Noroeste. Em contraposição, a escala regional (100km) alcançada pela pluma superou as perspectivas de alcance pensados para emissão do distrito industrial de Pirapora.

O estudo do comportamento do vento, das unidades geomorfológicas e a análise das imagens de satélite mostraram-se ferramentas eficientes na avaliação de circulação de plumas de poluição. Além disso, o uso conjunto das três informações se complementaram neste trabalho.

6. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA, QUÍMICA E MORFOLÓGICA DO MATERIAL PARTICULADO EMITIDO PELAS METALÚRGICAS NA REGIÃO DE PIRAPORA-MG

Neste capítulo, é apresentada a caracterização do material particulado desde a fonte emissora e discutido o potencial de contaminação e risco ambiental associado a composição química e mineralógica, tamanho e morfologia.

As análises granulométricas (FIG. 29) revelam que as partículas apresentam uma distribuição bastante uniforme, na faixa entre 0,18 e 123 μm com a maior ocorrência entre 5,0 e 50 μm . Somente 0,29% das partículas tem tamanho inferior a 0,18 μm , o que representa o limite de detecção do equipamento.

Considerando as faixas mais estudadas, o material particulado em suspensão (MPS <100 μm) inclui 99,96% das partículas. Dessas, 95% estão na faixa das Partículas Totais em Suspensão (PTS <50 μm); as partículas inaláveis (MP₁₀ - <10 μm) correspondem a 30 % e, por fim, as partículas respiráveis (MP_{2,5} - <2,5) compreendem 5,8% da amostra.

A análise dos diagramas permite afirmar que as duas amostras¹⁷ estudadas são bem semelhantes, mas podem ser distinguidas pela diferença na frequência de distribuição por faixas de tamanho. A amostra 01 apresenta uma maior quantidade (11,75%) de partículas finas (<5,0 μm); e a amostra 02 tem uma distribuição maior no tamanho entre 12 e 30 μm (52,01%) e ausência de partículas menores, entre 0,18 e 0,26 μm .

O tamanho das partículas varia de acordo com o processo de produção predominante naquele momento no empreendimento (HORN, BAGGIO e BILAL 2012). Assim, a diferença de tamanho descrita acima pode ser explicada porque a produção do silício de maior pureza libera maior quantidade de partículas menores que os processos das ligas de Ferro-Silício.

Estes resultados indicam que 70% das partículas encontram-se na fração entre 10 e 50 μm , sendo maiores que aquelas potencialmente nocivas pelo contato direto com as vias respiratórias (MP₁₀ e MP_{2,5}). Em contraposição, apesar de se apresentarem em menor quantidade, as partículas finas permanecem por mais tempo na atmosfera e podem ser transportadas por maiores distâncias, ampliando a área de impacto das emissões de partículas ao longo do tempo.

¹⁷ Foram analisadas duas amostras representativas dos 2 tipos de processo de metalurgia desenvolvidos na área de estudo. Foram coletados 2 quilos de cada amostras.

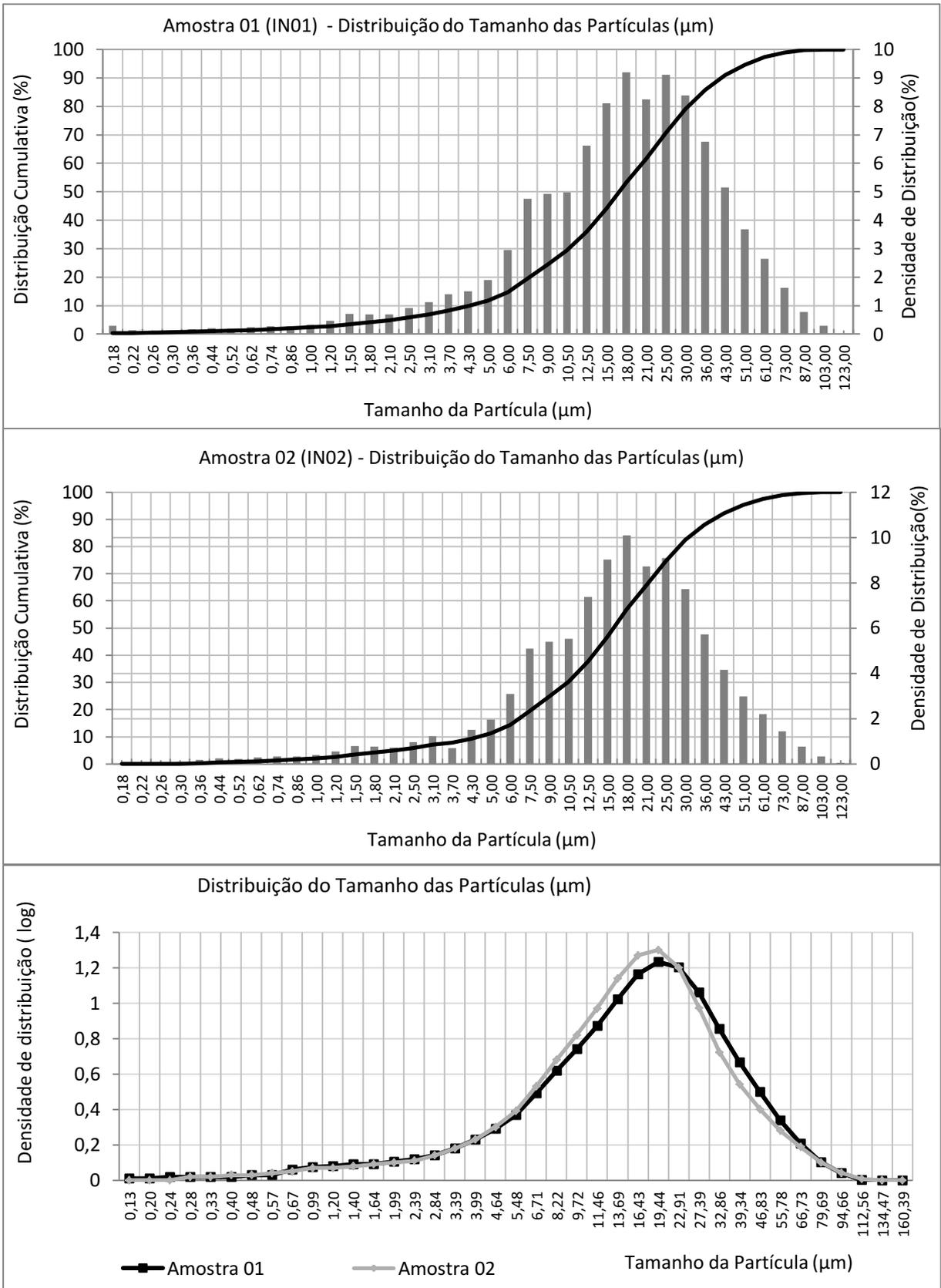


FIGURA 29 - Curvas da distribuição granulométrica das partículas mostrando a distribuição cumulativa (gráfico inclui a Frequência para cada tamanho - Barras) e densidade de distribuição.

A difração de Raio-X mostra que, do ponto de vista mineralógico, o material não apresenta uma curva com muito ruído e picos largos, típico para materiais amorfos (FIG. 30) e poucos picos indicando a presença de SiO_2 cristalina e magnetita.

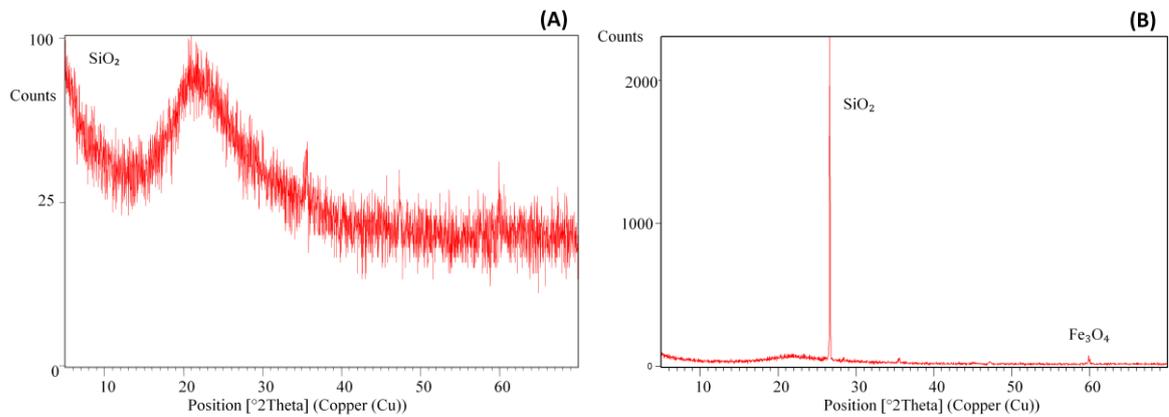


FIGURA 30 - Difrátogramas da microssílica revelando amorficidade do material e compostos de Ferro (pico da magnetita). (A) material particulado mais claro, produção silício maior pureza (B) material particulado mais escuro, produção Ferro-Silício.

Os picos (FIG. 31) de baixa intensidade dos evidenciam a presença compostos de Fluorita (Fr) e Quartzo (Qz), materiais utilizados no processo de produção.

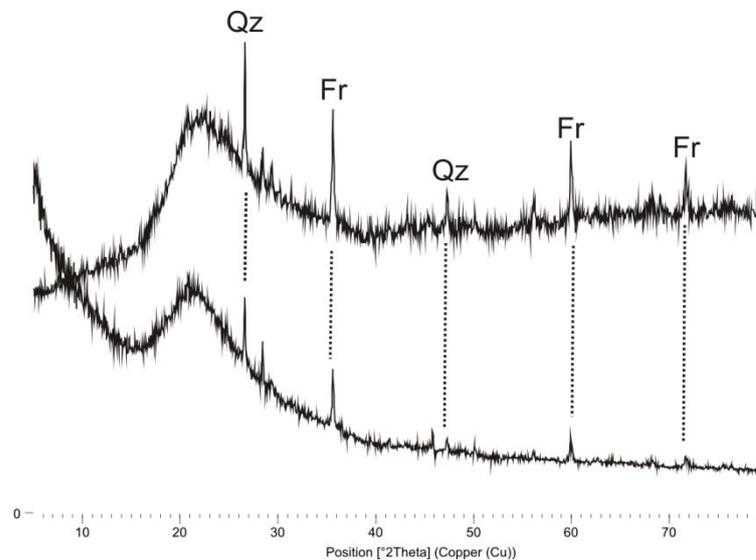


FIGURA 31 - Identificação de picos (do quartzo e fluorita) no material amorfo nos difratogramas. (Qz - Quartzo / Fr - Fluorita)

Em campo, observa-se uma diferença significativa na coloração da pluma emitida (FIG. 32), sendo uma tonalidade mais clara associada a produção da sílica pura, formada principalmente por SiO_2 amorfa, e uma mais escura da produção de Fe-Si.



FIGURA 32 - Variação na coloração da Pluma da emissão atmosférica na região.

A coloração mais escura pode ser explicada pela presença dos compostos de Fe, a exemplo da magnetita, como mostrado na mineralogia.

6.1. Composição química e concentrações de metais pesados

Os resultados das análises químicas demonstram que o material apresenta um alto teor de SiO_2 (95,5%). Segundo Carmo e Portella (2008, p. 310), as indústrias que adotam a produção do teor de silício na ordem de 75% produzem uma fumaça com teores entre 85% e 90% de SiO_2 não-cristalina. Na área de estudo, a produção de silício 75 e silício-metálico é bastante significativa, fato que aumenta a quantidade de Si no material particulado.

Em menor percentagem (TAB.6) ocorrem óxidos de $\text{CaO}>\text{Fe}_2\text{O}_3>\text{K}_2\text{O}>\text{Al}_2\text{O}_3>\text{MgO}>\text{MnO}>\text{P}_2\text{O}_3>\text{Na}_2\text{O}>\text{TiO}_2$; e os elementos menores $\text{Ba}>\text{S}>\text{Sr}>\text{Zn}>\text{Zr}>\text{Cr}>\text{W}>\text{Cu}>\text{Rb}>\text{Pb}>\text{Ni}>\text{V}>\text{Sb}>\text{Cd}>\text{Sn}>\text{As}>\text{Co}>\text{Mo}$. É importante destacar a presença de elementos de maior toxicidade; como Zn, Cr, Cu, Pb, Ni, Cd e Co; cujos efeitos cumulativos aumentam o risco de contaminação por contato direto ou precipitação no solo e nos corpos hídricos. Uma vez que esses compostos estão sendo lançados na atmosfera e depositados na superfície é importante uma maior atenção para a emissão de particulados na área de estudo.

A composição elementar mostra que o material é composto, em média, por 41% de Si (Silício) e 4,5% de C (Carbono), que são os principais componentes da matéria prima (carvão e quartzo) utilizados no processo de produção das ligas de silício.

Em relação aos elementos de maior toxicidade, em todas as amostras, as concentrações de Cd estão abaixo de 1ppm. Para Co e As, as concentrações também foram baixas, 1ppm para Co e média de 7ppm para As. Resultado semelhante também é observado para o Ni. Valores maiores foram obtidos para Pb (19ppm), Cu (28,8ppm), Cr (33,3) e Zn (74,6ppm).

TABELA 6 - Análise química por fluorescência de raios X do material emitido.

| Elemento | Unidade | Amostra | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|
| | | AM1 | AM2 | MÉDIA | D.P. |
| Total | (%) | 100,84 | 104,54 | 102,69 | 1,85 |
| SiO ₂ | (%) | 93,79 | 97,24 | 95,52 | 1,72 |
| CaO | (%) | 2,25 | 2,30 | 2,28 | 0,02 |
| Fe ₂ O ₃ | (%) | 1,73 | 1,72 | 1,73 | 0,01 |
| K ₂ O | (%) | 1,01 | 1,06 | 1,04 | 0,03 |
| Al ₂ O ₃ | (%) | 0,55 | 0,61 | 0,58 | 0,03 |
| MgO | (%) | 0,47 | 0,51 | 0,49 | 0,02 |
| MnO | (%) | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,00 |
| P ₂ O ₅ | (%) | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,00 |
| Na ₂ O | (%) | 0,10 | 0,12 | 0,11 | 0,01 |
| Cl | (%) | 0,06 | 0,08 | 0,07 | 0,01 |
| TiO ₂ | (%) | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 |
| Ba | (ppm) | 2579,00 | 2598,00 | 2588,50 | 9,50 |
| S | (ppm) | 1717,00 | 1890,00 | 1803,50 | 86,50 |
| Sr | (ppm) | 723,00 | 737,00 | 730,00 | 7,00 |
| Zn | (ppm) | 98,00 | 101,00 | 99,50 | 1,50 |
| Zr | (ppm) | 62,00 | 63,00 | 62,50 | 0,50 |
| Cr | (ppm) | 56,00 | 51,00 | 53,50 | 2,50 |
| W | (ppm) | 56,00 | 1,00 | 28,50 | 27,50 |
| Cu | (ppm) | 47,00 | 45,00 | 46,00 | 1,00 |
| Rb | (ppm) | 33,00 | 34,00 | 33,50 | 0,50 |
| Pb | (ppm) | 28,00 | 25,00 | 26,50 | 1,50 |
| Ni | (ppm) | 15,00 | 13,00 | 14,00 | 1,00 |
| V | (ppm) | 13,00 | 12,00 | 12,50 | 0,50 |
| Sb | (ppm) | 13,00 | 12,00 | 12,50 | 0,50 |
| Cd | (ppm) | 9,00 | 3,00 | 6,00 | 3,00 |
| Sn | (ppm) | 6,00 | 15,00 | 10,50 | 4,50 |
| As | (ppm) | 2,00 | 5,00 | 3,50 | 1,50 |
| Co | (ppm) | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 |
| Mo | (ppm) | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |

Os elementos maiores (TAB. 7) ocorrem em concentrações mais altas, na sequência Ca>Fe>Al> Ba>Mg> Na>Mn. Essa composição química pode variar de acordo com o sistema de produção, conforme ressalta FEAM (2010a). Assim, é fundamental conhecer os elementos principais e traços, como os metais pesados, pois estes últimos determinam o potencial de impacto no meio ambiente dos efluentes particulados.

TABELA 7 - Composição química elementar da material emitido (ICP-OES)

| | Elemento | Amostras | | | |
|--------------------------|----------|----------|-------|---------|--------|
| | | AM1 | AM2 | MÉDIA | D. P. |
| Metais Pesados (ppm) | Cd | < 1 | < 1 | - | - |
| | Co | 1 | 1 | 1,1 | 0,03 |
| | As | 6 | 8 | 7,0 | 0,89 |
| | Ni | 7 | 8 | 7,0 | 0,75 |
| | Cr | 33 | 34 | 33,3 | 0,56 |
| | Pb | 19 | 19 | 19,0 | 0,01 |
| | Cu | 29 | 29 | 28,8 | 0,05 |
| | Zn | 63 | 86 | 74,6 | 15,80 |
| Elementos Maiores (ppm) | Mn | 539 | 546 | 542,3 | 4,75 |
| | Na | 780 | 839 | 809,7 | 41,58 |
| | Ba | 2883 | 2920 | 2901,4 | 25,99 |
| | Mg | 2533 | 2555 | 2543,9 | 15,65 |
| | Al | 4371 | 4380 | 4375,3 | 6,32 |
| | K | 7833 | 8034 | 7933,5 | 142,01 |
| | Ca | 16008 | 16153 | 16080,4 | 102,23 |
| | Fe | 13828 | 13099 | 13463,4 | 515,86 |
| Composição Principal (%) | C | 4,58 | 4,45 | 4,5 | 0,09 |
| | Si | 40,81 | 41,02 | 40,9 | 0,15 |

Horn et. al. (2012), analisando material particulado originado da produção de silício metálico (98,5% sílica), identificaram maior concentração de Zn (3x) e menor concentração de Ba (800x). Considerando o tamanho das partículas, os autores mostram que o processo de alta pureza libera partículas de menor dimensão, variando entre 0,1 a 10 µm com tamanho médio de 3,15 µm.

6.2. Microquímica de superfície e morfologia das partículas

Os mapas microquímicos (FIG. 33 e 34) de superfície mostram presença dos íons de Na, Si, K, Ca, Fe e Mg . Além disso, é significativa a ocorrência do monóxido de Carbono, Cloreto, fluoreto, sulfatos e fosfatos. A presença marcante desses elementos corroboram com as concentrações encontradas na análise química via ICP-OES.

As análises microquímicas e indicam, também, que os metais distribuem-se de forma irregular na superfície e destacam-se aqueles associados a feições esféricas. Observa-se uma associação na distribuição de elementos como Ca e Co, assim como Mg e Cu , que parecem definir aspectos químicos da morfologia do material.

O mapeamento de maior intensidade do Cu corrobora com as maiores concentrações deste elemento mostrando ser ele, juntamente com o Zn - mostrado na análise química via ICP, indicadores do potencial de toxicidade do material particulado lançado na atmosfera.

A microquímica demonstra que o material é composto por uma massa de Silício e Oxigênio (FIG. 35), na qual são encontrados compostos de dimensões variadas, cuja composição inclui, entre outros elementos, o K, Ca, Fe, Mn e Ba.

As distribuição microquímica pontual de alguns elementos no material emitido pela indústria estão, portanto, relacionadas com a morfologia esférica do material observado no monitoramento do material particulado presente na atmosfera.

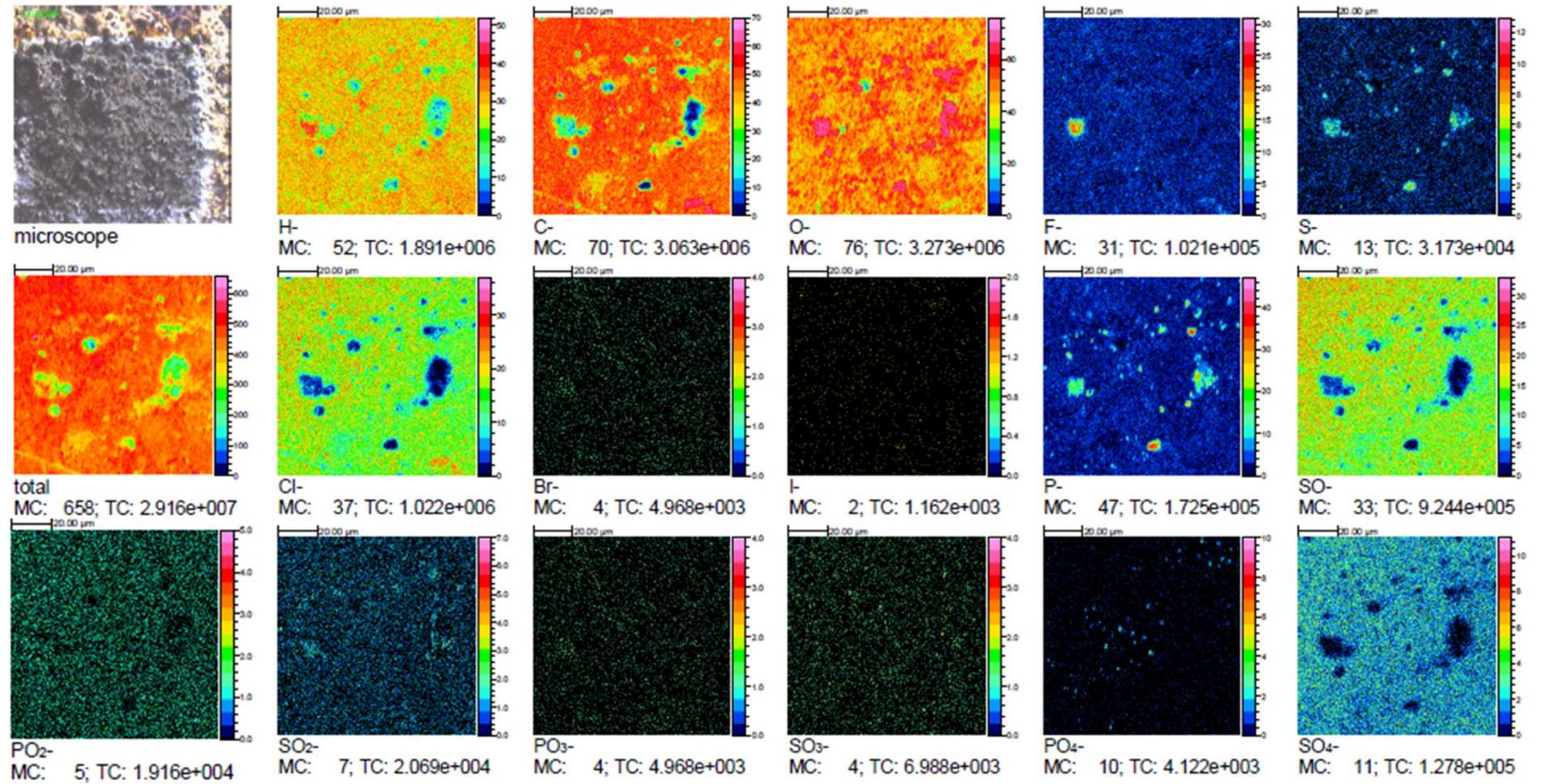


FIGURA 33 - Mapas microquímicos dos íons negativos(TOF -SIMS 106*106µm).

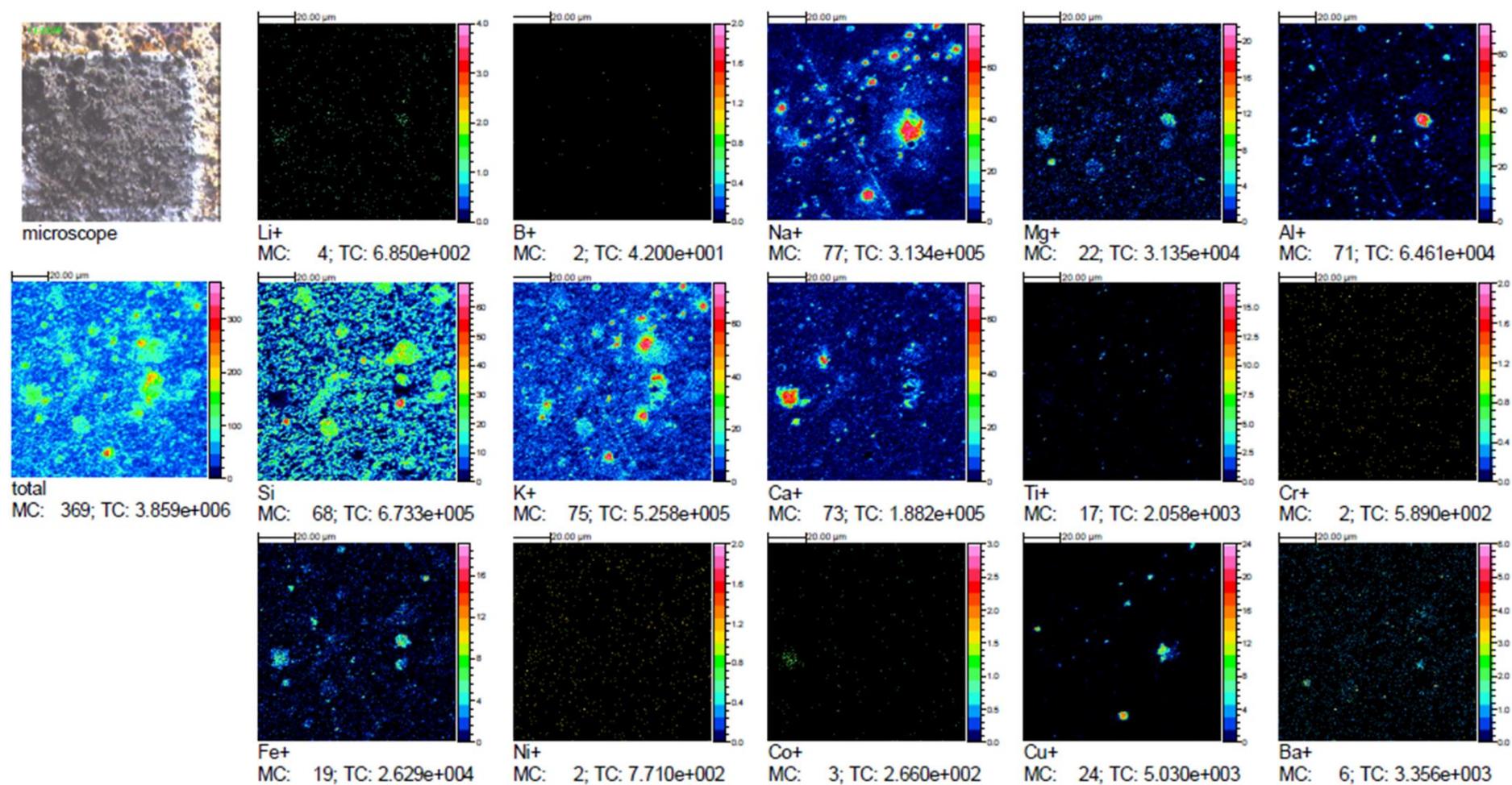


FIGURA 34 - Mapas microquímicos dos íons positivos (TOF-SIMS - 106 * 106 μm). Ocorrência pontual do Cu e distribuição do Cr e Ba.

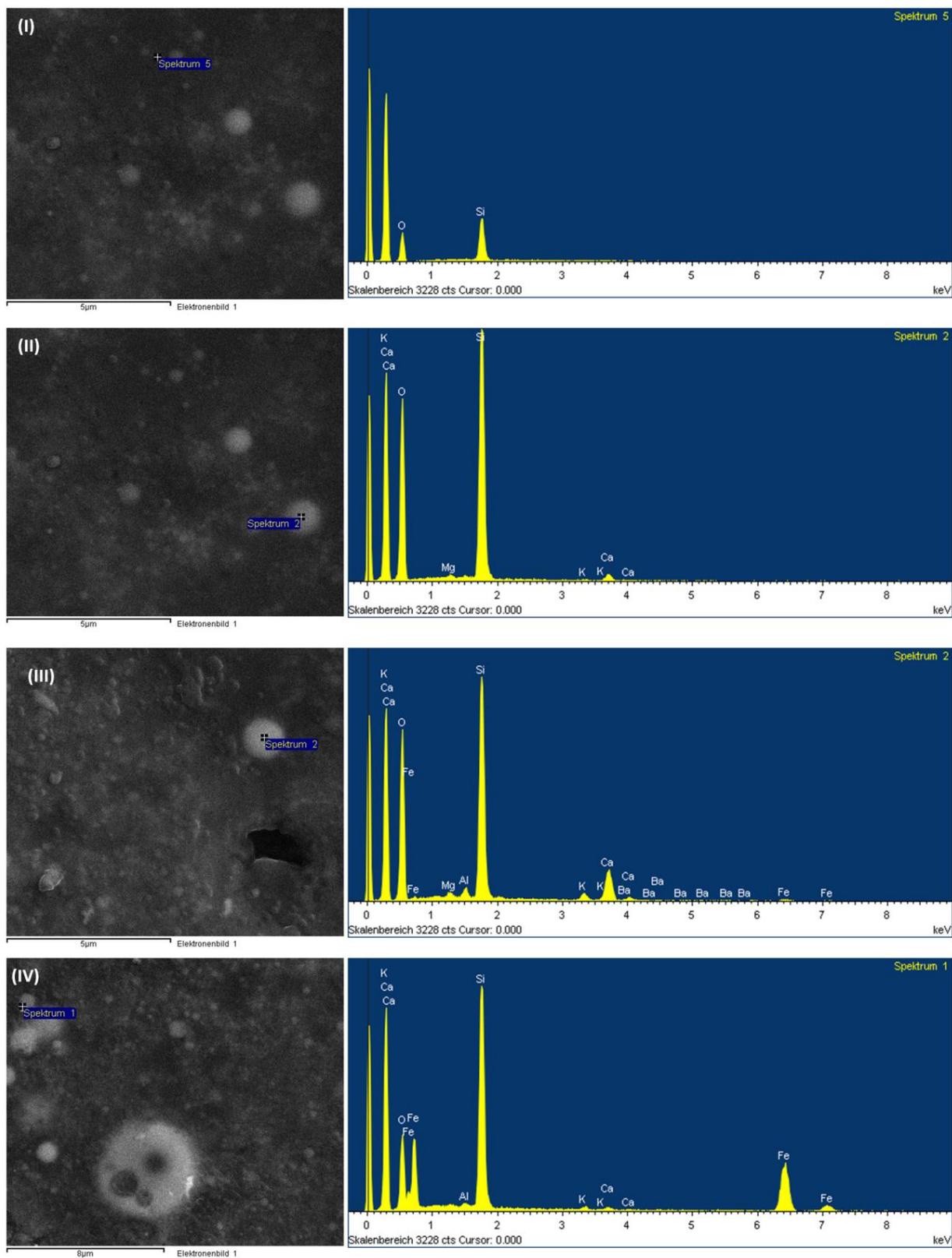


FIGURA 35 - Composição química e morfologia do material particulado emitido (Microquímica MET). (I) - Sílica; (II) Sílica e compostos de Ca, K e Mg; (III) Sílica e Compostos de Ca, K, Al, Fe e Ba e (IV) Sílica e compostos de Ca, K e Fe.

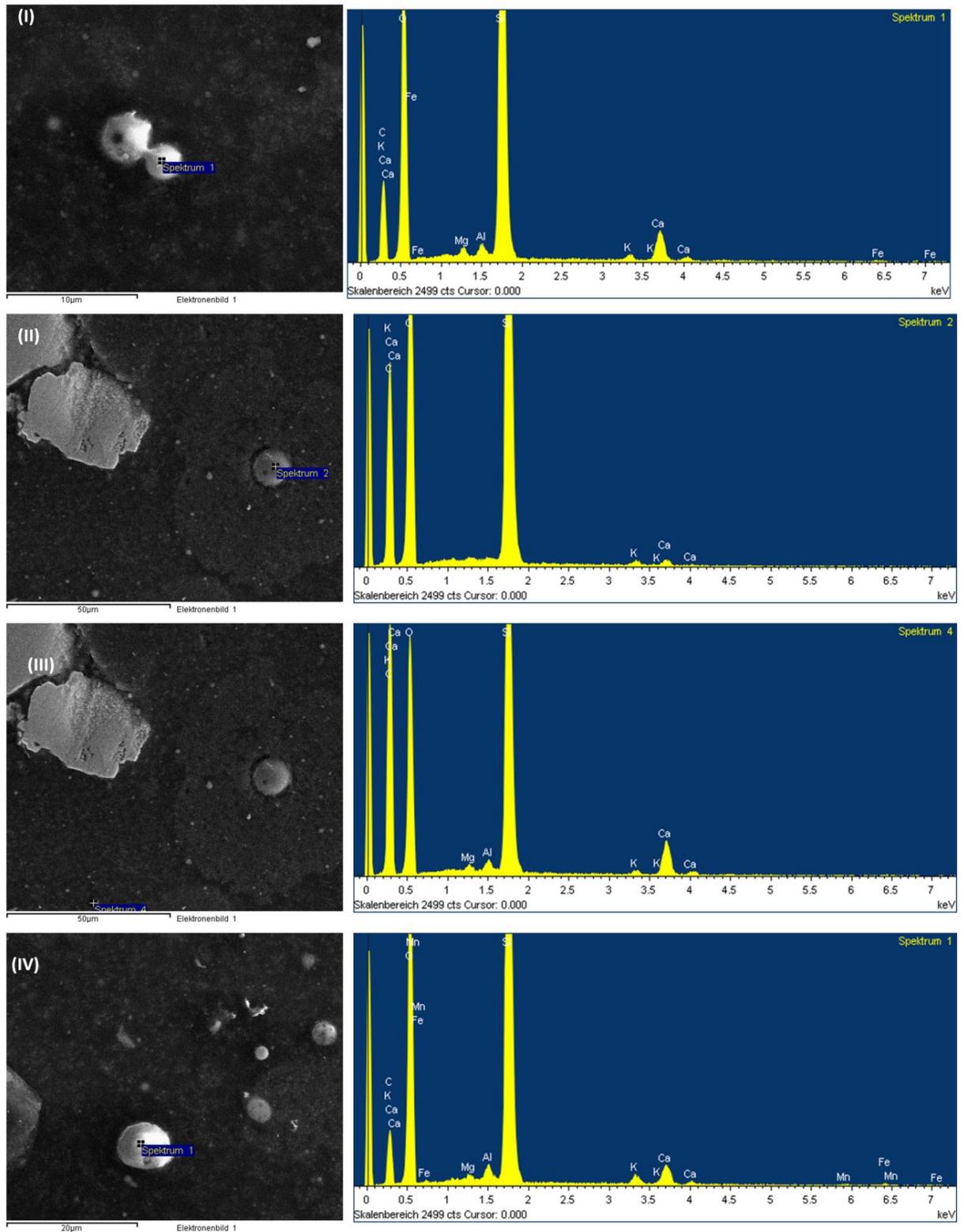


FIGURA 36 - Morfologia e química do material particulado emitido(Microquímica MET).(I) Sílica e compostos de Ca, K, Al, Mg e Fe;(II e III) Sílica e compostos de Ca, K, Al e Mg; (IV) e Sílica e compostos de Ca, K, Al, Mg, Mn e Fe.

A morfologia esférica (FIG. 36) das partículas está associada a duas características ambientais principais: a primeira relacionada ao processo de formação, que ocorre no alto-

forno, e pode conter em sua composição metais pesados; a segunda refere-se à aerodinâmica da partícula que, por seu formato, pode ser transportada por maiores distâncias contribuindo para a dispersão do material particulado na atmosfera.

A emissão do material particulado pelas atividades metalúrgicas coloca-se como um problema, do ponto de vista técnico, de fácil solução. A instalação dos filtros de manga, além de resolver questão da poluição atmosférica, tem uma compensação pelo valor econômico do material coletado - a microssilica.

Em contraposição, esse material emitido para a atmosfera tem seu maior potencial de interferência na qualidade ambiental associado a dois aspectos principais: a morfologia e a composição.

As partículas de menor dimensão ($<50\mu\text{m}$) associadas à morfologia esférica potencializam a dispersão e transporte do material por longas distâncias aumentando a área de impacto. A predominância de partículas pequenas facilita sua interação e absorção pelo sistema respiratório, principalmente em ocasiões de inversão térmica em que o material fica mais próximo da superfície e concentrado no espaço urbano.

Quanto à composição química, a presença de metais pesados coloca-se como uma preocupação central devido à toxicidade desses elementos e seu potencial de bioacumulação. As concentrações dos metais, mesmo valores baixos, oferecem risco tanto à qualidade ambiental quanto à saúde da população.

Por fim, vale ressaltar que esse material particulado é transportado e depositado em compartimentos ambientais e, a partir daí, passa a circular no sistema, aumentando seu impacto sobre o meio. Conhecidas essas características do material particulado, reforça-se aqui a necessidade da efetiva instalação do sistema de filtros já que o material não demonstra estar livre de contaminantes e sua emissão constante pode comprometer a qualidade ambiental da região.

7. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, MORFOLÓGICA E A DISTRIBUIÇÃO DAS PARTICULAS ATMOSFÉRICAS: INFLUÊNCIA NA QUALIDADE AMBIENTAL

A circulação das partículas na atmosfera está condicionada, inicialmente, pelos condicionantes geográficos locais como direção e velocidade dos ventos e os corredores geomorfológicos. Ademais, a distribuição, o tamanho, morfologia e composição estão relacionados com a distância da fonte de emissão, fatores que determinam as propriedades das partículas encontradas na atmosfera.

Neste capítulo são apresentados a caracterização morfológica e química das partículas e os resultados do monitoramento da distribuição das partículas. Os dados são discutidos tendo como objeto principal as partículas de origem da industrial de Si e Fe-Si.

7.1. Material particulado: distribuição e identificação das partículas de origem industrial.

A distribuição das partículas, de acordo com a distância da fonte de emissão é apresentada em duas abordagens: (i) na área imediatamente afetada, incluindo o centro urbano; (ii) na área de dispersão indicada pelo estudo da evolução temporal de movimentação da pluma a partir das imagens de satélite e comportamento dos ventos. Posteriormente são apresentados os resultados da análise estatística da distribuição das partículas a partir dos dados obtidos no software Quantikov.

7.1.1. Material particulado no espaço urbano

A deposição de partículas ocorre de forma diferenciada entre os pontos de amostragem mostrando a diminuição da quantidade e tipo do material com a distância do Distrito Industrial (DI). Foram identificadas partículas de origem industrial na área urbana até 6,5 km de distância da área de emissão.

No DI, observa-se que o material é bastante diversificado quanto ao tamanho e morfologia. As partículas mais visíveis são angulosas e de maior dimensão (FIG. 37 - MP01-01), compostas principalmente por carbono e tem origem na produção já que o carvão

(vegetal e/ou mineral) é utilizado nos fornos como redutor no processo (MORI; SANTOS; SOBRAL, 2007). Devido ao maior tamanho e formato anguloso, essas partículas não são transportadas por grandes distâncias ficando restritas à área de entorno do DI .

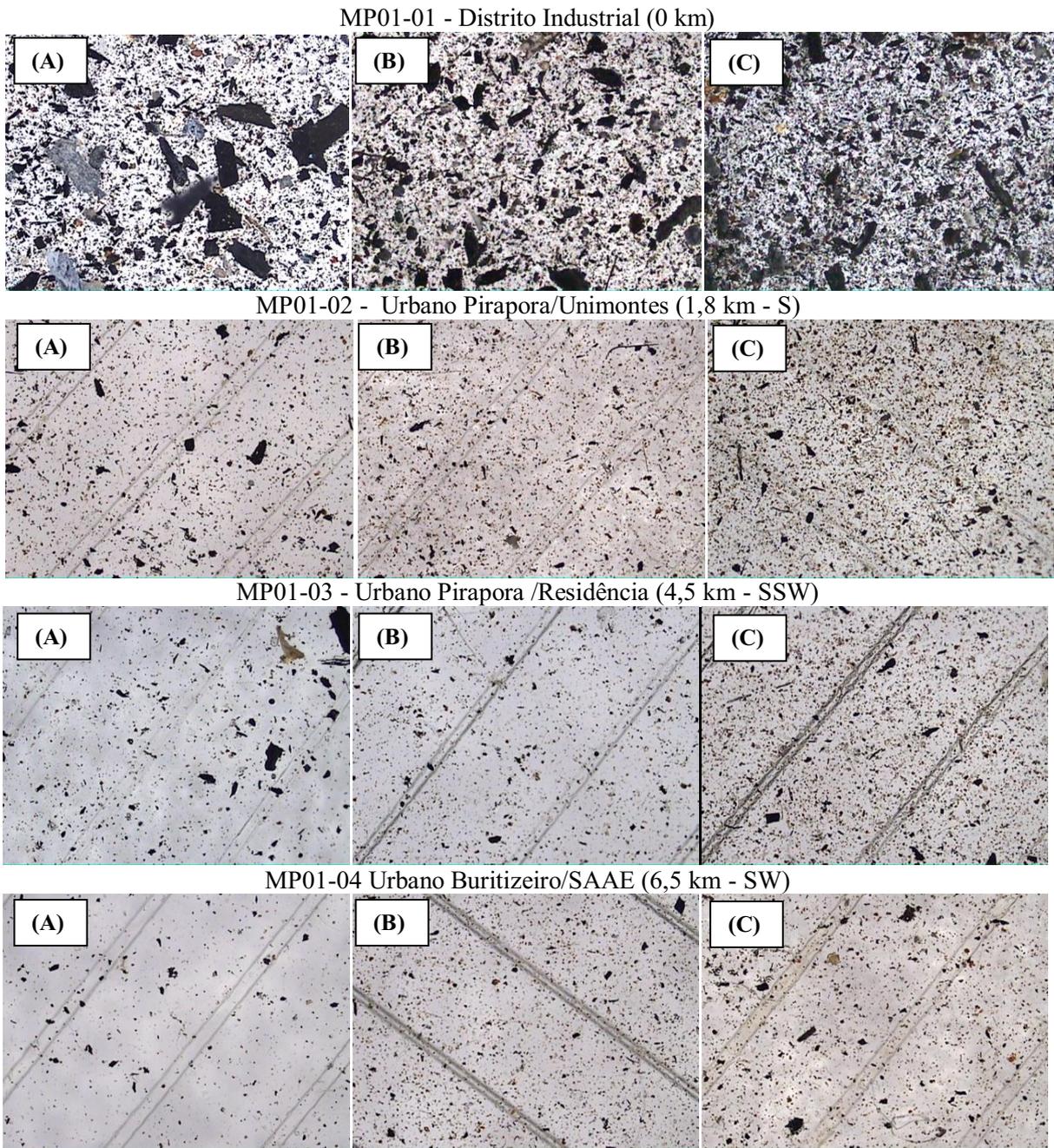


FIGURA 37 - Sequência de imagens do material particulado de acordo com a distância da área de emissão nos meses de Março(A), Junho(B) e Setembro(C). Informação da orientação do ponto de coleta em relação do DI (Fotografias microscópio óptico - Aumento 2,5x).* As linhas retas em segundo plano nas fotos são marcas do coletor de amostras.

Com o aumento da distância entre a fonte de emissão e o ponto de amostragem ocorre a mudança na quantidade e tipo de material precipitado além de uma maior variação no seu

tamanho. As partículas da superfície (grãos de areia e orgânicos – solo) ficam visíveis e as partículas esféricas, de origem industrial, podem ser melhor individualizadas e identificadas.

A variação temporal na quantidade de material depositado é bastante evidente e mostra um aumento nos meses mais secos (FIG. 37 - C), período em que as partículas permanecem por mais tempo na atmosfera, já que não ocorre o processo de limpeza promovido pelas chuvas.

Ferreira, Forti e Alvalá (2011, p. 31) mostram um padrão na concentração de $MP_{2,5}$ e 10 associado a ausência das chuvas e baixa velocidade do vento, no período de seca em São José dos Campos. Segundo os autores, essa condição climática dificulta a dispersão e remoção do material particulado da atmosfera. Vallero (2007), ao abordar o processo de remoção (limpeza) feito pela chuva, o coloca como um processo de transferência do material particulado entre os compartimentos ambientais, a exemplo da atmosfera para as plantas, solo, sedimento e água.

Um segundo fator que contribui para uma maior quantidade de material na atmosfera no período seco é a ressuspensão de partículas do solo. Estudos de Queiroz, Jacomino e Menezes (2007) e Jacomino et al (2009) desenvolvidos em Sete Lagoas mostraram que a ressuspensão de poeira de solo, juntamente com as atividades industriais são os maiores contribuintes de emissão de material particulado naquela área.

As partículas identificadas na amostragem do espaço urbano podem ser agrupadas em três tipos. O primeiro inclui as partículas angulosas compostas de carbono, que cobre toda a superfície de coleta no DI. O segundo se refere às partículas esféricas de origem industrial. O terceiro compreende as partículas de origem na superfície (aglomerados de argilominerais e orgânicos).

7.1.2. Material particulado na área de mapeamento da pluma de poluição

O monitoramento na área de circulação da pluma de particulados atmosféricos mostrou uma variação bastante semelhante aos resultados do espaço urbano, especialmente no que se refere a sazonalidade. A maior concentração de partículas (FIG. 38 e FIG. 39) nos meses mais secos é bem característica dos centros urbanos (Pirapora e Buritizeiro). Além destes, tem-se comportamento semelhante no ponto MP02-07, localizado próximo à rodovia MG 161 (Córrego Palmital). Nestes locais, há uma contribuição significativa dos particulados

de superfície que apresentam maior mobilidade para a atmosfera no período de seca, associado ao maior tempo de permanência das partículas na atmosfera.

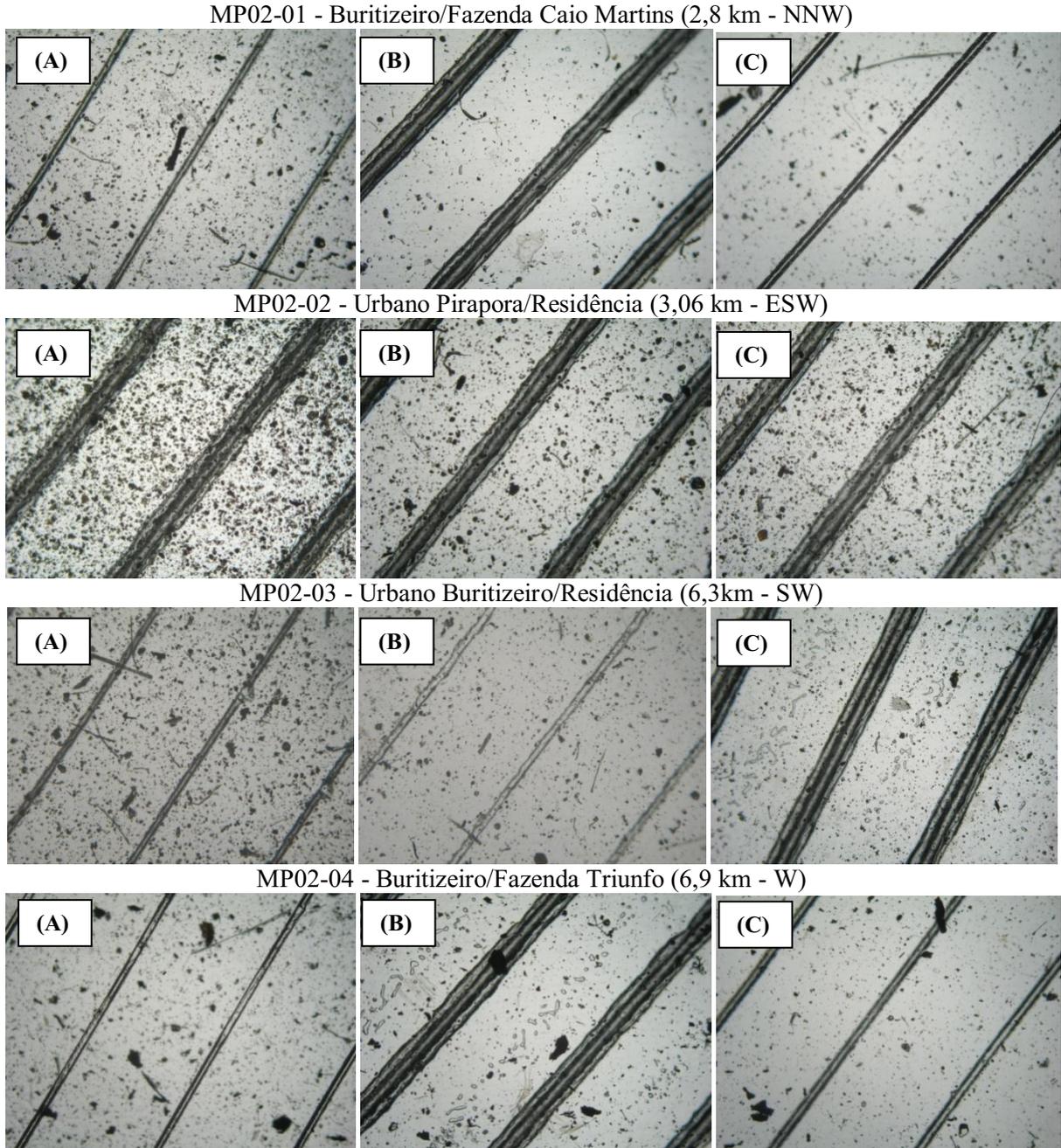


FIGURA 38 - Coletores com material particulado (película adesiva) na área de circulação da pluma de poluentes em setembro(A), fevereiro(B) e maio(C) Pontos de acordo com a distância e orientação em relação à área de emissão (DI) (Microscópio Óptico - 2,5x). *As linhas retas em segundo plano nas fotos são marcas do coletor de amostras.

Em todos os pontos foram identificadas partículas esféricas de origem industrial, posteriormente caracterizadas quimicamente (Cr_2O_3 ; TiO_2 ; SiO_2). Nos meses analisados, as partículas industriais foram bem evidentes e em maior quantidade nas amostras de setembro

(FIG. 39). É bastante evidente também, a variação da quantidade de partículas de origem industrial de acordo com a distância da fonte de emissão.

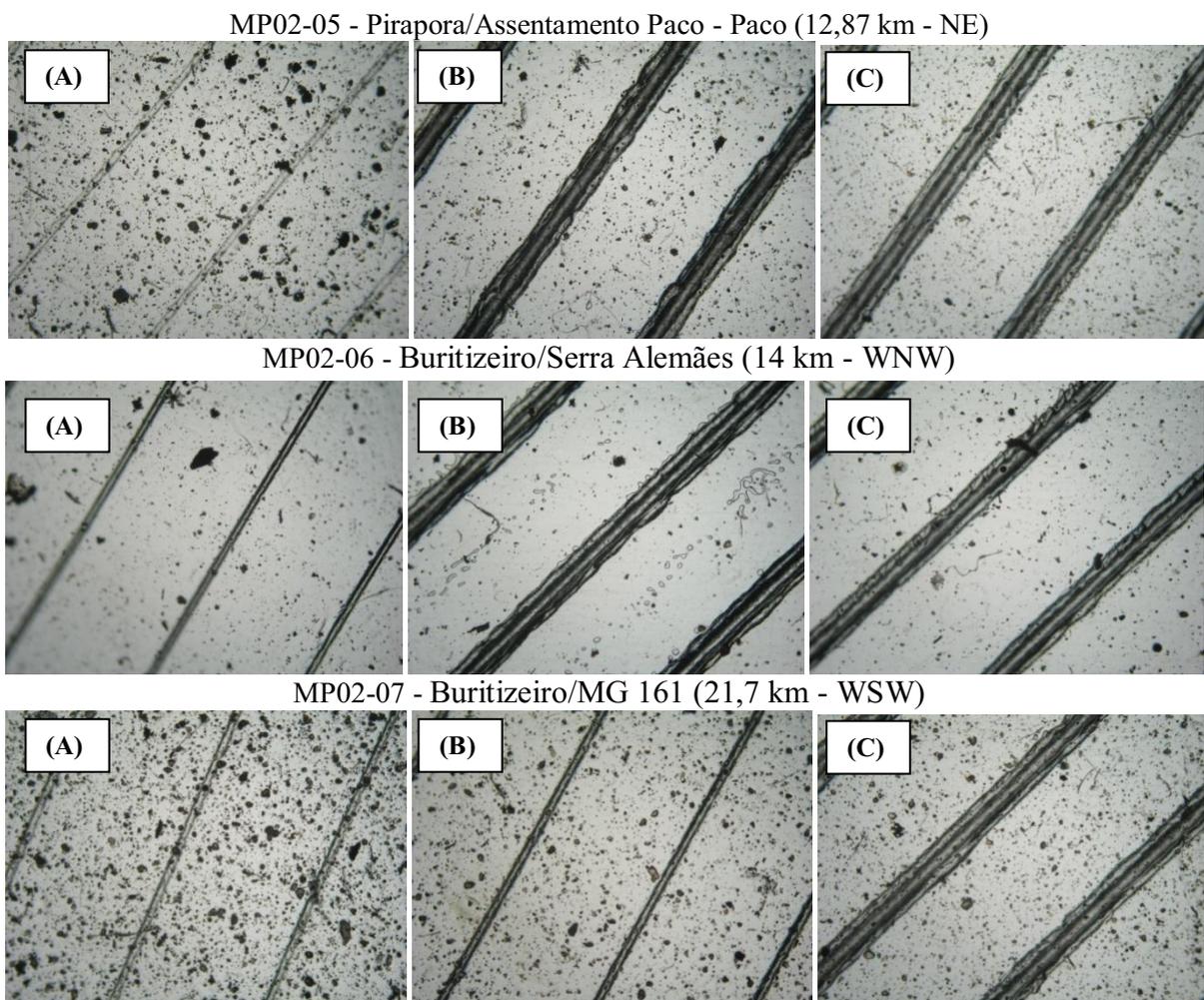


FIGURA 39 – Coletores com material particulado na área de circulação da pluma de poluentes em setembro(A), fevereiro(B) e maio(C). Pontos de acordo com a distância e orientação em relação à área de emissão (Microscópio Óptico - ampliação 2,5x ocular). As linhas retas em segundo plano nas fotos são marcas do coletor de amostras.

O Ponto (MP02-01) de direção NNW, localizado a 2,8 km do DI, destaca-se pela grande quantidade de partículas esféricas de diferentes tamanhos e composição. Além destas, são visíveis partículas compostas de carbono que, por seu tamanho, precipitam nas áreas mais próximas a área de emissão.

No ponto (MP02-02) localizado no espaço urbano de Pirapora (direção ESE e a 3,06 km do DI), foi difícil a identificação de partículas de origem industrial (de acordo com a caracterização morfológica (e química) descrita no capítulo 6). O estudo da orientação da pluma mostra que a direção leste é a de menor frequência (3,9%) de deslocamento dos particulados industriais, pois a ocorrência de vento nesta direção é quase nula (3,27%).

A dificuldade de visualização das partículas industriais pode também ser explicada pela grande quantidade de partículas terrígenas (FIG.40). A presença de grande quantidade desse tipo de material deve-se ao fato do local de monitoramento estar inserido em um bairro da área urbana, em que grande parte das ruas não são asfaltadas, levando à ressuspensão de partículas da superfície.

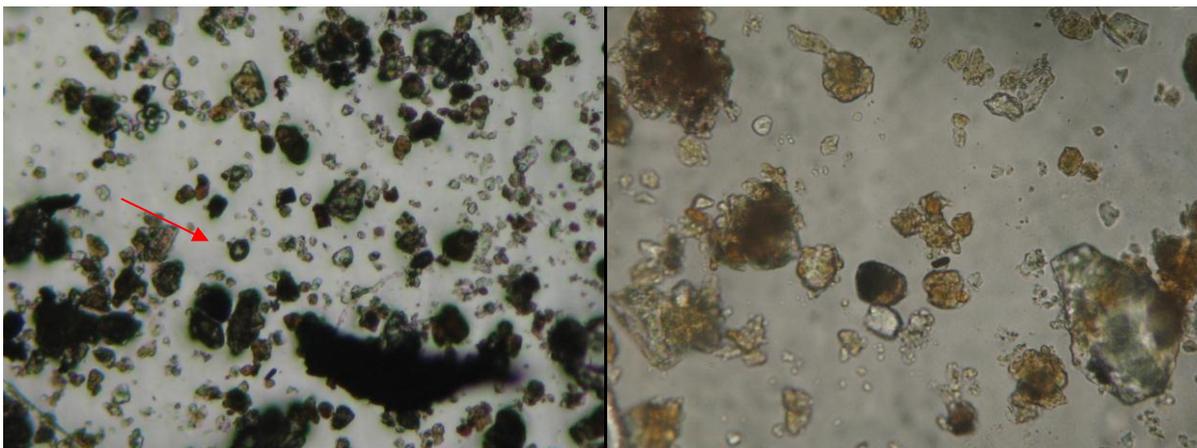


FIGURA 40 - Material Particulado na área urbana (Pirapora). À esquerda, partícula esférica de origem industrial indicada pela seta; e à direita, aglomerado de argilominerais da superfície. (Microscópio óptico 10X e 50X, respectivamente)

Uma grande quantidade de argilominerais também ocorre no ponto MP02-03 de direção SW (6,3km), localizado no centro urbano de Buritizeiro. No entanto, por estar localizado em um dos eixos de direção preferencial (39,9%) da circulação da pluma de poluição, contém maior quantidade de partículas de origem industrial, facilitando a identificação.

A precipitação de partículas industriais (FIG. 41) é bastante evidente no ponto MP02-04 de direção W (6,9 km), em Buritizeiro. Este também é um ponto em que se verifica uma frequente (27,8%) circulação da pluma de poluentes.

No segundo ponto (MP02-05) de direção E, especificamente NE (12,87 km), também se observou a presença de particulados de origem industrial. A localização em um contexto agrícola, com estradas não pavimentadas, favorece a ressuspensão de quantidade de argilominerais para atmosfera que são componentes importantes do material particulado na área.

O ponto MP02-06, de orientação WNW (14 km), compreende a área limite do corredor geomorfológico por onde circula a pluma de particulados. Neste ponto, as partículas de origem industrial precipitadas são menores e com grau de arredondamento maior.

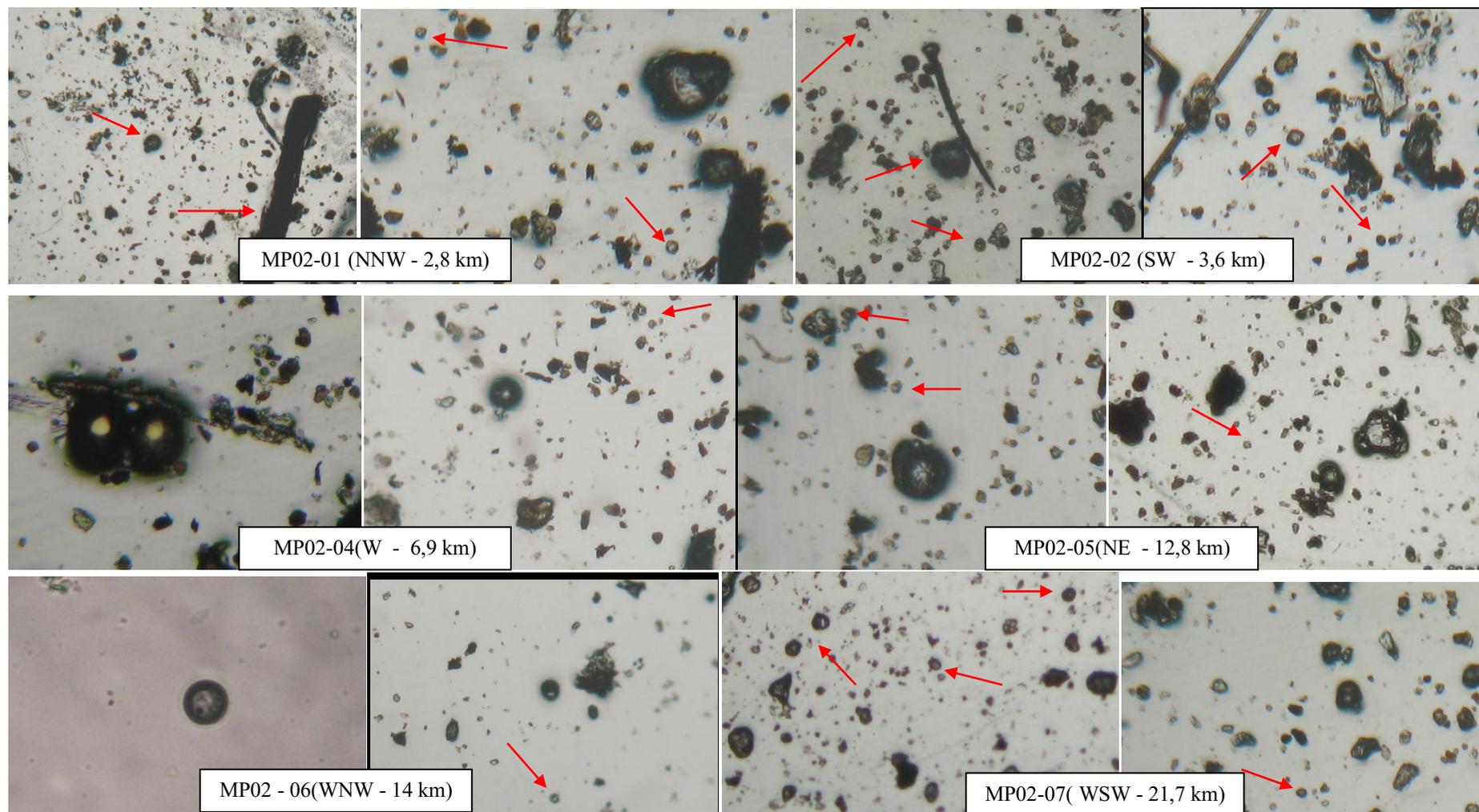


FIGURA 41 - Mosaico de imagens das partículas esféricas de origem industrial identificadas nos diferentes pontos de coleta. Setas indicam as partículas menores (microscópio óptico em diversos aumentos - 2,5X/5X/10X/50X).

No ponto MP02-07, o mais distante (21,7 km) e localizado a WSW da área de emissão também foi possível identificar partículas de origem industrial (FIG. 41). Este coletor foi instalado às margens da rodovia MG 161 que, por não ser pavimentada, leva a ressuspensão de grande quantidade de argilominerais que constituem grande parte das partículas. No entanto, o aspecto amorfo e o formato esférico característico das partículas industriais as diferenciam das demais.

A identificação das partículas de origem industrial foi mais fácil nas imagens referentes à coleta do mês de setembro 2013 em que se tem uma maior quantidade de essas partículas. O segundo semestre de 2013 é marcado pela diminuição da produção em todas as unidades do DI. Nesse período, ocorreu a paralisação parcial de duas indústrias e, em janeiro de 2014, a paralisação total de uma das três indústrias.

A produção durante esse período de paralisação, que se estendeu até início de 2016, foi bastante reduzida e ficou restrita a duas indústrias com o objetivo exclusivo de atender a demanda de contratos das empresas.

A identificação das partículas de origem industrial nos pontos de coleta localizados em diferentes direções e variadas distâncias corrobora os resultados da circulação dos poluentes indicados pelo estudo nas imagens de satélite.

A morfologia esférica típica das partículas de origem industrial e sua origem industrial confirmada pela análise microquímica foi a base para a identificação dessas partículas em imagens microscópica.

7.2. Quantidade de partículas e propriedades geométricas: Análise estatística usado dados do Quantikov.

Os dados das propriedades morfológicas das partículas obtidos no software Quantikov mostram a variação de acordo com a distância do DI e precipitação pluviométrica (FIG. 42).

Os resultados das análises mostram partículas de maior área, perímetro e diâmetro nas amostras do DI. Os valores referentes a Pirapora são, geralmente, intermediários, em Buritizeiro, tem-se uma redução significativa nas dimensões do material particulado.

A variação das propriedades das partículas, área, diâmetro e perímetro entre os locais de amostragem reflete a sua distribuição diferenciada de acordo com a distância da área de emissão. No DI são depositadas partículas maiores ou aglomerados de partículas, o que resulta em valores médios superiores.

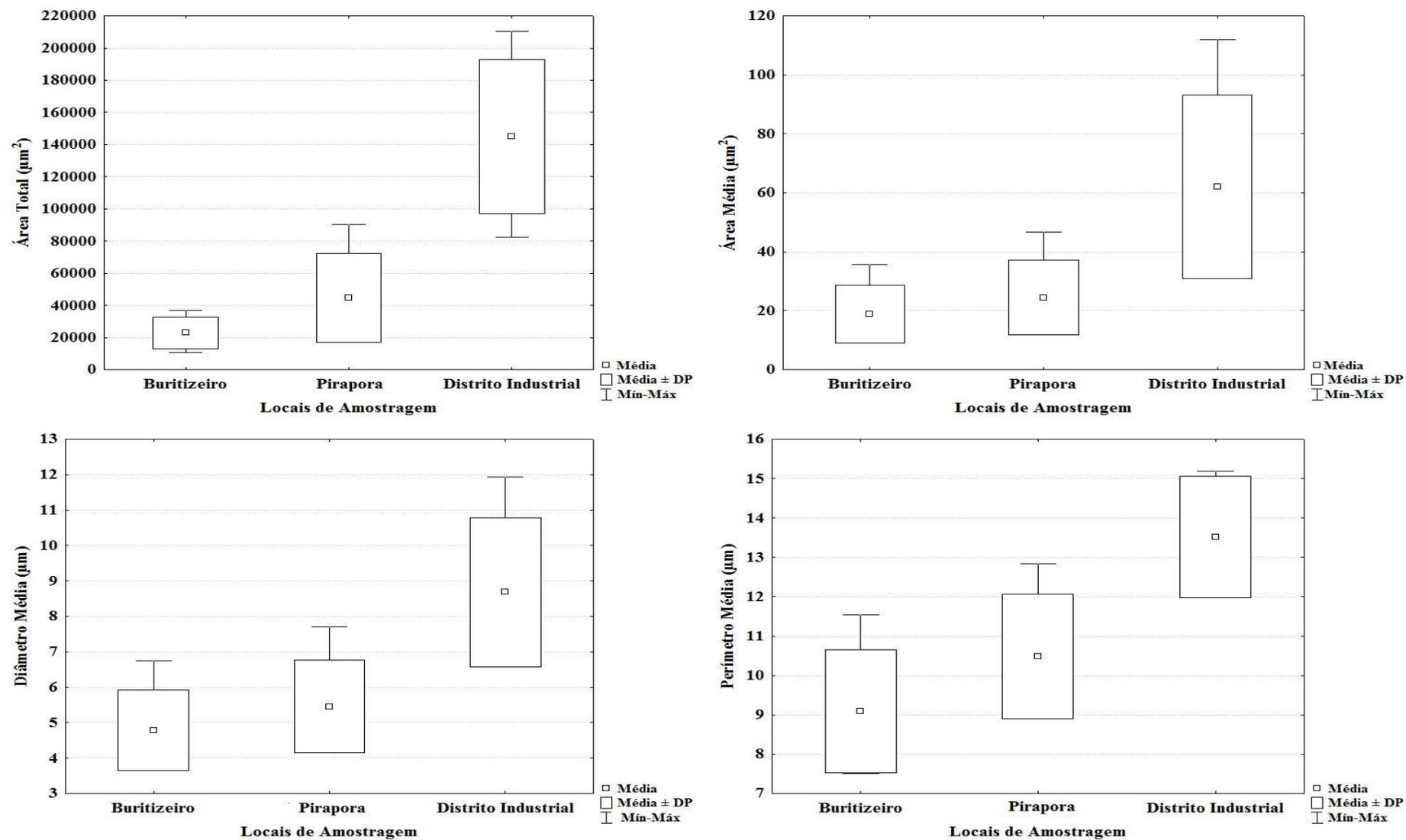


FIGURA 42 - Box Plot dos valores dos parâmetros geométricos do Material Particulado para os três locais de amostragem. Valores no gráfico representam a média, média \pm desvio padrão, valores mínimos e máximos.

Das variáveis analisadas, a melhor discriminação foi obtida com a área total, que mostra maior diferenciação entre os pontos e menor variação no mesmo ponto de amostragem.

Os resultados são consistentes para as imagens com aumento 2.5x e 5x, porém são discrepantes quando analisadas somente as partículas com alto grau de esfericidade ou somente o número total de objetos (FIG. 43).

A diferença observada para o Número Total de Objetos permite inferir que, por vezes, o tamanho das partículas nas amostras do DI é tão grande que o número de partículas individuais é menor que aquele nas amostras referentes ao ponto localizado em Pirapora, localizado a 1,8 km de distância da emissão. Além disso, o tamanho das partículas e a sobreposição das mesmas dificulta a individualização dessas partículas e, portanto, a sua contagem pelo software.

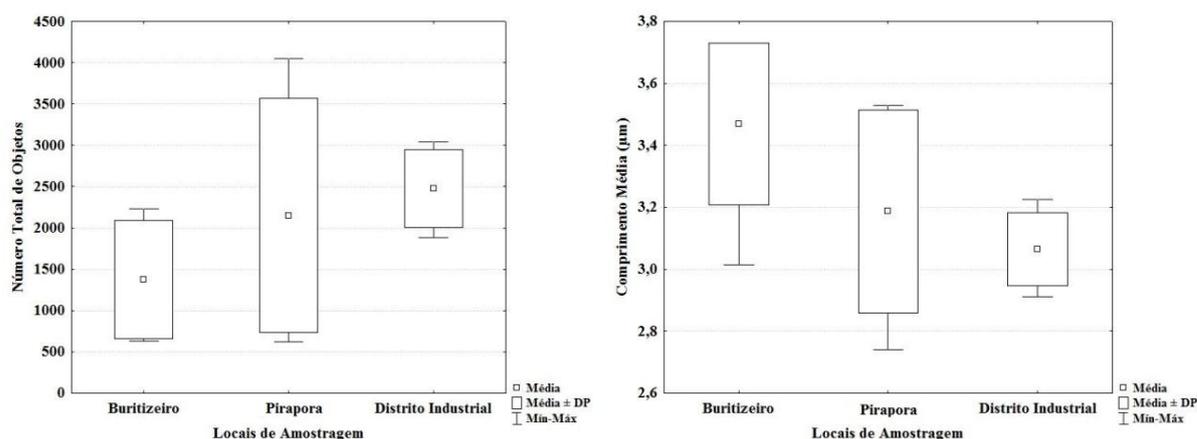


FIGURA 43 - Box Plot do Número Total de Objetos e Comprimento para os três locais de amostragem. Valores no gráfico representam a média, média \pm desvio padrão, valores mínimos e máximos.

A variação inversa do comprimento médio em relação à distância do DI pode ser explicada devido à diversificação das partículas com o afastamento do DI e a entrada de outras partículas, como aquelas da superfície, de comprimentos mais variáveis e menor uniformidade quanto a morfologia.

Para os testes de Correlação, ANOVA e Análise de Componente Principal (PCA), foi incluída a variável precipitação. No período chuvoso, o processo de retirada de partículas da atmosfera é mais rápido e frequente, esse processo é promovido pelo deslocamento e formação das gotículas incluem e arrastam o material particulado presente na atmosfera.

Os coeficientes de correlação apresentados (TAB. 8) não mostraram uma associação entre a precipitação e os atributos geométricos das partículas. Nota-se que a correlação é forte

entre as variáveis geométricas área, diâmetro e perímetro mostrando a eficiência no cálculo matemático feito pelo Quantikov.

TABELA 8 - Resultados do teste de correlação entre os parâmetros medidos. Valores em negrito significativos para $p < 0,05$.

| | Área Média | Diâmetro Média | Comprimento Média | Perímetro Média | Número Total de Objetos |
|-------------------------|--------------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------------|
| Diâmetro Média | 0,99 | | | | |
| Comprimento Média | -0,56 | -0,66 | | | |
| Perímetro Média | 0,90 | 0,95 | -0,79 | | |
| Número Total de Objetos | 0,03 | 0,04 | -0,05 | 0,16 | |
| Precipitação | 0,09 | 0,19 | -0,33 | 0,26 | -0,31 |

A variação das características do material particulado de acordo com precipitação é demonstrada no PCA.

Os resultados da Análise de Componentes Principais (FIG. 44) demonstraram que 80,6% da variabilidade dos dados foi explicada pelos dois eixos. O Eixo 1, com 58,7% da variabilidade total, selecionou os parâmetros área média, diâmetro médio, perímetro médio em pontos opostos ao comprimento médio. Isto demonstra que os três primeiros parâmetros tiveram uma relação inversa com o comprimento médio das partículas. O Eixo 2, com 21,9% da variabilidade total selecionou os parâmetros Número total de objetos e precipitação. Mais uma vez, essas duas variáveis tiveram comportamentos opostos, ou seja, os locais com maior precipitação tiveram um número menor de objetos.

A ordenação dos locais de amostragem segundo o resultado do PCA mostrou resultados interessantes (FIG. 45). Enquanto o Distrito Industrial foi posicionado em relação às variáveis selecionadas pelo Eixo 1 (área, perímetro e diâmetro), Buritizeiros e Pirapora ficaram próximos à variável comprimento médio; ou seja, nesses últimos locais as partículas tiveram um maior comprimento médio, enquanto área, perímetro e diâmetro se mostraram menores. Em relação ao Eixo 2, uma amostra de Pirapora foi a que apresentou o maior número de objetos.

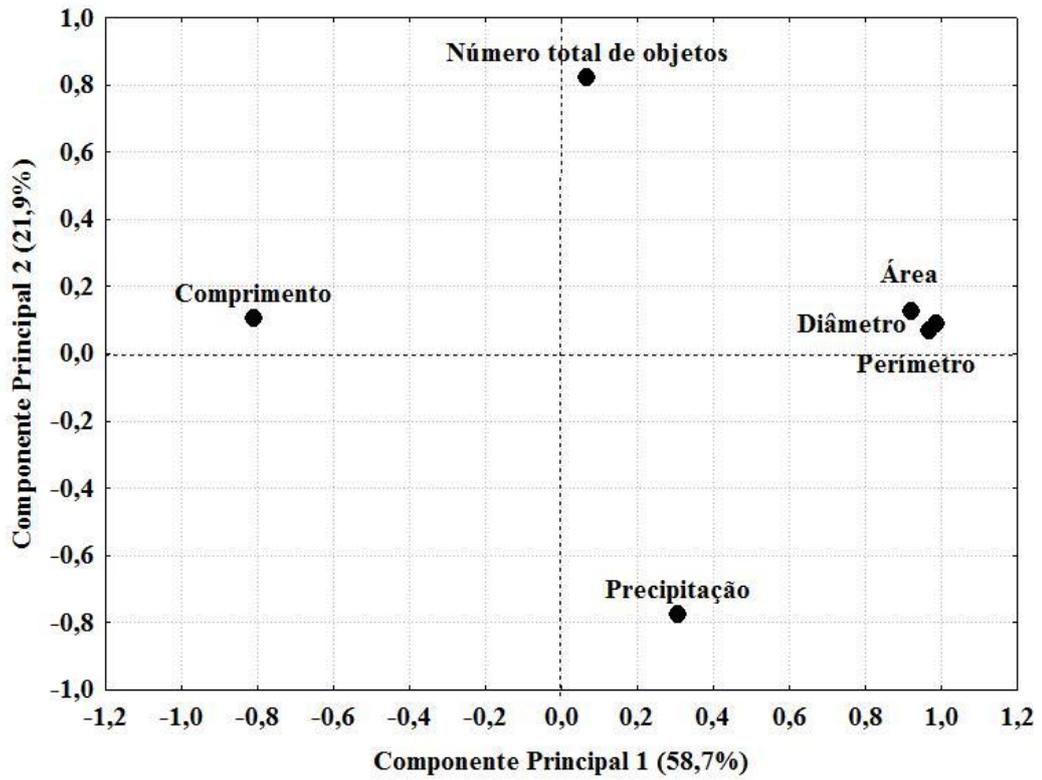


FIGURA 44 - Resultados da Análise de Componentes Principais (PCA).

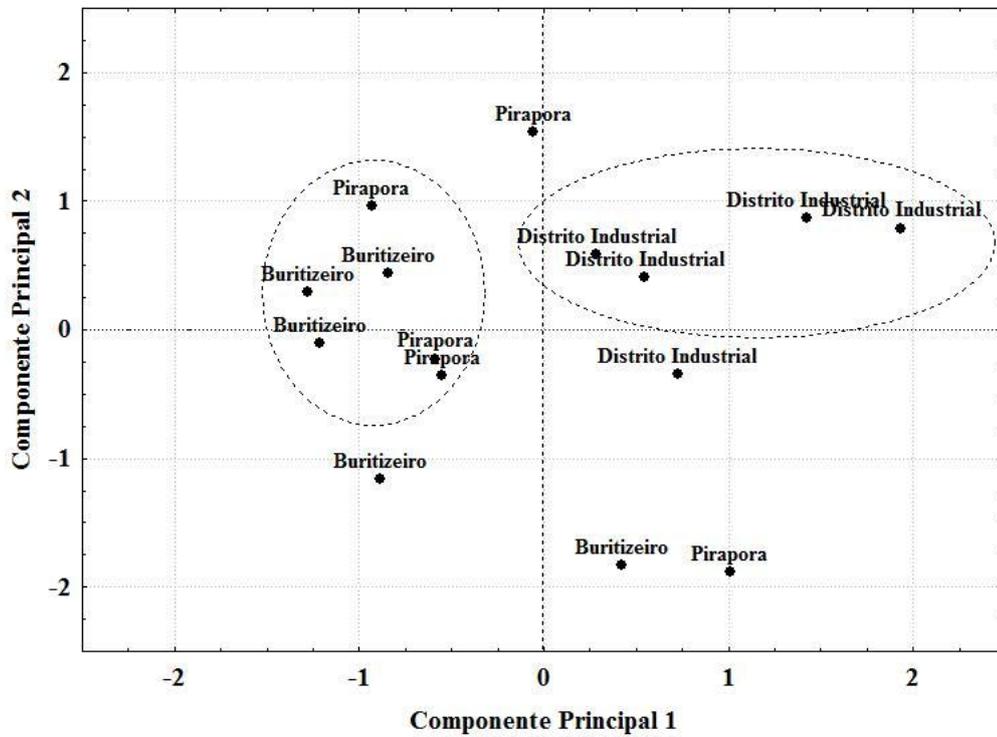


FIGURA 45 - Ordenação dos locais de amostragem segundo resultado do PCA.

Para os testes significativos da ANOVA ($p < 0,05$), o teste de Dunnet¹⁸ (TAB. 9) revelou que o Distrito Industrial teve os maiores valores para área total, área média, diâmetro médio e perímetro médio das partículas. Não houve diferenças significativas entre os locais de amostragem Buritizeiro e Pirapora para nenhum parâmetro mensurado.

TABELA 9 - Resultados da Análise de Variância (ANOVA) dos diversos parâmetros em relação aos locais de amostragem. Valores em negrito teste significativo para $p < 0,05$.

| Parâmetro | ANOVA | | | |
|-------------------------|-----------|----------|---------------|--------------|
| | n | df | F | p |
| Área Total | 15 | 2 | 20,312 | 0,000 |
| Área Média | 15 | 2 | 6,794 | 0,010 |
| Diâmetro Média | 15 | 2 | 8,807 | 0,004 |
| Perímetro Média | 15 | 2 | 10,543 | 0,002 |
| Comprimento Média | 15 | 2 | 3,04 | 0,067 |
| Número Total de Objetos | 15 | 2 | 1,756 | 0,214 |

Os resultados da análise do material particulado mostrados nos testes estatísticos indicam que o programa Quantikov pode ser usado nos estudos de poluição atmosférica por material particulado com sistema de amostragem passivo.

A variável área total apresentou melhores resultados na análise do material particulado quando considerada a distância da fonte de emissão. O comprimento médio e o número total de objetos, por sua vez, não apresentaram variação de acordo com a fonte de emissão. Estes parâmetros parecem funcionar onde as partículas estão mais individualizadas e sem sobreposição, a exemplo dos pontos onde tem-se uma contribuição maior dos particulados naturais originados do processo de ressuspensão de superfície.

Por fim, vale ressaltar que foi possível mostrar a relação entre a precipitação e a quantidade de material particulado na atmosfera.

Do ponto de vista metodológico, o sistema passivo de coleta de material particulado (baixo custo) e a análise dos dados utilizando as imagens no software Quantikov apresentam bons resultados nos estudo da poluição atmosférica, principalmente, naqueles que demandem um monitoramento com maior número de pontos.

7.3. Morfologia e composição química das partículas atmosféricas de origem antropogênica

¹⁸ A comparação "Post Hoc" usando o teste Dunnet foi escolhida pois permite identificar o local de amostragem que apresentou maior tamanho dentre parâmetros analisados que foram significativos para ANOVA.

Os compostos de carbono são predominantes no material depositado na área do DI. Essas partículas de carbono, inicialmente identificadas pelo tamanho e formato mais alongado/geométrico, mostram nesta análise característica em fibras que contribuem para a identificação do material. A grande quantidade dessas partículas sedimentáveis no espaço urbano gera forte incômodo à população, que convive diariamente com a "poeira" de origem industrial em suas residências, principal fator de reclamação da população no que se refere à qualidade do ar. Fuzari e Pereira (2012), em estudo realizado em Vitória-ES, mostram elevados níveis de incômodo apontados pela população que estão relacionados à poluição do ar pela poeira e que apresentam inter-relações com os fatores pessoais, como a avaliação que a população faz da qualidade do ar, a percepção da poeira, a percepção de risco à saúde e a identificação das principais fontes de poluição atmosférica.

As partículas sedimentáveis¹⁹ têm maior importância no entorno da área de emissão, onde a percepção das causas da poluição são mais visíveis e o efeito na degradação na qualidade ambiental é perceptível. Em contraposição, o impacto dessas partículas tem abrangência espacial menor quando comparado com a fração do material particulado, que é transportado por até dezenas de quilômetros. Essas partículas maiores, além de serem perceptíveis pelo processo de deposição seca, afetam o bem estar da população já que são retidas no trato respiratório superior. Neste sentido, a percepção dos efeitos da poluição atmosférica é maior na área industrial.

Das partículas de maior dispersão, a morfologia esférica é, por certo, a aparência correlata do material particulado emitido pelas chaminés (FIG. 46). Essas partículas esféricas são bastante diversificadas quanto ao tamanho, ocorrem em grande concentração e com dimensões variadas (até 100 μm de raio) e foram identificadas em toda a área de amostragem.

Compostos de carbono e esferoidais (FIG. 47) têm presença marcante na área de entorno (1,8km). No entanto, observa-se uma significativa diminuição na quantidade do material precipitado em relação ao DI. São comuns partículas esféricas de 30 μm e é marcante a presença de partículas com raio menor que 6 μm .

Com o aumento da distância da fonte de emissão, as partículas depositadas se diversificam, permitindo visualizar argilominerais (FIG. 48) e identificar pequenos grãos de quartzo (coloração amarelada nas imagens). Em Buritizeiro, há 6,5 km da fonte de emissão, a deposição de partículas (FIG. 49) é bem semelhante ao observado no espaço urbano de Pirapora (4,5 km), partículas esferoidais de diferentes tamanhos são bem visíveis.

¹⁹ ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 3402: Atmosfera – Determinação da taxa de poeira sedimentável total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991

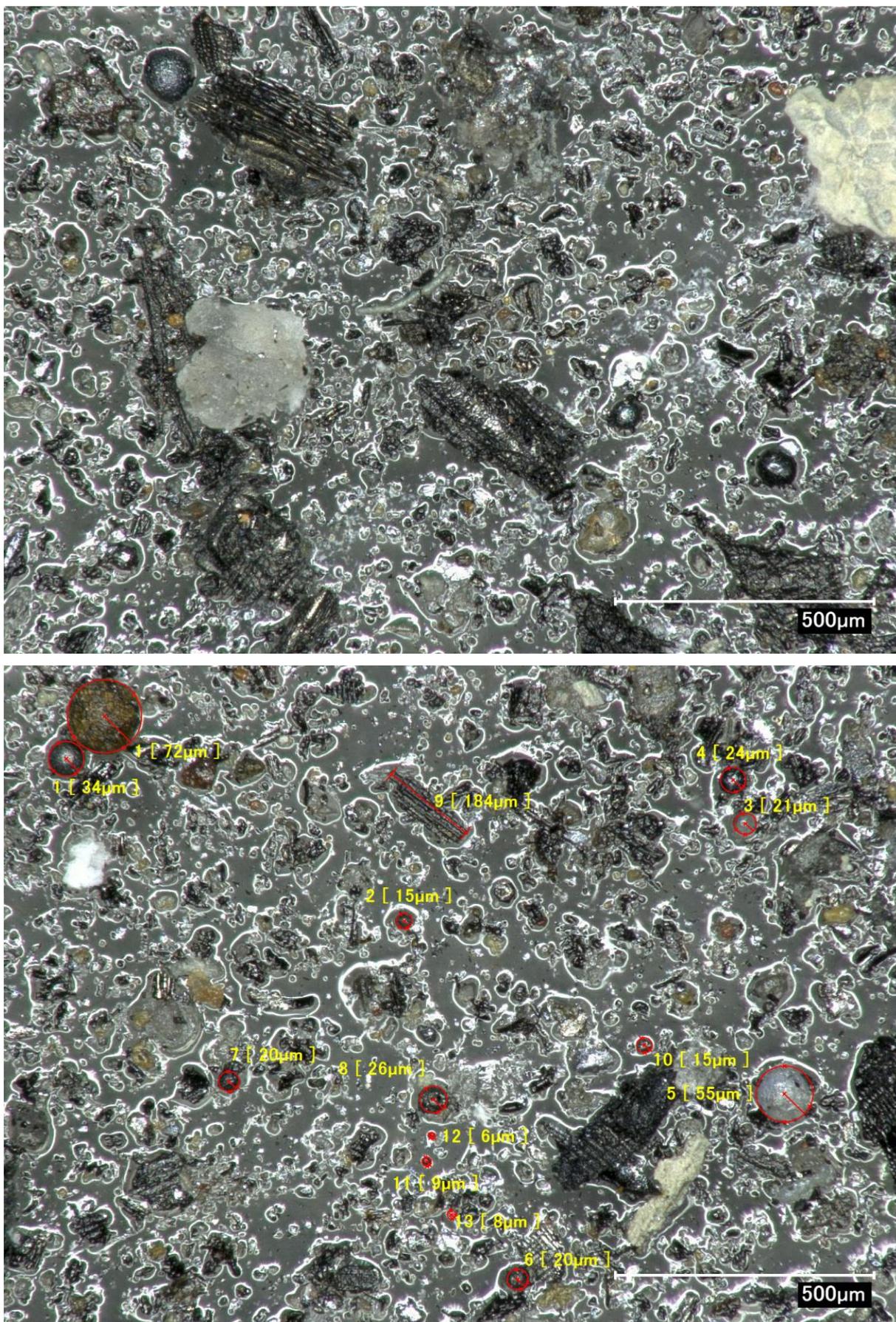


FIGURA 46 - Compostos de Carbono alongados e partículas esféricas (Distrito Industrial - MP01-01). Diâmetro das partículas esférica entre 6 e 72µm

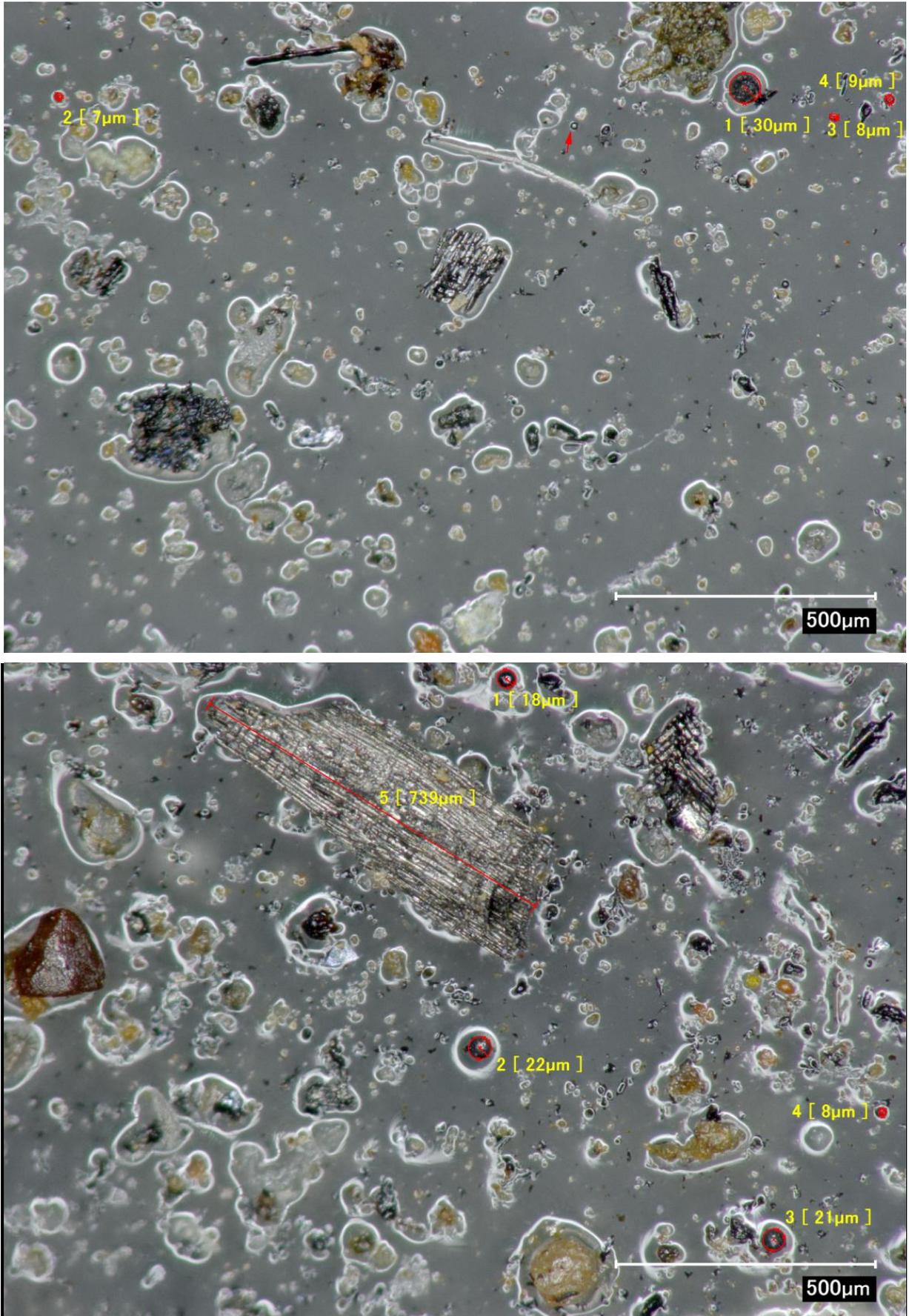


FIGURA 47 - Partículas atmosféricas na área de entorno (MP01-02 - 1,8 km). Menor ocorrência e diâmetro das partículas esféricas.

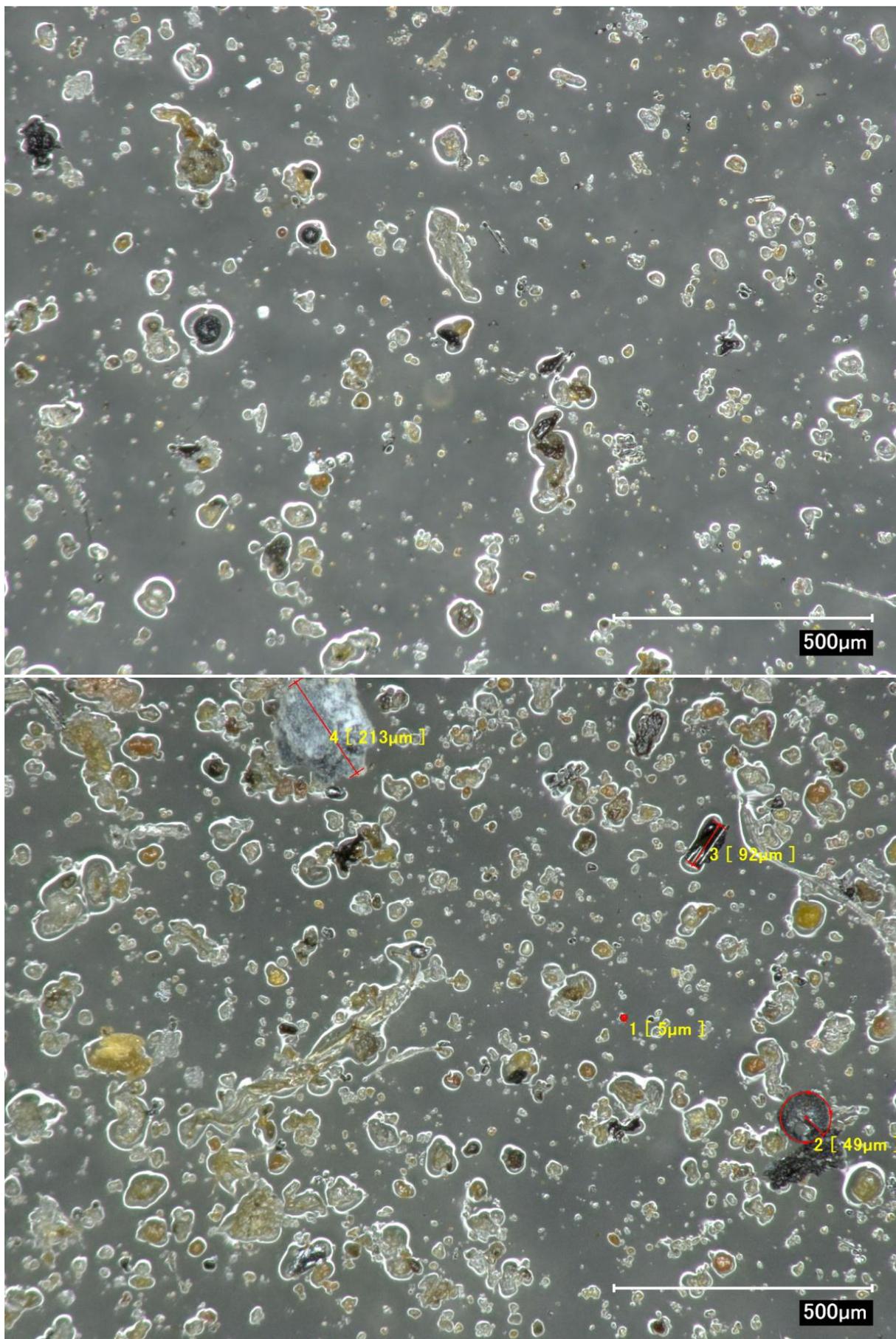


FIGURA 48 - Partículas atmosféricas no centro urbano de Pirapora (MP01-03 - 4,5 km)

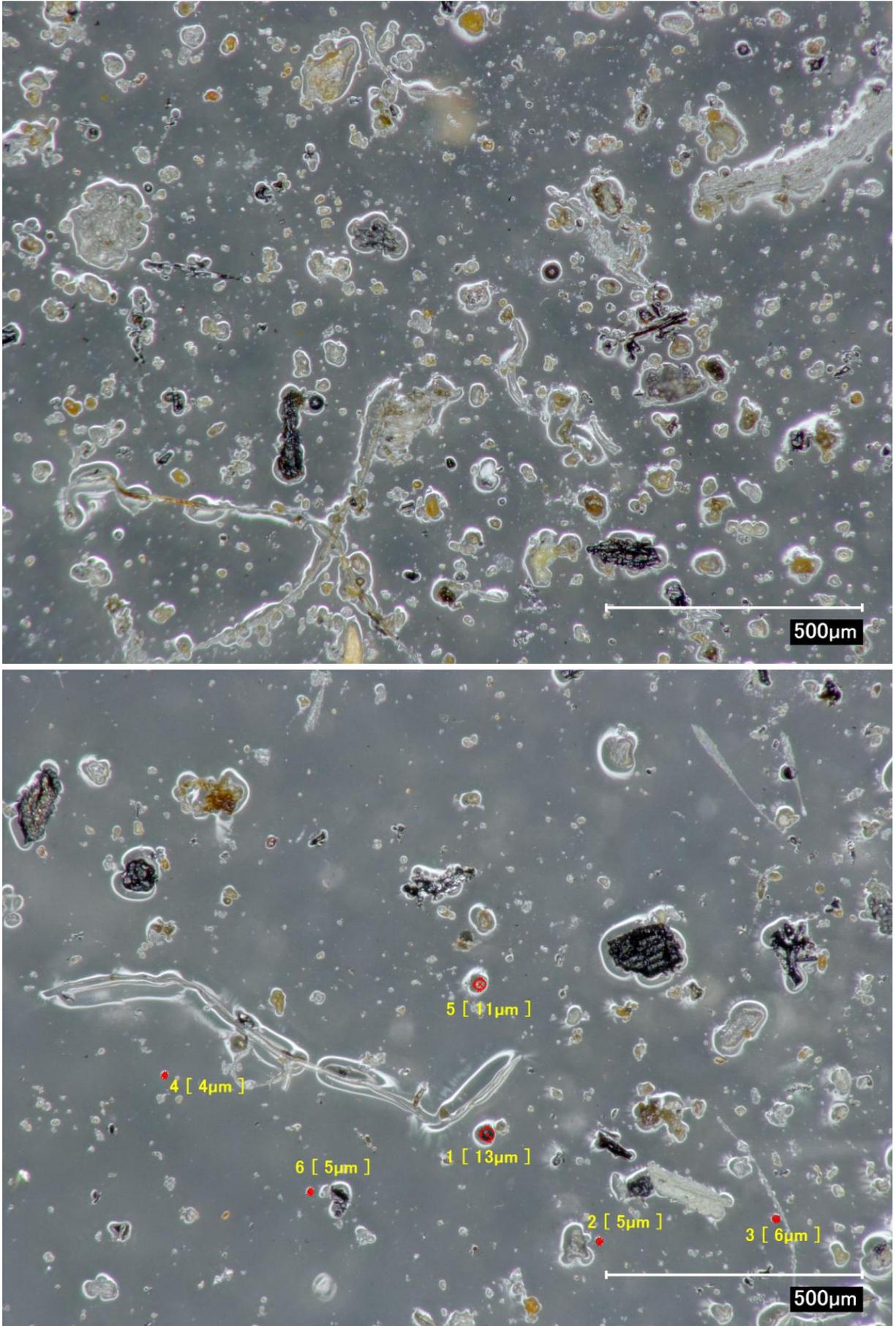


FIGURA 49 - Partículas Atmosféricas na área urbana de Buritizeiro (6,5 km).

A variação no comportamento da pluma de poluentes é refletida na deposição de partículas com tamanhos bastante diferenciados. Fatores como processo de produção (tipo de liga) se somam à velocidade do vento e podem afetar a dinâmica dessas partículas na atmosfera. Do ponto de vista metodológico, as fotos de microscópio óptico funcionam como um primeiro instrumento de identificação. No entanto, as informações são limitadas à quantidade de material e formato. A identificação das partículas de origem industrial foi confirmada com as fotografias 3D e análises microquímica/micrografia.

De posse dos dados químicos, os compostos foram identificados e incluídos em três grupos: material fibroso composto de carbono; as partículas de sílica de origem industrial e partículas orgânicas e/ou sais.

As partículas de carbono (FIG. 50) são as mais visíveis nas amostras do DI, caracterizam-se por aspecto fibroso e poroso. Conforme mencionado, devido ao tamanho são depositadas, principalmente, num raio de 2km de distância da fonte.

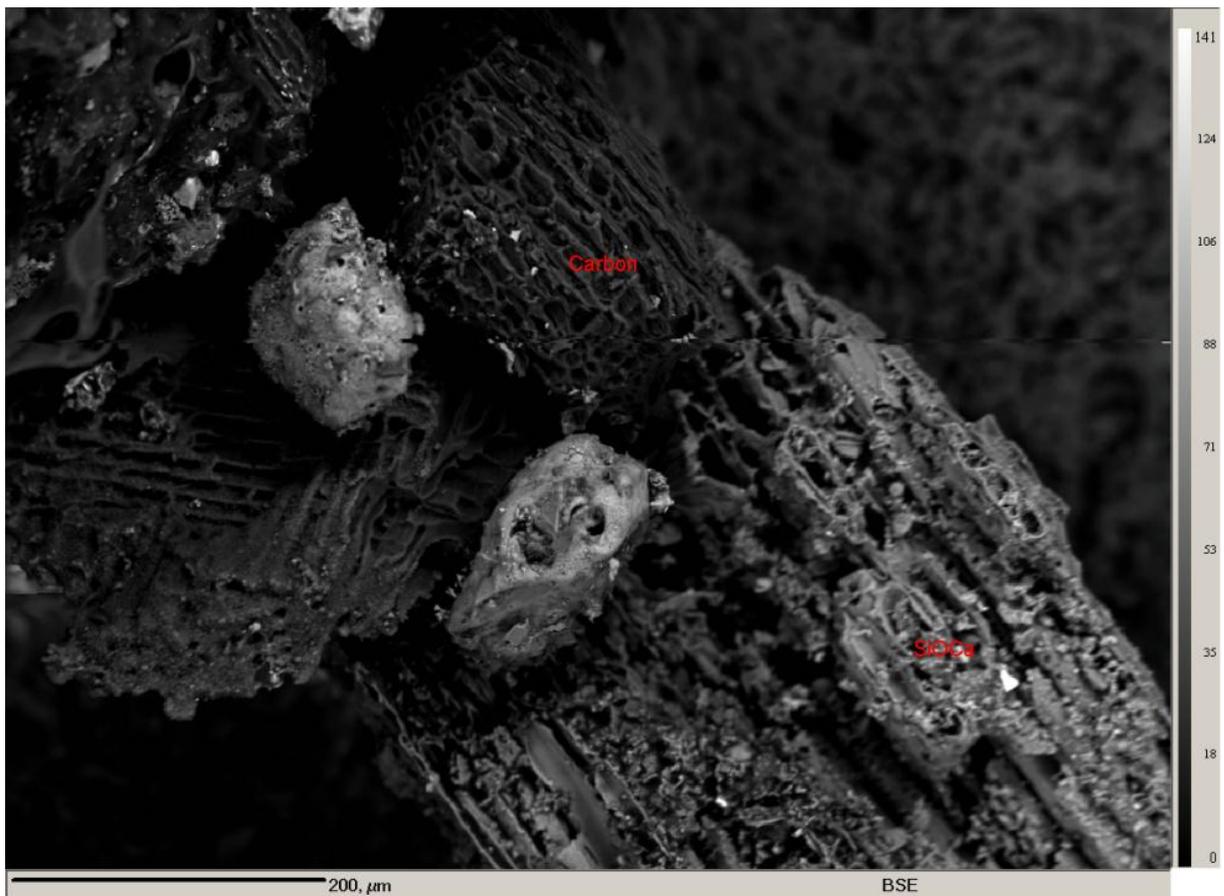


FIGURA 50 - Fotomicrografia mostrando composição e morfologia das partículas de Carbono. Sílica depositada sobre partícula de carbono. (EPMA – A40)

As análises químicas do material particulado emitido mostram um relação (TAB. 10) entre os compostos de carbono e as concentrações de metais pesados.

TABELA 10 - Correlação entre as concentração elemental e quantidade de Silício e Carbono no material particulado.

| | Al | As | Ba | Ca | Co | Cr | Cu | Fe | K | Mg | Mn | Na | Ni | Pb | Zn |
|----|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------|-------------|-------|-------------|
| C | 1,00 | -0,50 | -0,41 | 0,59 | 1,00 | 0,40 | 0,99 | 0,99 | -1,00 | -0,01 | 0,73 | 0,93 | 0,96 | -0,25 | 0,99 |
| Si | -0,97 | 0,70 | 0,18 | -0,77 | -0,96 | -0,61 | -0,99 | -1,00 | 0,97 | -0,23 | -0,87 | -0,82 | -0,99 | 0,47 | -0,94 |

A forte correlação entre as concentrações de carbono (FIG. 51) e os metais foi significativa ($p < 0,05$) para os elementos de maior toxicidade (Co, Cu, Ni, e Zn). Nesses casos, a correlação foi inversa para o Si. Neste sentido, a deposição de partículas ricas em carbono no distrito industrial é uma fonte potencial de metais para os diversos compartimentos ambientais. A relação entre as concentrações dos metais e o carbono pode ser atribuído a presença desses elementos na composição do carvão e/ou a adsorção desses metais pelo carvão durante o processo.

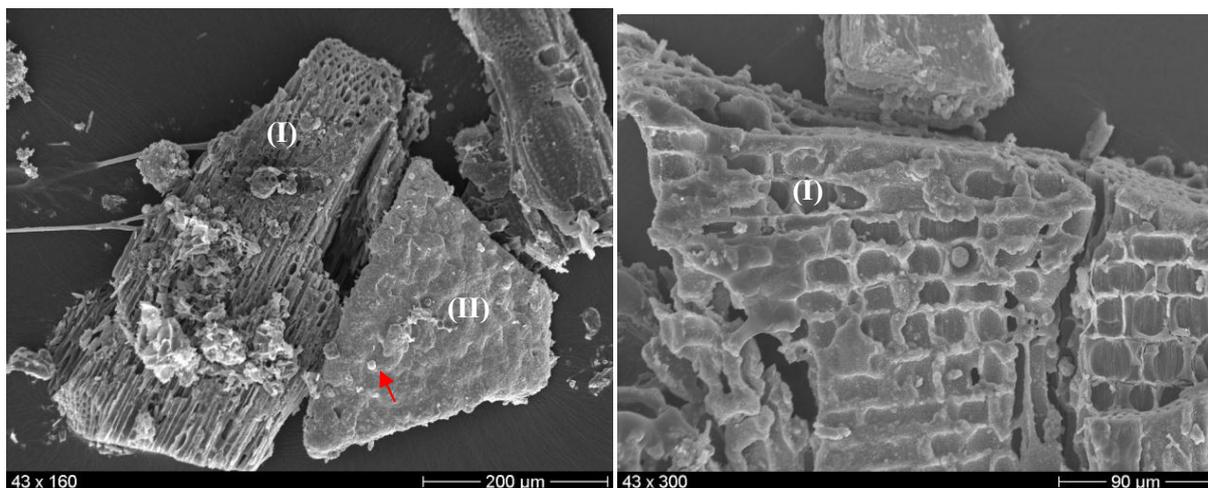


FIGURA 51 - Fotomicrografia de partículas de Carbono(I) e de Sílica (II) ((SEM -EDX - A43). Observar seta indicando partícula esférica sobreposta.

O segundo grupo de partículas, compostos de silício (FIG. 52 e 53), pode ser visualizado em aglomerados que incluem uma grande diversidade de tamanhos e formas (inclusive as esféricas). Foram obtidas medidas de partículas nas dimensões de nanômetros a dezenas de micrometros. Os aglomerados são mais característicos nas amostras coletadas próximo à fonte. Nos pontos mais distantes, as partículas são depositadas com maior individualização.

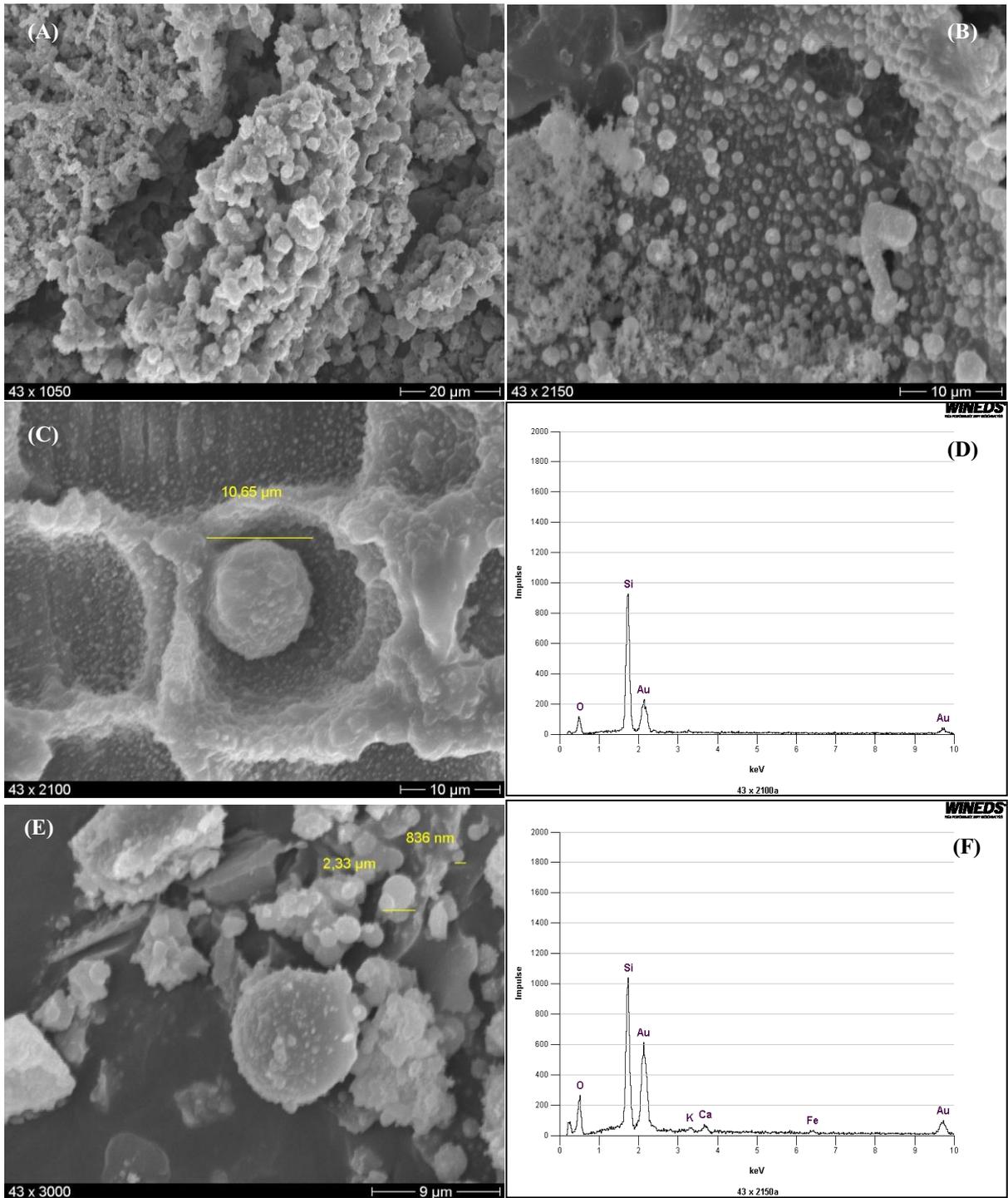


FIGURA 52 - Fotomicrografia (SEM EDX - A43) mostrando a morfologia (A,B), tamanho (C,E) das partículas de silício e composição (D, F). Observar a presença de compostos de Ferro mostrada pelo pico no diagrama F.

As partículas menores, por seu tamanho, têm uma maior capacidade de interação quando depositadas na superfície, principalmente, em contato com as vias respiratórias. Dessa forma, a interferência do material particulado na saúde da população é definida, primeiramente, pelo seu tamanho, que determina qual abrangência no sistema respiratório e/ou pulmonar (SALGADO, 2002).

O segundo aspecto é a composição que determina o grau de toxicidade e os possíveis efeitos imediatos e/ou crônicos na saúde. Quando depositadas em compartimentos como solo e água, a composição destas partículas é o aspecto principal, uma vez que podem liberar contaminantes e comprometer a qualidade ambiental.

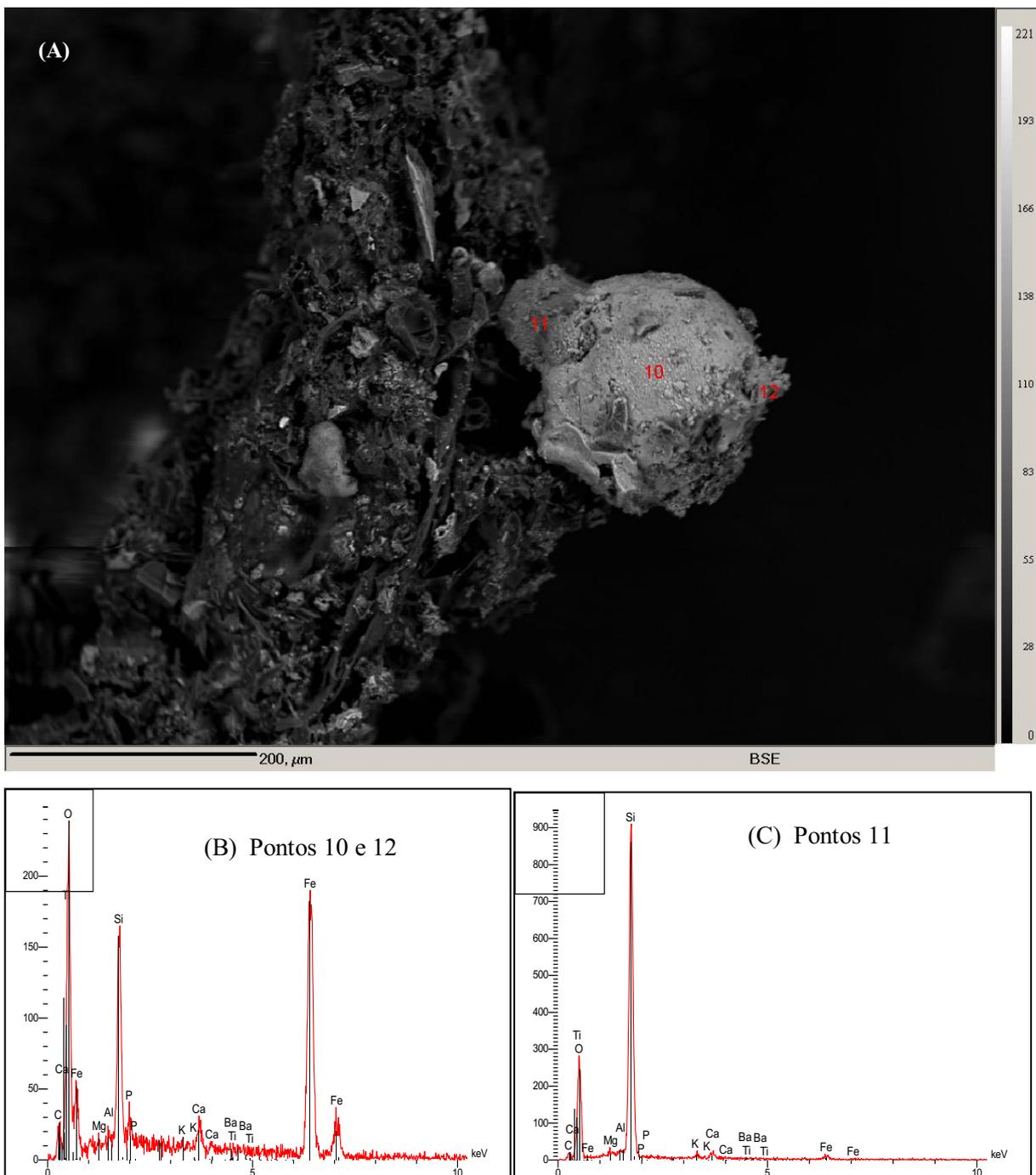


FIGURA 53 - Morfologia(A) e composição química de partículas esféricas. Presença do Ba nas partículas (B,C) com maior concentração de Fe e de Si (Microsonda - A40).

A morfologia esférica (FIG. 54) é típica desse material particulado de origem industrial, é esse aspecto morfológico que contribui com os processos de transporte do material na atmosfera, pois sua aerodinâmica favorece a dispersão.

A análise química evidencia dois tipos de partículas esféricas de sílcio. A primeira, de alta pureza, composta por SiO_2 com picos característicos, e aquelas que incluem em sua composição elementos como Fe, Ba e Cr.

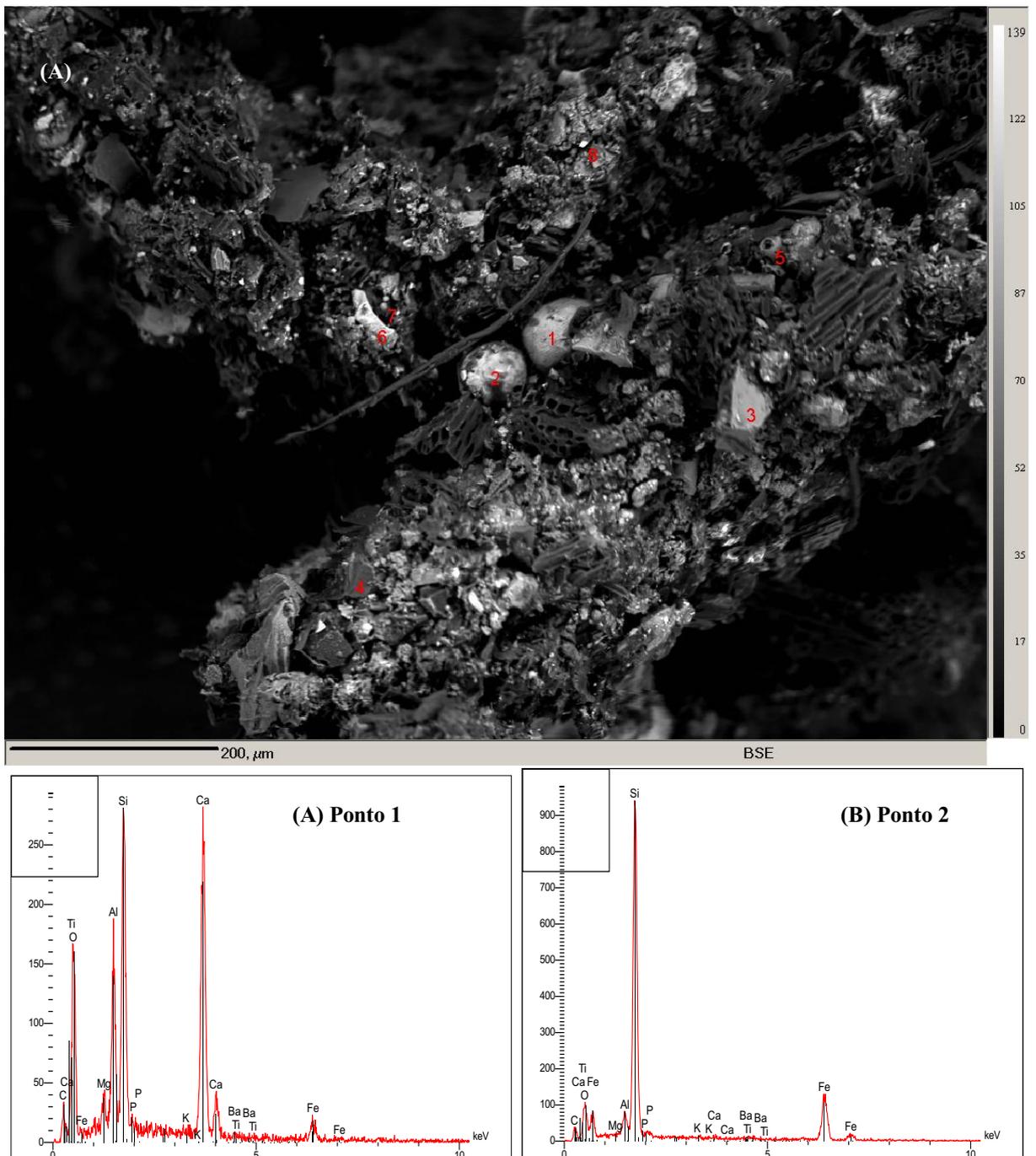


FIGURA 54 - Morfologia (A) e composição das partículas. Espectros dos pontos 1 (B) e 2(C) mostrados na fotomicrografia (Microsonda A 40)

O Ba foi identificado em diversas análises de partículas esféricas (FIG. 54) e está presente no material particulado em concentrações que variam muito, entre 0,7 e 24,3 %. A presença do Ba foi observada em partículas que têm em sua composição principal o Si, bem como naquelas que têm significativa participação do Fe.

Braga (2007), estudando a composição química do solo na área de entorno de atividades metalúrgicas, encontrou altas concentrações de Ba, e destaca que os valores acima do limite de intervenção definido pela CETESB, se deve ao excesso de bário liberado pelas chaminés devido ao sulfato de bário (barita – BaSO_4) utilizado no processo da fábrica.

Dentre os metais pesados, a presença do Cr (FIG. 55) está associada às partículas esféricas, que têm o Ferro como componente principal e o silício como segundo elemento.

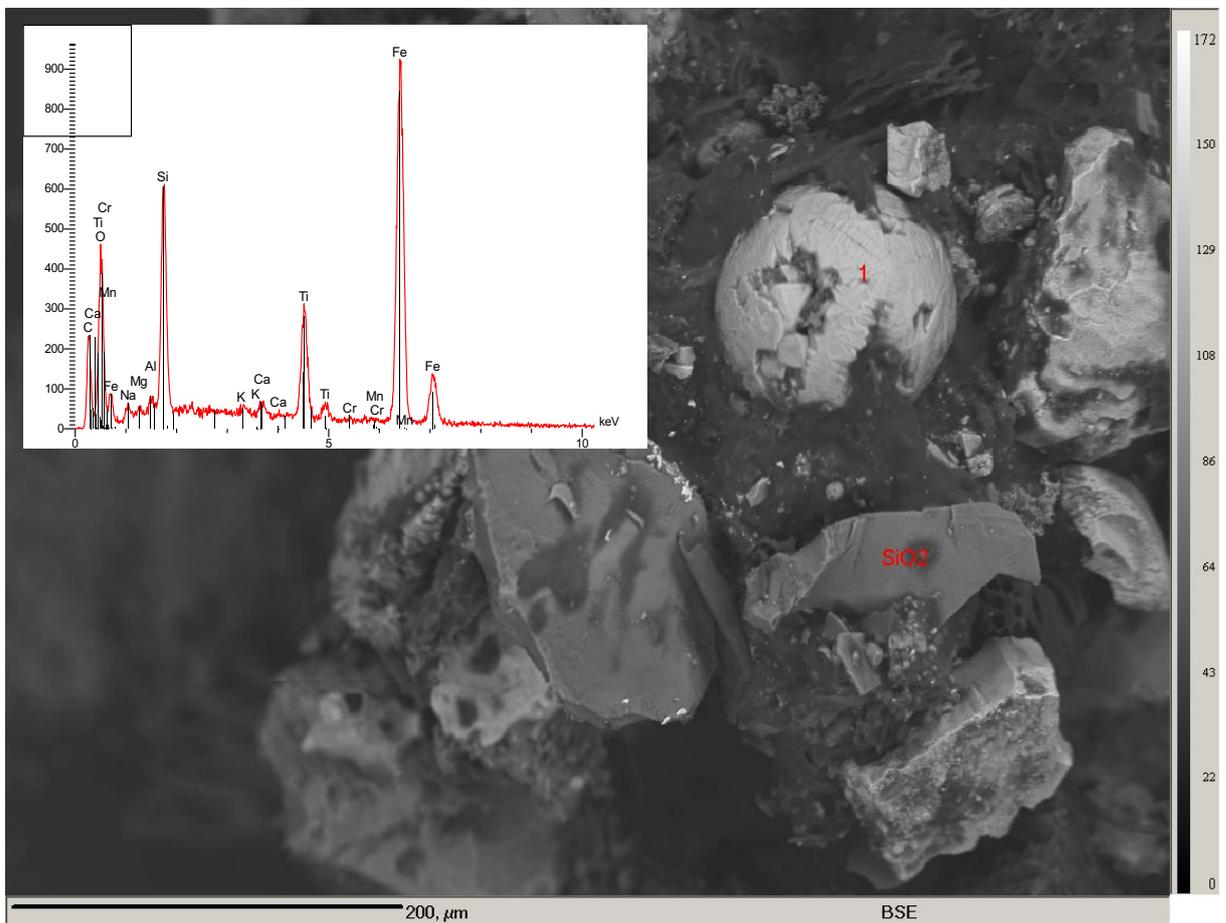


FIGURA 55 - Partículas esféricas de Fe e Cr (Microsonda - A39). Diagrama mostrando elementos do ponto 1 na imagem.

A análise microquímica (FIG. 56) de transmissão reafirma a química das partículas esféricas de origem industrial. A presença de partículas de sílica de alta pureza é bastante comum e está associada aos diversos formatos. Sais e partículas orgânicas também foram identificados e ocorrem em formato arredondado com superfície esponjosa.

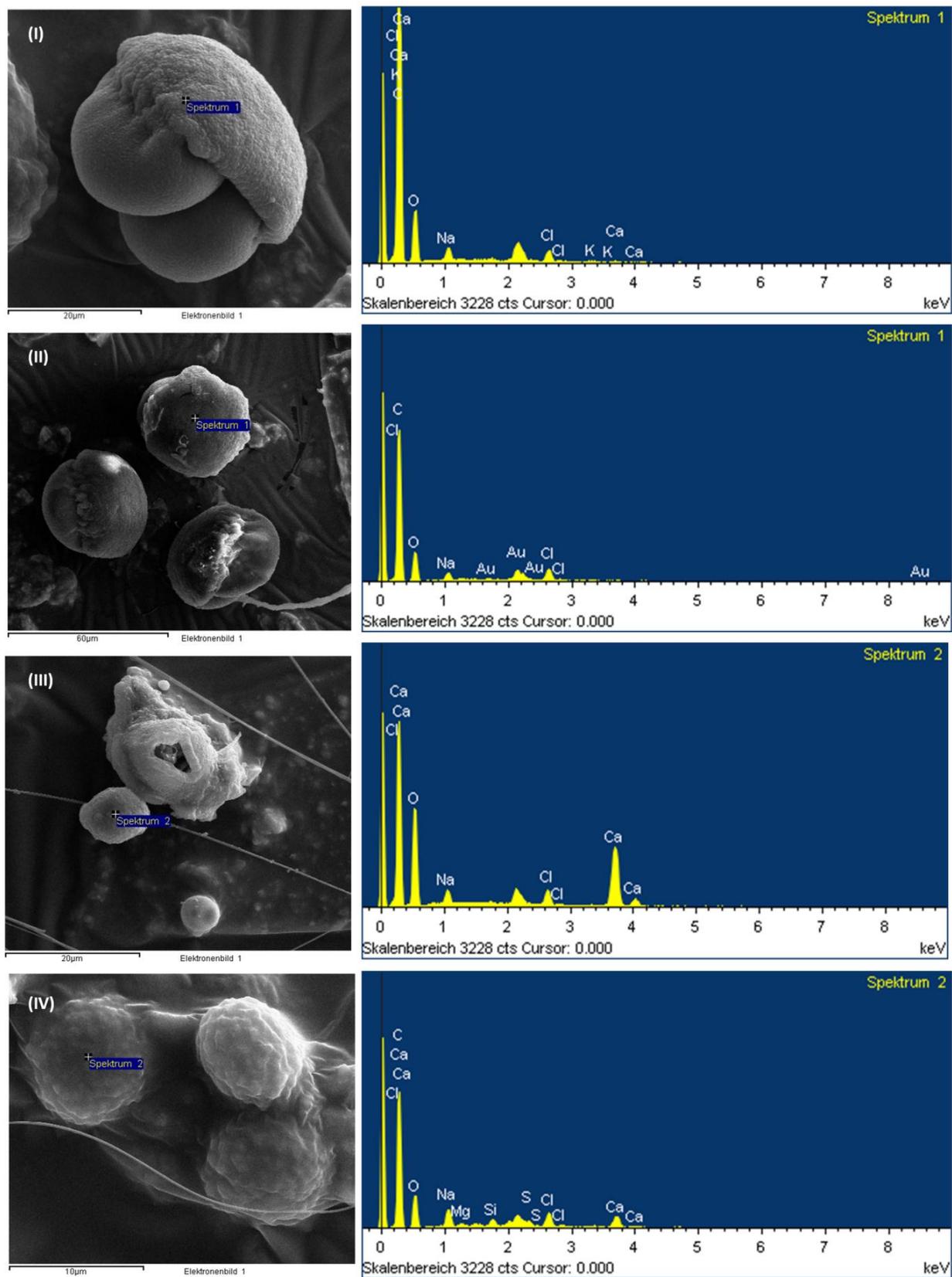


FIGURA 56 - Partículas compostas de sais e os respectivos diagramas. As partículas apresentaram bordas regulares e formas arredondadas compostas por K, Cl, Ca, e Na.

Além da composição elementar, tem-se a presença do metal pesado Cr associado à morfologia esférica (FIG. 57).

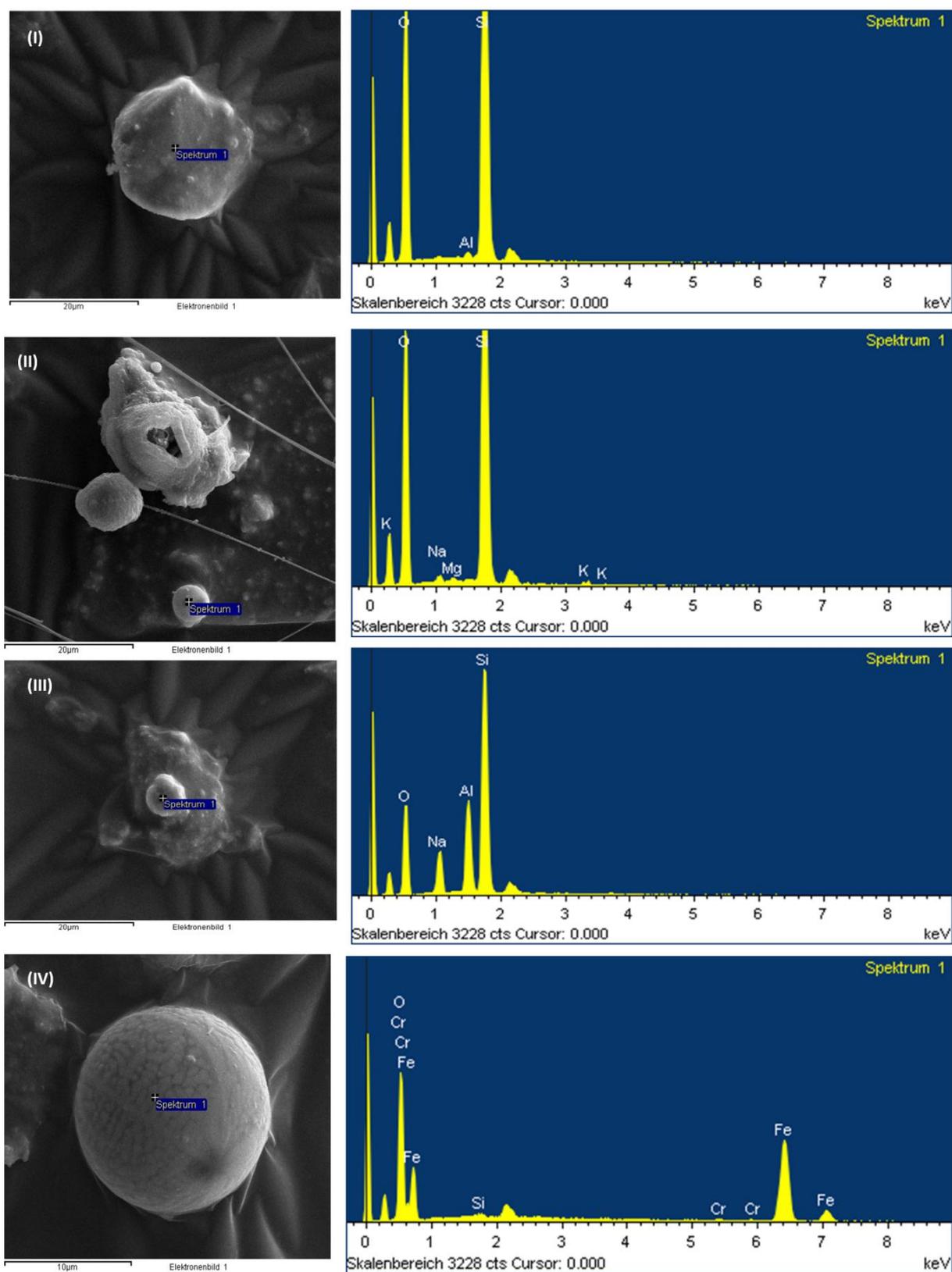
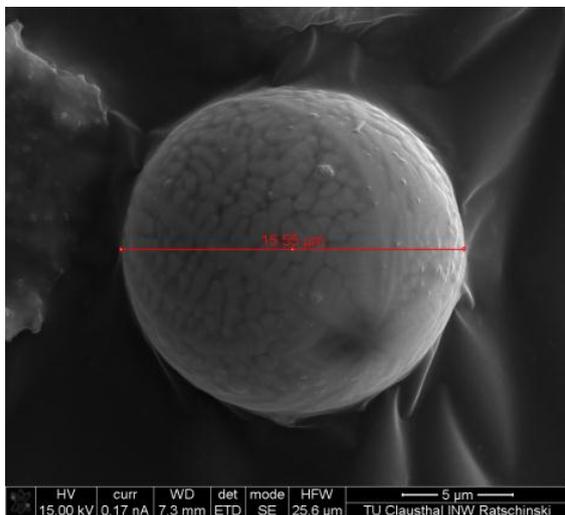


FIGURA 57 - Partículas inorgânicas e origem industrial (I,II,III) e os respectivos diagramas. Morfologia das esferas de Fe e Cr (IV).

As partículas que incluem Cr (FIG. 58) em sua composição foram identificadas em morfologia esférica nas diversas escalas, confirmando a associação desse metal pesado ao material particulado de origem industrial de diferentes tamanhos.



| Elemento | Massa% | Atómos % |
|----------|--------|----------|
| O | 16.83 | 47.50 |
| Si | 0.29 | 0.47 |
| Cr | 0.65 | 0.56 |
| Fe | 63.66 | 51.47 |
| Total | 81.44 | 100 |

FIGURA 58 - Tamanho e composição das partículas esféricas contendo Cromo (TEM - A23).

As partículas esféricas se destacam por dois aspectos principais: primeiro, pela presença do Cr na sua composição e, segundo, devido aos variados tamanhos, incluindo aqueles de dimensão de nanômetros que tem maior risco para saúde humana e maior potencial de dispersão.

Os metais pesados, apesar de ocorrerem geralmente em baixa concentração, despertam uma maior preocupação, pois sua toxicidade é potencializada devido ao processo de bioacumulação. A presença desses elementos em partículas respiráveis amplia o potencial de contaminação, uma vez que elas entram em contato com as mucosas e com a pele (que apresentam grande capacidade de absorção).

Guimarães e Sígolo (2008: 8), estudando a contaminação por metais em sedimentos associados a metalurgia, utilizando o MEV/EDS, detectaram esferas compostas essencialmente por Fe e metais (Cu, Cd, Zn) nos sedimentos. Para os autores, em função de sua morfologia e constituição, tais esferas devem ser resultado dos processos de fundição e associadas diretamente com as escórias de fundição que foram lançadas no Rio Ribeira no período de produção de lingotes de chumbo, pela empresa Plumbum.

A morfologia esférica e a composição química das partículas transportadas pela pluma de poluentes de origem industrial são os aspectos principais do ponto de vista da qualidade

ambiental, pois favorecem a dispersão e ampliam o potencial de contaminação devido à presença do Cr.

7.4. O solo como compartimento ambiental receptor: avaliação das concentrações de Metais Pesados.

A deposição das partículas atmosféricas na superfície ocorre nos diversos compartimentos ambientais, dentre eles, os solos, onde as partículas podem se acumular e liberar seus compostos. A entrada das partículas em um ambiente diferente das condições de origem e da atmosfera onde foram transportadas desencadeia processos de alteração desses compostos e a consequente liberação dos elementos constituintes.

A presença de metais pesados na composição química do material particulado emitido dentro das partículas atmosféricas transportadas que são depositadas na superfície pode aumentar as concentrações totais e/ou disponíveis dos metais pesados no solo.

A capacidade de retenção de compostos nos solos indica ser este o compartimento ambiental onde será possível perceber a alteração causada pela constante emissão de poluentes atmosféricos na área de estudo.

Neste tópico é apresentada uma avaliação das concentrações de metais pesados no solo (TAB. 11) da área afetada pela circulação da pluma de particulados emitidos pela indústria, considerando a variação das concentrações em relação a distância do Distrito Industrial (DI). Os resultados são apresentados para os pontos de amostragem localizados no ambiente rural, a 2,8km (MP02-01); 6,9km (MP02-04); 12,9km (MP02-05); 14km(MP02-06) e 21,7km (MP02-07) de distância da área de emissão do Material Particulado, o DI.

Um dos componentes importantes do material particulado emitido pelas atividades industriais, o Ferro (Fe), se destaca por apresentar os maiores valores totais, em geral, e no ponto mais próximo da área de emissão. As maiores concentrações no ponto MP01-01/2,8km) mostra a contribuição do Fe presente no material particulado.

O Cádmio (Cd) tem valores abaixo do limite de detecção do método (ICP-OES; 0,0006ppm) em todos os pontos de amostragem. Este resultado está de acordo com a composição química do material emitido e os materiais usados no processo que também apresentaram concentrações de Cd abaixo do limite de detecção (LD), nas análises por ICP/OES.

TABELA 11 - Metais Pesados - concentrações e avaliação da qualidade ambiental

| | | | | | Concentrações de Metais Pesados no Solo (ppm) | | | | | | | | | | |
|-----------|--------------|-------------------|------------------|------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | | | | | Cr | Fe | Co | Cu | Cd | Ni | Zn | Ba | Pb | Ti | |
| | | | | | LD | 0,0038 | 0,0019 | 0,0014 | 0,0007 | 0,0006 | 0,0243 | 0,0014 | 0,001 | 0,0133 | 0,0015 |
| Amostra | Classe Solo* | Distância DI (km) | Direção Pluma(%) | Uso da Terra | | | | | | | | | | | |
| MP02 - 01 | LVA | 2,8 | NNW | Cerrado | 60,1 | 49360,0 | <LD | 29,5 | <LD | <LD | 15,6 | 24,2 | 25,9 | 116,1 | |
| MP02 - 04 | LVA | 6,9 | W | Agropecuária | 27,2 | 13200,0 | <LD | 6,4 | <LD | <LD | 3,9 | 14,1 | 24,7 | 64,8 | |
| MP02 - 05 | LV | 12,9 | NE | Agricultura | 47,2 | 30710,0 | <LD | 11,0 | <LD | 2,79 | 12,5 | 49,1 | 30,1 | 60,1 | |
| MP02 - 06 | RQ | 14 | WNW | Cerrado | 15,1 | 11315,0 | <LD | 1,6 | <LD | <LD | 8,8 | 12,3 | 20,7 | 84,6 | |
| MP02 - 07 | RQ | 21,7 | WSW | Agropecuária | 11,6 | 9665,0 | 0,57 | 3,7 | <LD | <LD | 4,5 | 34,3 | 20,3 | 66,8 | |
| | | | | VRQ | 75 | _ | 6 | 49 | <0,4 | 21,5 | 46,5 | 93 | 19,5 | | |
| | | | | VP | 75 | _ | 25 | 60 | 1,3 | 30 | 300 | 150 | 72 | _ | |
| | | | | VI - Agrícola | 150 | _ | 35 | 200 | 3 | 70 | 450 | 300 | 180 | _ | |
| | | | | VI - Residencial | 300 | _ | 65 | 400 | 8 | 100 | 1000 | 500 | 300 | _ | |
| | | | | VI - Industrial | 400 | _ | 90 | 600 | 20 | 130 | 2000 | 750 | 900 | _ | |

*LVA - Latossolo Vermelho Amarelo

LV - Latossolo Vermelho

RQ - Neossolo Quartzarênico

**COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011 -

Valores de Referência de Qualidade dos Solos para o Estado de Minas Gerais

VRQ-Valores de Referência de Qualidade

VP-Valores de Prevenção / VI - Valores de Investigação

VI- Valores de Intervenção

As concentrações de Ti apresentaram diferença quando se compara os valores do MP02-01 (116,1ppm) com a média dos demais pontos (69,1ppm) mostrando um aumento na área próxima do DI. O Ti está presente do material particulado na forma de óxidos mostrados nas análises de FRX. Trindade (2010, p. 72) encontrou valores elevados também em amostras de sedimento do Rio São Francisco, a jusante da localização da indústria em questão. Baggio (2008) aponta a presença de titânio(1,6%) em argilitos na área de estudo.

Valores abaixo do limite de detecção (0,0014) são observados para o Co, em 4 pontos de amostragem. Somente no ponto MP02-07, o mais afastado do distrito industrial, o Co apresentou concentração de 0,57ppm.

O Ni mostra comportamento semelhante ao Co, com concentrações abaixo do limite de detecção (0,0243) em 4 pontos. Para este elemento, tem-se concentração de 2,79 ppm no ponto MP02 - 05, localizado a 12,9 km da área de emissão.

O comportamento do Co e do Ni indica que estes elementos possuem fontes específicas diferentes da emissão industrial pois as as concentrações desses elementos no material emitido pela indústrias eram baixos.

As concentrações de Zn variaram entre 3,9 e 15,6 ppm (MP02-01) e para o Cu, os valores determinados nas amostras estão entre 1,6 e 29,5ppm. Esses dois elementos apresentam comportamento semelhante, com as maiores concentrações na amostra do ponto MP02 - 01, mais próximo ao DI e a segunda maior concentração ocorre MP02 - 05, localizado a 12,9 km da área de emissão.

Com relação ao ponto MP02-05, destaca-se que, nesta área, são desenvolvidas atividades agrícolas (fruticultura) que podem contribuir com as concentrações de Zn e Cu. Além dos elementos citados, este foi o único ponto onde foi quantificado o Ni, também comumente associado a agricultura na região. A presença dos três elementos (Ni, Zn, Cu) neste ponto é um indicativo de que as concentrações dos metais neste local pode estar associada ao uso de agroquímicos uma vez que estes elementos são comuns em sua composição (MALAVOLTA et al, 2006).

O Pb ocorre em concentrações médias ~20ppm em todos os pontos de amostragem. Não foi observada nenhuma variação em relação a localização relativo ao DI, no entanto observou-se uma concentração mais elevada (+ 5ppm) no MP02 - 05.

As concentrações de Ba variam entre 12,3 e 49,1, sendo que o maior valor foi encontrado no ponto MP02-05. Não foi possível observar uma correlação entre concentrações no solo e os altos teores no material emitido (≈ 3000 ppm). Talvez isso ocorra devido a uma solubilização na forma de carbonatos e/ou cloretos e assim a sua remoção e redução rápida.

Esse processo de remoção aponta para um maior risco quando este elemento está suspenso nas partículas na atmosfera.

Dentre os elementos analisados, o Cr é o metal pesado que apresenta uma relação mais clara com as emissões industriais, pois apresenta alta concentração (60,1 ppm) no ponto MP02- 01, perto da fonte com redução de concentração com a distância (11,6ppm - 21,7km). Também foram encontrados altos valores no material típico emitido (partículas esféricas de origem do processo de queima).

A maior concentração no ponto mais próximo do distrito industrial mostra que este elemento vem sendo adicionado ao solo pelas partículas atmosféricas, e especialmente nas áreas de precipitação de partículas maiores. Vale ressaltar, que no ponto mais próximo da emissão não foram identificadas outras atividades que podem contribuir com o aumento das concentrações de Cr. Neste local, observa-se que a vegetação nativa (FIG. 59) encontra-se em regeneração com espécies arbustivas e arbóreas bem desenvolvidas. O avançado estágio de regeneração da vegetação indica que não estão sendo desenvolvidas atividades potencialmente poluidoras na área que poderiam vir a ser uma fonte de Cr para o solo.



FIGURA 59 - Ponto de amostragem localizado a 2,8 km do distrito industrial. Em sequência, vista da pluma de poluentes particulados a partir ponto de amostragem (A) e a vegetação na área de coleta das amostras de solo (B).

O segundo maior valor de Cr foi observado no MP02-05, onde tem-se a fruticultura. As concentrações de metais pesados neste ponto indicam uma possível fonte local de entrada de metais já que está não é a direção preferencial de circulação da pluma, não justificando os valores mais elevados que aqueles obtidos no MP02-04, localizado a 6,9 km do distrito industrial e na direção preferencial da pluma.

7.4.1. Avaliação ambiental das concentrações de metais no solo

Para avaliação da qualidade ambiental do solo foram considerados os valores de referência de qualidade dos solos estabelecidos pela COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011²⁰ e as definições da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02, de 08 de setembro de 2010.

Na avaliação ambiental foram considerados os três padrões de referência:

- Valor de Referência de Qualidade (VRQ): é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos.
- Valor de Prevenção (VP): é a concentração de determinada substância no solo, acima da qual podem ocorrer alterações da qualidade do solo quanto às suas funções principais.
- Valor de Investigação (VI): é a concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado. Para este limite são definidos 3 padrões, um para cada uma das classes de uso do solo (Agrícola, Residencial e Industrial).

Todas as concentrações dos elementos analisados - Cu, Cr, Co, Ni, Zn e Pb- os valores estão abaixo do limite mais restritivo, o VRQ.

Apesar das concentrações dos metais analisadas atenderem a exigências da legislação ambiental, é importante destacar que os valores mais elevados no ponto mais próximo do distrito industrial (MP02-01) e naquele onde pratica-se a fruticultura (MP02-05), alerta para alterações associadas a poluição pelo material particulado e indica as atividades agrícolas como provável fonte de poluição por metais pesados no MP02-05.

Ademais, a presença do Cr em partículas esféricas industriais e os altos valores de Cr e Fe na amostra de solo do ponto mais próximo da área de emissão confirma a contribuição do material particulado atmosférico nas concentrações destes elementos na superfície.

É importante destacar que existe um risco ambiental maior associado a presença desse material particulado, que inclui partículas de Cr e Ba, que são respiradas pela população que vive na área rural e urbana de Pirapora e Buritizeiro.

²⁰ Conferir: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>

Estudo realizado por Mendonça, Magalhães e Fonseca (2015), na região de Pirapora discute a possível relação entre as atividades das metalúrgicas e a saúde da população exposta a esses poluentes. Para tanto, foi utilizado como parâmetro principal os diagnósticos de Doenças do Aparelho Respiratório–DAR's em dois momentos distintos. Para os autores, comparando os anos de 2010 e 2011 em termos absolutos, houve uma redução nos casos de Doenças do Aparelho Respiratório - DAR's de 19%, fato que pode estar relacionado com o volume de poluentes atmosféricos emitidos pelo Distrito industrial de Pirapora no período avaliado. No supracitado trabalho, é ressaltado que embora os resultados apontem para uma possível correlação entre o número de fornos funcionando (ligados) e o percentual de indivíduos com DAR's nas duas Unidades Básicas de Saúde (UBS's) pesquisadas, sugere-se que novos estudos sejam realizados, sobretudo, envolvendo um maior número de variáveis, pois outros fatores, incluindo os de ordem sazonal, podem contribuir para a presença de DAR's entre os indivíduos que recorreram às referidas UBS's.

Muito embora os resultados para os solos sejam preliminares e incluam poucas amostras, tem-se um encaminhamento para pesquisas tanto na temática ambiental como acerca da saúde da população. Estudos mais detalhados nessa área de influência das emissões industriais devem ser realizados, inclusive em outros compartimentos ambientais como a vegetação, nas quais podem ser observadas em campo necrose foliar onde ocorre o acúmulo de material particulado de origem industrial na superfície.

7.4.2. A poluição atmosférica por material particulado e a alteração da qualidade ambiental

O mapeamento²¹ (FIG. 60) mostra as duas áreas de maior impacto associado a poluição atmosférica. São discutidos dois mapeamentos, a esquerda baseado nos dados químicos de solos e o da direita, baseado no monitoramento de particulados na atmosfera. Foi necessário realizar dois tratamentos das informações uma vez que não foi possível fazer a análise química de solos da porção Sul e Sudoeste da área de estudo, pois se trata do espaço urbano, o que impossibilitou a coleta das amostras de solo. No entanto essa área é bastante afetada pela circulação de particulados na atmosfera, conforme foi descrito nos capítulos 5 e

²¹ O quadrante desse mapa resultou da krigagem dos dados dos pontos de amostragem.

6, isso pode ser visualizado no mapa a direita que mostra as zonas de alteração da qualidade ambiental baseado nas informações do monitoramento de particulados na atmosfera.

O mapa a esquerda, baseado nos dados de metais no solo na área rural, mostra que as concentrações mais elevadas de metais ocorre na porção norte-nordeste. Esta área corresponde a área de deposição de particulados mais próxima do DI (MP02-01/NNW) e na do projeto agrícola de fruticultura (MP02-05/NE); nestes locais os metais Cr e Fe apresentaram maior diferença nas concentrações quando comparados com os valores dos demais pontos (FIG. 60).

A alteração da qualidade do solo em função das concentrações de metais pesados parece está associada ao material particulado somente na parte norte, mais próxima ao DI, onde ocorre a maior deposição de particulados de origem industrial. Já a porção NE corresponde a uma área com outras fontes (pulverização agrícola por exemplo) de poluição que podem ter contribuído para esta alteração, o que dificulta o estabelecimento de uma relação com as partículas depositadas.

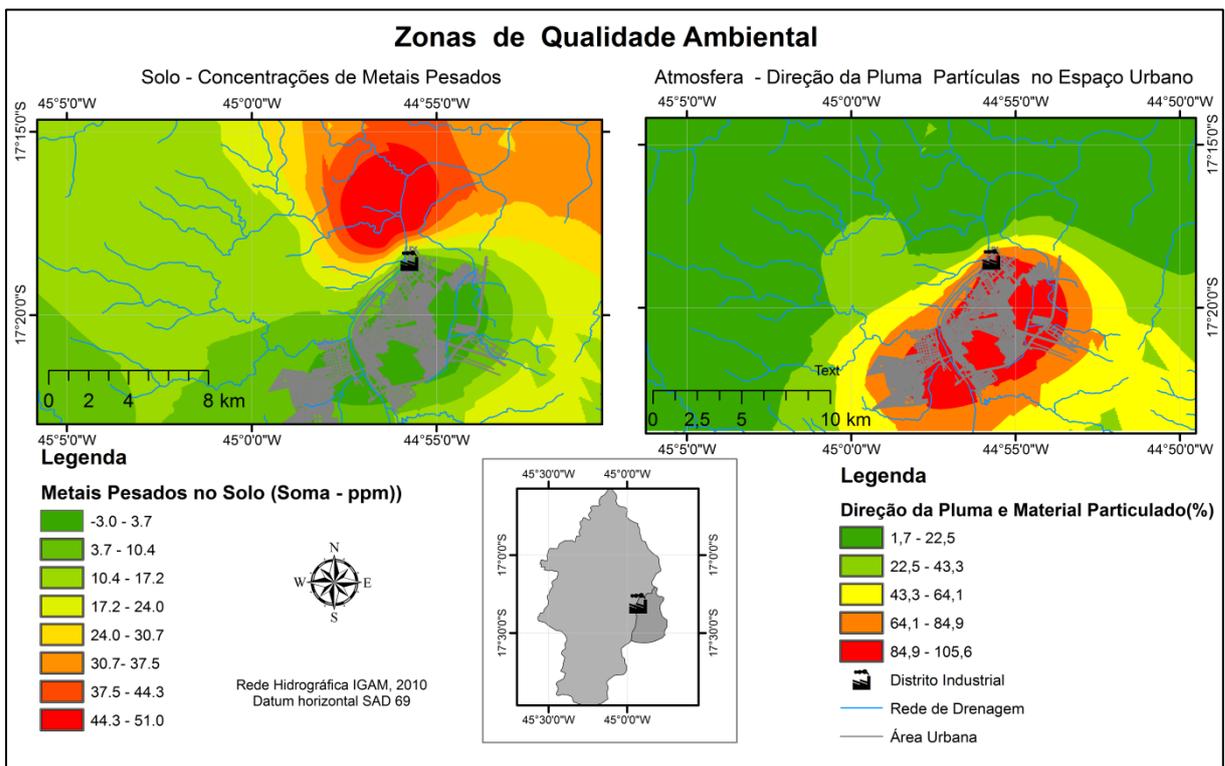


FIGURA 60 - Mapas das zonas de alteração da qualidade ambiental.

O mapa a direita, elaborado a partir dos dados de circulação da pluma e das partículas no espaço urbano, permite apontar a porção sul-sudoeste do distrito industrial como a área de

maior risco ambiental devido a maior quantidade de partículas, o que diminui com o distanciamento da área de emissão, da tonalidade do vermelho ao amarelo no mapa.

O espaço urbano e a rural a NNW , adjacentes ao DI, são objetos de interesse pois retratam o potencial de impacto da poluição atmosférica na região, seja devido a presença das partículas na atmosfera ou por sua deposição nos compartimentos ambientais receptores onde estas se depositam.

Os resultados para Cr e Fe se apresentam como uma resposta inicial para uma das perguntas dessa pesquisa pois as alterações são compatíveis com área de maior influencia da pluma de particulados e a presença desses elementos no solo pode ser um indicativo da liberação de contaminantes no solo de origem das partículas depositadas nas plantas e diretamente sobre o solo.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A poluição da atmosfera tem como marco a revolução industrial, contexto em que intensificaram as emissões de poluentes e a degradação da qualidade ambiental. Inicialmente, os conceitos de diluição e dispersão justificaram a disposição desses efluentes nos diferentes compartimentos ambientais.

As emissões atmosféricas sem nenhum tratamento levaram a eventos de poluição com alta mortalidade e seguem como um problema nos países subdesenvolvidos. As chaminés funcionaram por muito tempo como o único mecanismo de controle da poluição nos centros urbano-industriais, dispersando os poluentes para outras áreas.

No entanto, a atmosfera funciona como ambiente transitório dos poluentes que em algum momento retornam à superfície, pela precipitação seca ou úmida. Neste sentido, as consequências da poluição atmosférica podem ser observadas em diferentes escalas espaciais e temporais, como resposta ao tipo e quantidade de material lançado atmosfera condicionado pelo comportamento dos ventos na superfície.

Na região de Pirapora, as emissões de material particulado pelas indústrias metalúrgicas geraram durante décadas questionamentos acerca do risco ambiental associado à circulação da pluma de poluentes.

A circulação dos ventos e a geomorfologia regional são determinantes na dispersão dos poluentes preferencialmente para o quadrante oeste. A variação da velocidade e direção dos ventos associada às barreiras orográficas determina a circulação dos particulados em dois corredores geomorfológicos de orientação Nordeste/ Sudoeste e Leste/Oeste. A porção sudoeste do Distrito Industrial é objeto de maior atenção, pois além de ser caminho dos poluentes, inclui as áreas urbanas de Pirapora e Buritizeiro, expondo a população aos possíveis efeitos dos particulados **(1)**.

O material particulado emitido caracteriza-se por sua composição principal de sílica (95,52%) de fase amorfa e concentrações de metais como Zn (74,6ppm), Cu(28,8ppm), Pb (19ppm), Cr (33,3ppm) e Ni (7ppm). A faixa de tamanho varia entre 0,18 e 123 μm , das quais 95% são partículas menores que 50 μm , as Partículas Totais em Suspensão (PTS). O material de maior risco inclui 30% do material particulado, são as partículas inaláveis menores que 10 μm **(2)**.

Compostos de carbono, de dimensões milimétricas, apresentaram maior ocorrência na área de emissão e nos pontos mais adjacentes ao distrito industrial (1,8km) **(3)**.

A morfologia esférica é a principal característica das partículas de origem industrial, sendo identificadas em todos os locais amostrados, até a distância máxima monitorada 21,7 km. A composição dessas partículas inclui o Si, Fe, Ba, Ti e o Cr. A presença de elementos como o Cr sinaliza para os efeitos que esta poluição pode ter a longo prazo na saúde humana ou nos compartimentos ambientais devido à liberação desses compostos quando precipitadas **(4)**.

Dos compartimentos ambientais que funcionam como receptores desse material, os valores encontrados para Cr e Fe, consideravelmente mais elevados na amostra de solo do ponto mais próximo da área de emissão industrial, evidencia a contribuição do material particulado no aumento das concentrações desses elementos no ambiente **(5)**.

Considerando a legislação ambiental, as concentrações de metais pesados nos solos atendem aos limites ambientais. No entanto, há de se considerar que as concentrações mais elevadas na área mais próxima do distrito industrial podem ser relacionadas com a atividade industrial uma vez que nas demais amostras, para a mesma classe de solo e contexto geológico apresentaram concentrações menores **(6)**.

É importante que sejam feitos estudos em casa de vegetação que ajudem a elucidar a questão da liberação de contaminantes a partir do material particulado atmosférico de origem industrial. Além disso estudos em águas superficiais (e da chuva) poderão corroborar com o entendimento sobre essa liberação de contaminantes. Cabe aqui também a atuação do Comitê de Bacias Hidrográficas locais e Regionais no sentido de contribuir com a conservação ambiental na área.

A morfologia esféricas das partículas, a porcentagem de fração inalável e a presença de compostos de alta toxicidade como o Cr alertam para os possíveis efeitos na saúde humana.

A circulação da pluma com direção preferencial para a área urbana dos municípios de Pirapora e Buritizeiro, deve ser um aspecto considerado pelos órgãos ambientais e de saúde, pois transporta o material particulado de origem industrial que pode comprometer a qualidade ambiental e de vida da população, aproximadamente 85 mil habitantes, conforme estimativa do IBGE (2016).

Vale ressaltar que a presença do cromo em partículas respiráveis oferece maior risco à saúde da população, já que este elemento, na sua forma hexavalente, produzido por processos industriais, é altamente tóxico; e quando está presente no corpo humano, pode causar diversas doenças respiratórias, além do câncer.

Espera-se que os resultados obtidos possam ajudar para que sejam cumpridas as ações de controle propostas pelo acordo setorial que previa a instalação de filtros de manga até 2015, prazo prorrogado até 2016.

O alto custo dos filtros foi a justificativa para um acordo do setor de ferroligas, em 2005. Na última década os cronogramas de instalação dos filtros já foram prorrogados duas vezes; a primeira prorrogação foi do prazo final de 2013 para 2015 e a segunda de 2015 para 2016. A flexibilização dos prazos para instalação do sistema de filtragem significa assumir o risco de expor a população aos poluentes por mais tempo. Os órgãos ambientais devem estar atentos para que o efeito crônico desses poluentes.

É importante ressaltar que somente a instalação dos filtros não é a solução final para a questão, é necessário que sejam criados mecanismos para a fiscalização do efetivo funcionamento dos mesmos.

Considerando o potencial impacto da presença dos particulados na saúde humana, é importante que o sistema de gestão ambiental inclua a participação da população num sistema de controle integrado e efetivamente participativo.

Por fim, destaca-se a necessidade de estudos bem como o monitoramento da qualidade do ar na área de estudo assim como nas demais cidades da região em situação semelhantes (Várzea da Palma/Bocaiúva). Do ponto de vista da proteção ambiental é importante que estes tenham um fundamento preventivo devido a toxicidade e caráter cumulativo dos metais pesados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAO, W. A. P.; MARQUES, J. J. *Manual de Coleta de Solos para Valores de Referência de Qualidade no Estado de Minas Gerais*. 1 ed. Belo Horizonte: FEAM, 2013. 15 p.
- ALBUQUERQUE, T. T. A. *Formação e transporte das partículas finas inorgânicas em uma atmosfera urbana: o exemplo de São Paulo*. 2010. 187f. 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?2003. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, 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. 178 f. 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.
- AMORIM, A. A. *Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes*. 2002. 154f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- 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.
- BAGGIO, H. F. *Contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em sedimento de corrente na bacia do Rio do Formoso, município de Buritizeiro – MG*. 2008. 234 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- BAIRD, C. *Química Ambiental*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. 607 p.
- BAIRD, C.; CANN, M. *Química Ambiental*. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p.
- BIANCHINI, M. *Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto*. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- BON, A. M. T. *Exposição ocupacional à sílica e silicose entre trabalhadores de marmorarias, no município de São Paulo*. 2006. 322 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-27112006-084915/pt-br.php>. Acesso em: 20 jun. 2013.

BOUÇAS, J. G. *Aplicação de técnicas nucleares nos estudos de avaliação da poluição do ar da região metropolitana de Belo Horizonte*. 2009. 314 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2009.

BRAGA, A.; BÖHM, G. M.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. Poluição atmosférica e Saúde Humana. *Revista USP*, 2001, São Paulo, n.51, p. 58-71, set/nov. 2001. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/35099>>. Acesso em: 03 de ago. 2014.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. Poluição Atmosférica e seus Efeitos na Saúde Humana. Disponível em: <http://comciencia.br/reportagens/cidades/paper_saldiva.pdf>. Acesso em: 02 de ago. 2014).

BRAGA, L. *Avaliação do impacto ambiental da usina de beneficiamento de minério de Fe e Si, Várzea da Palma*. 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BRAIT, C. H. H.; ANTO, N. R. Desenvolvimento e aplicação de sistema passivo de coleta de poluentes atmosféricos para monitoramento de cd, cr, pb, cu, fe, mn, zn e particulados totais. *Quimica Nova*, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 7-13. 2010.

CALDERON, R. L. The Epidemiology of Chemical Contaminants of Drinking Water. *Food and Chemical Toxicology*. v. 38, p. 13-20. 2000. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10717366>. Acesso em: 22 nov. 2013.

CAMARINHA, G. C. *Determinação Quantitativa de Fontes de Material Particulado Inalável na Atmosfera da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. 2010. 175p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CAMPELLO, M. S. *Técnicas de processamento digital de imagens com aplicação no setor de rochas ornamentais*. 2006. 215 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CAMPOS, J. E. G. ; DARDENNE, M. A. Origem e Evolução Tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, Brasília, v. 27, n. 3, p. 283-294, set. 1997a.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da bacia São Franciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociência*, Brasília, v. 27, n. 3, p. 269-282, set. 1997b.

CANÇADO, J. E. D. *A poluição atmosférica e sua relação com a saúde humana na região canavieira de Piracicaba - SP*. 2003. 201p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo. 201p, São Paulo, 2003.

CARNEIRO, A. P. S.; CAMPOS, L. O.; GOMES, M. F. C. F ; ASSUNÇÃO, A. A. Perfil de 300 trabalhadores expostos à sílica atendidos ambulatorialmente em Belo Horizonte. *Jornal de Pneumologia*, 2002: , v. 28, n. 6, p. 329-334. nov-dez. 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/jpneu/v28n6/a06v28n6.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2012

CHEREMISINOFF, N. P. *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002. 582 p.

Conselho Nacional de Meio Ambiente. CONAMA. *Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990*. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília, 1990. 5 p.

Conselho Nacional de Meio Ambiente. CONAMA. Resolução Nº 420, de 28 de dezembro de 2009. *Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas*. Brasília, 2009. 20 p.

COOPER, C. D. ; ALLEY, F. C. *Air pollution control: a design approach*. 4 ed. Long Grove: Waveland Press, 2011.

Conselho Estadual de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais (COPAM). *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 02, de 08 de setembro de 2010*. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010. 18 p.

Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM. *Deliberação Normativa Nº 166, de 29 de junho de 2011*. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011. 12p.

COUTO, J. M. *Entre Estatais e Transnacionais: o pólo industrial de Cubatão*. 2003. 232 f. Tese (Doutorado em Ciências Econômicas) - Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Análise de Consistência de dados fluviométricos da bacia do Rio São Francisco – Sub-bacia 40*. Belo Horizonte: CPRM, 2001.v 2.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. Considerações sobre a poluição do ar em Curitiba-PR face a seus aspectos de urbanização. *R. RAEGA*, Curitiba, n. 4, p. 101-110. 2000. Editora da UFPR. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/raega/article/view/3342>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

DE NEVERS, N. *Air pollution control engineering*. 2 ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.

DELLAMANO, J. C. *Uso de microssílica como aditivo na imobilização de rejeitos radioativos em cimento*. 1995. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.

DERISIO, J. C. *Introdução ao Controle da Poluição Ambiental*. 4 ed. São Paulo: Signus Editora. 4ª Ed. 2012. 224 p.

DO CARMO, J. B. M., e K. F. PORTELLA. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. v. 54, p. 309-318. 2008.

DUMONT, S. R. T. *São Francisco- Caminho geral do sertão: cenários de vida e trabalho de pescadores tradicionais em Pirapora e Buritizeiro - Norte de Minas Gerais*. 2007. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

EPA. *Biogenic Sources Preferred Methods*. 1996. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/eiip/techreport/volume05/v01.pdf>>. Acesso em: 14 Fev. 2014.

FEAM. *Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos, estudo de dispersão atmosférica e projeto de rede otimizada de monitoramento atmosférico para a região metropolitana de Belo Horizonte: eixo Belo Horizonte - Contagem - Betim. (RTC03002)*. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2003.

FEAM. *Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no Estado de Minas Gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade. FEAM – DPED- GEDIN – RT 12/2010*. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010b. 182 p. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/fean/levantamento%20da%20situacao%20do%20setor%20de%20ferroligas%20-%20requisitos%20tecnicos.pdf>. Acesso em: 16 ago. .

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*. 2010a. Belo Horizonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente, 2010.

FERREIRA, L. R.; PINHEIRO, T. M. M.; SIQUEIRA, A. L. ; CARNEIRO, A. P. S. A silicose e o perfil dos lapidários de pedras semipreciosas em Joaquim Felício, Minas Gerais, Brasil. *Cad. Saúde Pública*, v. 24, n.7, p. 1517-1526, jul. 2008.

FERREIRA, T. M.; FORTI, M. C.; ALVALÁ, P. C. Caracterização química e morfológica do particulado atmosférico em uma região urbana: São José dos Campos. INPE - MCT, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39PAU6H>> Acesso em: 20 Jan. 2012.

FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélites para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FONSECA, G. C. *Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica*. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FONSECA, S. F.; MAGALHÃES, S. C. M.; MENDONÇA, G. L. Incidência de doenças respiratórias Associadas a atividades metalúrgicas na zona De influência do polo industrial de Pirapora - MG. *O Espaço Geográfico nas Interfaces da Cultura e da Saúde*. v. 138. p. 138-160. 2016.

FUZARI, S. ; PEREIRA, T. L. *Avaliação do incômodo à população da região da grande Vitória por partículas sedimentáveis: um estudo de inter-relações entre níveis de incômodo e seus fatores determinantes*. 2012. 94 f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012. Disponível em: <http://www.engenhariaambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br>. Acesso em: 12 de mai de 2015.

GAMA, M. G. C. *Água, vereda, veredeiro: um estudo sobre as agriculturas camponesa e comercial, nas cabeceiras do rio Formoso, em Buritizeiro-MG*. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

GAMA, M.G. C.; PAULA, A. M. N. R.; LIMA, S. C. Implantação da agricultura comercial no município de Buritizeiro, Cerrado Mineiro: o uso capitalista dos recursos naturais. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v.1, n. 10, p. 1-12, Set. 2003.

GILBERT, E. M.; DUDEK, D. J.; CLEVE, E. W. Cross-Media Transfers of Hazardous wastes. *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*, v. 13, p. 203-209. 1984. Disponível em: http://works.bepress.com/gilbert_metcalf/26. Acesso em: 16 Ago. 2014.

GIRARD, J. *Principles of environmental chemistry*. Massachusetts: Jones and Bartlett Publishers, 2010. 687 p.

GOMES, J. *Poluição Atmosférica: um manual universitário*. 2 ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2010.

GUIMARÃES, V.; SÍGOLO, J. B.. Associação de Resíduos da Metalurgia com Sedimentos em Suspensão - Rio Ribeira de Iguape. *Revista do Instituto de Geociências - USP*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 1-10, Out. 2008.

HELFAND, W. H.; LAZARUS, J. ; THEERMAN, P. Donora, Pennsylvania: An Environmental Disaster of the 20th Century. *American Journal of Public Health*, v. 91, n. 4, Apr. 2001. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1446635/pdf/11291362.pdf>. Acesso em : 04 Ago. 2014.

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.

HORFFMANN, A. T. *Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos*. 2001.132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HORN, A. H.; BAGGIO, H. B. ; BILAL, E. Mineral Dust Environmental Impact in the Region of Pirapora and Várzea da Palma, Minas Gerais: Air, Water, Soil and Plants Pollution. *Revista Espinhaço*, v. 1, n. 1, p.25-33. 2012.

IARC, Internacional Agency for Tesearch on Cancer. IARC Monographs on the evaluation of the carciongenic risc of chemical to humans. 1997. Disponível em : <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C-14.pdf>. Acesso em: 12 de out de 2013.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . *Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

IEMA. *Inventário de emissões atmosféricas da região da grande Vitória*. Vitória: RTC10131-R1, 2011. Disponível em: http://www.meioambiente.es.gov.br/download/RTC10131_R1.pdf. Acesso em: 22 mai 2012.

INONIBRÁS. *Inoculantes e Ferro Ligas Nipo-Brasileiros S/A*. 2014. Acesso em: <http://www.inonibras.com.br>. Acesso em: 12 Mar. 2014.

INOUE, M.T.; REISSMANN, C.B. Efeitos da poluição na fotossíntese, dimensões da folha, deposição de particulados e conteúdo de ferro e cobre em alfeneiro (*Ligustrum lucidum*) da arborização de Curitiba, PR. *Floresta*, v. 21, n.1/2, p. 3-11. 1994:

JACOBSON, M. Z. *Atmospheric Pollution: history, science and regulation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 399 p.

JACOMINO, V. M.F.; BARRETO, A. A.; TAVARES, F. V. F; PEIXOTO, C. M.; RODRIGUES, P. C. H. Avaliação da qualidade do ar em um polo produtor de ferro-gusa. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v.14, n.4 , p. 511-520. out/dez. 2009.

JACONDINO, G. B. *Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego*. 2005. 133 f. Poro Alegre: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

JOLLIFFE, I.T. Principal Componente Analysis. New York: Brillinger, etc. (Springer Series in Statistics). 1986.

JORDÃO, C. P.; PEREIRA, J. L.; GOUVEA, L. C.; PEREIRA, J. C.; W. BRUNE. Contaminação de sedimentos fluviais por metais pesados nas proximidades de uma industria metalúrgica em Minas Gerais. *Geochimica Brasil*, Viçosa, v. 4, n. 1, p. 9-15, 1990.

KLAR, A. E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel, 1984. 408 p.

LENZI, E. *Química da Atmosfera: ciência, vida e sobrevivência*. Rio de Janeiro: LTC., 2011.

LIASA. Welcome to LIASA High Quality Silicon Metal. 2014. <http://www.liasa.com.br> (acesso em 12 de Março de 2014).

LOGAN, W. P. D. Fog and Mortality. *The Lancet (Public Health)*, v.8, n. 1, p.78, Jan. 1949. p. 78. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18106464>. Acesso em: 02 de Agosto de 2014.

LOGAN, W. P. D. Mortality from Fog in London. *British Medical Journal*, v. 31, n. 1, p. 722-725. Mar, 1956. Disponível em : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1979260/>. Acesso em:02 de Agosto de 2014.

LOGAN, W. P. D. Mortality in the London Fog incident, 1952. *The Lancet (Public Health)*, v. 14, n. 1, p. 336-3388, 1953. Disponível em [http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(53\)91012-5/fulltext](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(53)91012-5/fulltext). Acesso em: 02 Ago. 2013.

LOUREIRO, L. N. *Panorâmica sobre emissões atmosféricas estudo de caso: avaliação do inventário emissões atmosféricas da região metropolitana do rio de janeiro para fontes móveis*. 2005. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MAIOLI, B. G. Quantificação e caracterização do Material Particulado fino (MP_{2,5}) na região metropolitana da grande Vitória-ES. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2011.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M.F. de; LAVRES JR., J.; MALAVOLTA, M. Micronutrientes e metais pesados - essencialidade e toxidez. In: PATERNIANI, E. (Org.). *Ciência, agricultura e sociedade*. 1.ed. Brasília - DF: Embrapa, 2006. v.1, p.117-154.

MANAHAN, S. E. Environmental Science, Technology, And Chemistry. *Environmental Chemistry*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. Disponível em: <http://www.chemistry.uoc.gr/courses/xhm405/01%20Environmental%20Chemistry%20Manahan.pdf>. Acesso em: 12 Mar. 2012.

MARQUES FILHO, E. P. *Alguns aspectos teóricos e experimentais da camada limite superficial acima do Pantanal Matogrossense*. 155 f. 1999. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Ministério da Ciência e Tecnologia, INPE, São José dos Campos, 1999.

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.

MELO, D. R. *Evolução das veredas sob impactos ambientais nos geossistemas planaltos de Buritizeiro/MG*. 2008. 286 f. Tese (Doutorado em Geografia)- Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MINASLIGAS. *Minasligas - Copyright MINASLIGAS - 2010 - Todos os direitos reservados*. 2010. Disponível em: <http://www.minasligas.com.br>. Acesso em: 12 Mar. 2014).

MOLIN. 1997; DAL MOLIN, D. C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica. Tese de doutorado, DCC/EPUSP, 1995.

MORAES, P. P. F. *Análise Geoquímica-Ambiental dos Solos de Veredas da Bacia do Rio do Formoso, Município de Buritizeiro, Minas Gerais, Brasil*. 2010. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MOREIRA, D e TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. 2004: *Ambiente & Sociedade*, v. 7, n. 2, p. 159 - 172, jul./dez. 2004. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/asoc/v7n2/24693.pdf>>. Acesso em: 12 Abr. 2013

MOREIRA, D. M., T. TIRABASSI, e M. R. MORAES. Meteorologia e Poluição da Atmosfera. *Ambiente & Sociedade*, v. 7, n. 2, p. 1-13, jul./dez. 2004.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. Metalurgia do Silício: Processos de Obtenção e Impactos Ambientais. (Série Tecnologia Ambiental, 41). Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 42p.

NEMERY, B.; HOET, P. H. M. ; NEMMAR, A. The Meuse Valley fog of 1930: an air pollution disaster. *The lancet*, v. 357, n. 3, p. 704 - 708, Mar. 2001. Disponível em: [http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(00\)04135-0/fulltext#article_upsell](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(00)04135-0/fulltext#article_upsell). Acesso em: 03 de Agosto de 2014.

PEREIRA, M. C.; SETZER, A. W. *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. de 1986.

PINTO, L. C. M. *QUANTIKOV Um analisador microestrutural para o ambiente Windows*. 1996. 160 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 1996.

PLA, L.E., *Análisis Multivariado: Metodo de Componentes Principales*. Washington: Chesneau, 1986. (Colección de Monografías Científicas).

QUEIROZ, P. G. M.; JACOMINO, V. M. F.; MENEZES, M. A. B. C. Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais. *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1233-1239, 2007.

RAVEN, P. H., L. R. BERG, e B. G. JOHNSON. *Environment*. Fort Worth: Saunders College Publishing, 1995.

RIBEIRO, E. V. *Níveis de Contaminação por metais pesados em águas superficiais do Rio São Francisco em Pirapora e sua relação com as atividades industriais*. 2007. 109 f. Monografia (Graduação em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Montes Claros, Pirapora, 2007.

RIBEIRO, E. V. *Avaliação da qualidade da água do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora: metais pesados e atividades antropogênicas*. 196 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RIBEIRO, L. A. A. *Procedimento de Determinação dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica do Modelo Gaussiano através de Análise Fotográfica de Plumias de Fumaça*. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) - Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2009

RIDKER, R. G. *Economic costs of air pollution: studies in measurement*. New York: Frederic A. Praeger Publishers., 1968. 215p.

RIETZLER, A. C.; FONSECA, A. L.; LOPES, G. P. Heavy metals in tributaries of Pampulha Reservoir, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Biology*. v. 61, n.3, p. 363-370. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjb/v61n3/7330.pdf>>. Acesso em 01 de Agosto de 2014.

ROCHA, J. C. *Introdução a Química Ambiental*. 2 ed. Porto Alegre: Bookman., 2009. 256 p.

SALGADO, P. E. T. *Informações gerais e ecotoxicológicas de material particulado*. Salvador: Centro de Recursos Ambientais - CRA. Série Cadernos de Referência Ambiental, v. 14, 2002.

SAUGIER, B. *Vegetação e Atmosfera*. Tradução de Miguel Mascarenhas. Flammarion: Instituto Piaget (Collection Dominos), 1996.

SCOTT, J. A. Fog and Deaths in London, December 1952. *Public Health Reports*, 1953, v. 68, n. 5, p. 474-479. Mai 1953. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2024021/>. Acesso em: 02 Ago. 2014.

SGARBI, G. N.C. Arenitos Eólicos da Formação Areado (Bacia Cretácea do São Francisco): caracterização, diagênese e aspectos químicos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 21, n. 4, p. 342-354. Dez. 1991.

SILVA, G.L.; AFONSO, P. C. M. A implantação de um novo tipo de cultura em substituição à fruticultura irrigada no projeto de irrigação de Pirapora-MG. In: *XIX ENCONTRO NACIONAL DE GEOGRAFIA AGRÁRIA, SÃO PAULO*, p. 1-21, 2009. Disponível em: http://www.geografia.ffe.usp.br/inferior/laboratorios/agraria/Anais%20XIXENGA/artigos/Silva_GL.pdf. Acesso em: 31 Jul. 2014).

SILVA, M. G. ; HELENE, P. Concreto projetado com adição de microssilica. *Boletim Técnico da Escola politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/107. 27 p. 1993. Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00107.pdf. Acesso em: 12 Mai. 2013.

SILVA, M. P. R. *Modelagem numérica dos processos de remoção úmida de poluentes atmosféricos: estudo de caso para a região amazônica (Rondônia)*. 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, A. C. S. *Pirapora, uma cidade média no Norte de Minas Gerais*. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SPURNY, K. R. (Ed.). *Aerosol chemical processes in the environment*. Boca Raton: CRC Press/Lewis Publishers, 2000.

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*. 2012 Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

TECLAFF, L. A. ; TECLAFF, E. International Control of Cross-Media Pollution-An Ecosystem Approach. *Natural Resources Journal*, v. 27, p. 21 - 53. 1987: Disponível em: http://lawschool.unm.edu/nrj/volumes/27/1/04_teclaff_international.pdf. Acesso em: 16 de Agosto de 2014.

TORSANI, J. A.; VISWANADHAM, Y. 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. Printed, On-line. ISBN 978-85-17-00046-1. (INPE-7772-PRE/3613). Available from: <http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/0>, 1982.

TRINDADE, W. M. *Concentração e distribuição de metais pesados em sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora/MG: fatores naturais e antrópicos*. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

TRINDADE, W. M.; RIBEIRO, E. V.; BAGGIO, H. ; HORN, A. H. O Grupo Mata da Corda na Bacia Hidrográfica do Rio do Formoso e suas feições morfológicas correlatas. In:VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA REGIONAL E CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 7, 2006, Goiana. *Anais*. Goiana: UFG Editora, 2006. p. 01-09.

TRINDADE, W.M.; HORN, A. H.; RIBEIRO, E. V. Heavy Metals Concentration in sediment of the São Francisco river between Três Marias and Pirapora - MG: geochemistry and environmenta risk classification. *Geonomos*, v. 20, n. 1 , p. 64-75. 2012.

TROMPETTE, R. R., UHLEIN, A., SILVA, M. E. e KARMANN, I. O Cráton Brasileiro do São Francisco: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências* , v. 22, n. 4, p. 481-486, Dez. 1992.

VALADÃO, R. C. *Evolução de Longo-Termo do Relevo do Brasil Oriental (Desnudação, Superfícies de Aplainamento e Soerguimentos Crustais)*. 1998. 243 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

VALARINI, S. *Caracterização do Material Particulado em Cubatão*. São Paulo: Dissestação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo., 2011.

VALENTIN, J. L. 1995. Agrupamento e Ordenação. In: *Oecologia Brasiliensis*, Rio de Janeiro: Perez-Neto etc, 1995. v. 2. P. 27-55^a.

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

VERGARA, P. C. C. *Análise das propriedades ópticas do aerossol ao sul da América do sul*. 108 f. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. 2010.

VIANA, V. M. F. C. *Estudo Hidrogeoquímico das Veredas do Rio do Formoso no Município de Buritizeiros, Minas Gerais*.2006. 107 f. 2006. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horiznte, 2006.

WARK, k., C. F. WARNER, e W. T. DAVIS. *Air pollution: its origin and control*. 3 ed. Menlo Park: Addison wesley, 1927.

APÊNDICES

Apêndice A - Textura e matéria orgânica dos solos

| | dag/Kg | | dag/Kg = % | | | |
|---------|--------|------|------------|-------|--------|-------|
| | M.O. | C.O. | Areia | Silte | Argila | Total |
| MP02-01 | 0,87 | 0,5 | 67 | 25,9 | 7,1 | 100 |
| MP02-04 | 0,99 | 0,57 | 80,4 | 16,5 | 3,1 | 100 |
| MP02-05 | 0,86 | 0,5 | 60,4 | 24,3 | 15,3 | 100 |
| MP02-06 | 0,22 | 0,13 | 88,5 | 8,1 | 3,4 | 100 |
| MP02-07 | 0,38 | 0,22 | 85,2 | 9,9 | 4,9 | 100 |

Apêndice B -- Química dos solos (ppm)

| | Mg | Al | Ca | Ti | Mn |
|--------------------------|-------|---------|--------|--------|--------|
| Identificação da Amostra | 0,00 | 0,01 | 0,0215 | 0,0015 | 0,0038 |
| MP02 - 01 | 99,6 | 18710,0 | 91,0 | 116,1 | 72,7 |
| MP02 - 04 | 195,6 | 11380,0 | 223,7 | 64,8 | 64,4 |
| MP02 - 05 | 428,2 | 31690,0 | 479,0 | 60,1 | 104,5 |
| MP02 - 06 | 212,0 | 7610,0 | 35,9 | 84,6 | 252,6 |
| MP02 - 07 | 492,4 | 10305,0 | 67,9 | 66,8 | 425,6 |

Apêndice C - População em Pirapora e Buritizeiro

| Ano | Po | | | |
|-------------|-------|--------|--------|--------|
| | Rural | Urbana | Total | |
| Buritizeiro | 1970 | 7.749 | 4.466 | 12.215 |
| | 1980 | 8.501 | 9.768 | 18.269 |
| | 1991 | 6.408 | 18.069 | 18.069 |
| | 2000 | 4.100 | 21.804 | 25.904 |
| | 2010 | 3.292 | 23.630 | 26.922 |
| Pirapora | 1970 | 1.335 | 18.947 | 20.282 |
| | 1980 | 1.177 | 31.495 | 32.672 |
| | 1991 | 859 | 45.492 | 46.351 |
| | 2000 | 923 | 49.377 | 50.300 |
| | 2010 | 983 | 52.385 | 53.368 |

Apêndice D - Fotos da pluma de poluentes atmosféricos em Pirapora - vista do Rio São Francisco.



Apêndice E - Fotos da pluma de poluentes atmosféricos em Pirapora - vista do Rio São Francisco.



Apêndice F - Mosaico de fotos da pluma de poluentes atmosféricos na região de Pirapora - vista do contexto urbano e rural.



Apêndice G- Material particulado depositado na superfície.



Apêndice H - Vista aérea da cidade de Pirapora - em segundo plano pluma de poluição atmosférica



ANEXOS

Anexo A - Fornos das indústrias de ferroligas em Minas Gerais (FEAM,2010)

feam

3

Tabela 1.1 - Nº de fornos, capacidade e potência instaladas das indústrias de ferroligas e silício metálico do Estado de Minas Gerais

| Empresa | Município | Fornos (Nº e tipo) | Capacidade total instalada (t/mês) | Potência instalada (MW) |
|---|----------------------|--|------------------------------------|-------------------------|
| Liasa Ligas de Alumínio S.A. | Pirapora | 4 fornos (3 Simet ¹ e 1 FeSi) | 5.700 (Simet); 2.600 (FeSi) | 96,5 |
| Cia. Ferroligas Minas Gerais - Minasligas | Pirapora | 6 fornos (4 FeSi e 2 Simet) | 4.800 (FeSi); 2.050 (Simet) | 84,0 |
| Inonibrás Inoculantes e Ferro Ligas Nipo Brasileiros S.A. | Pirapora | 2 fornos FeSi | 1.000 | 12,0 |
| Ferlig – Ferro Liga Ltda. | Passa Tempo | 2 fornos (FeMn e FeSiMn) | 1.300 | 6,4 |
| Vale Manganês S.A. | Barbacena | 10 fornos (FeSiMn e FeMn) | 6.808 | 39,0 |
| Vale Manganês S.A. | Ouro Preto | 3 fornos FeSiMn | 5.000 | 38,0 |
| Puiatti & Filhos Comércio e Indústria Ltda. | Barroso | 1 forno FeMn | 180 | 1,0 |
| Rima Industrial S.A. | Várzea da Palma | 6 fornos (2 CaSi, 3 Simet e 1 FeSiMg) | 5.000 | 69,0 |
| Rima Industrial S.A. | Bocaiúva | 1 forno FeSi | 1.250 | 17,0 |
| Rima Industrial S.A. | Capitão Enéas | 2 fornos Simet | 2.170 | 46,0 |
| Granha Ligas Ltda. | Conselheiro Lafaiete | 2 fornos FeSiMn | 1.500 | 9,0 |
| Companhia Brasileira de Carbureto de Cálcio | Santos Dumont | 5 fornos Simet | 4.800 | 51,0 |
| Ligas Gerais Eletrometalurgia Ltda. | São João Del Rei | 1 forno FeSi | 900 | 10,0 |
| Bozel Mineração S.A. | São João Del Rei | 3 fornos de CaSi | 2.500 | 35,0 |
| Granha Ligas Ltda. | São João Del Rei | 2 fornos FeSiMn | 1.400 | 10,0 |
| Italmagnésio Nordeste S.A. | Várzea da Palma | 4 fornos (FeSi e Simet) | 6.000 | 91,0 |
| Fertiligas Indústria e Comércio Ltda. | Sabará | 1 forno FeMn | 210 | 1,0 |
| Nova Era Silicon S.A. | Nova Era | 3 fornos de FeSi | 3.750 | 46,0 |
| Sociedade Brasileira de Ferro Ligas Ltda. | Rio Casca | 2 fornos de FeSiMn | 500 | 3,6 |
| Eletroligas Ltda. | São Gotardo | 1 forno FeMn | 210 | 1,0 |
| Cia. Brasileira de Metalurgia e Mineração - CBMM | Araxá | 3 fornos FeNb | 9.166 | 14,5 |
| Cia. Nickel do Brasil ² | Liberdade | 2 fornos (Termofosfato e FeP) | 900 (Termofosfato); 120 (FeP) | 2,3 |
| Total | | 66 fornos | 68.914 | 683,3 |

Anexo B - Monitoramento Qualidade do Ar industrias de ferroligas em Minas Gerais (FEAM, 2010)

feam

Quadro 3.1 - Monitoramento da qualidade do ar realizado pelas indústrias de ferroligas e silício metálico do Estado de Minas Gerais

| Empresa | Município | Realiza monitoramento | Nº estações (parâmetro analisado) | Resultados atendem a legislação | Observações |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| Rede composta pela Liasa, Minasligas e Inonibrás | Pirapora | Sim | 2 (PM ₁₀) | Parcialmente | Estação localizada no SAAE vem atendendo plenamente a legislação, ao contrário da instalada na FUNAM |
| Ferlig | Passa Tempo | Não | - | - | Dispensada pela FEAM |
| Vale Manganês | Barbacena | Sim | 1 (PM ₁₀) | Sim | No início de sua operação no final de 2009 houve uma descarga elétrica que danificou o aparelho |
| Vale Manganês | Ouro Preto | Sim | (PM ₁₀) | Sim | - |
| Puiatti & Filhos | Barroso | Não | - | - | Solicitou dispensa à FEAM em 2006, por estar situada em zona rural, 4 km de distância da comunidade mais próxima, entretanto não houve resposta do órgão ambiental |
| Rima Industrial | Várzea da Palma | Não | - | - | A proposta foi apresentada à FEAM, entretanto ainda não foi aprovado seu cronograma e operação |
| Rima Industrial | Bocaiúva | Não | - | - | |
| Rima Industrial | Capitão Enéas | Não | - | - | |
| Granha Ligas | Conselheiro Lafaiete | Sim | 4 (PTS) | Sim | Limite diário não foi ultrapassado, entretanto não foi apresentada a média geométrica anual |
| CBCC | Santos Dumont | Sim | 6 (PTS) | Sim | - |
| Ligas Gerais | São João del Rei | Não | - | - | - |
| Bozel | São João del Rei | Sim | 1 (PM ₁₀) | Sim | - |
| Granha Ligas | São João del Rei | Não | - | - | Dispensada pela FEAM |
| Italmagnésio | Várzea da Palma | Não | - | - | A proposta foi apresentada à FEAM, entretanto ainda não foi aprovado seu cronograma e operação |
| Fertiligas | Sabará | Não | - | - | Dispensada pela FEAM |
| Nova Era Silicon | Nova Era | Sim | 1 (PM ₁₀) | Sim | - |
| Sociedade Brasileira de Ferro Ligas | Rio Casca | Não | - | - | - |
| Eletroligas | São Gotardo | Não | - | - | - |
| CBMM | Araxá | Sim | 2 (PTS) | Sim | - |
| Cia. Nickel | Liberdade | Não | - | - | - |

Anexo C - Planejamento inicial para instalação de filtros segundo Feam, 2010. (Prorrogado até final de 2016)

feam

Quadro 4.1 - Cronograma aprovado na CID de 19-7-2005 – Setor de ferroligas e silício metálico

| Empresas | Município | Nº fornos | Nº-filtros já instalados | Nº filtros a implantar | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---|----------------------|-----------|--------------------------|------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| Cia. Ferro Ligas Minas Gerais - Minasligas | Pirapora | 6 | 2 | 4 | | | | | X | | X | X | X |
| Cia. Brás. Carbureto de Cálcio - CBCC | Santos Dumont | 5 | 0 | 5 | | | | | X | X | X | X | X |
| Rima Industrial S.A. | Várzea da Palma | 6 | 0 | 6 | | | | | X | XX | X | X | X |
| | Capitão Enéas | 2 | 0 | 2 | | | | | | | | X | X |
| | Bocaiúva | 1 | 0 | 1 | | | | | | | X | | |
| Rio Doce Manganês S.A (Atual Vale Manganês S.A.) | São João Del Rei | 3 | 0 | 3 | | X | X | | X | | | | |
| | Ouro Preto | 3 | 2 | 1 | | X | | | | | | | |
| | Barbacena | 10 | 10 | 0 | | | | | | | | | |
| | Sta. Rita Jacutinga | 1 | 0 | 1 | | X | | | | | | | |
| Granha Ligas Ltda. | Conselheiro Lafaiete | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | |
| Eletroligas Ltda. (Atual Granha Ligas Ltda.) | São João Del Rei | 1 | 0 | 1 | | X | | | | | | | |
| Nova Era Silicon | Nova Era | 3 | 0 | 3 | | | | | X | X | | X | |
| Fertiligas Ltda. | Sabarã | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | |
| Inonibrás-Inoculantes e Ferro Ligas Nipo-Bras.S/A | Pirapora | 2 | 0 | 2 | | | | | X | | X | | |
| Italmagnésio Nordeste S. A. | Várzea da Palma | 6 | 0 | 6 | | | | | XX | X | X | X | X |
| Ligas de Alumínio S A - Liasa | Pirapora | 4 | 0 | 4 | | | | | X | | X | X | X |
| Cia. Brasileira de Ferro Ligas | Rio Casca | 1 | 0 | 1 | | | X | | | | | | |
| Puiatti & Filhos Ind. Com. Ltda. | Barroso | 1 | 0 | 1 | | | X | | | | | | |
| Ferlig - Ferro Ligas Ltda. | Passa Tempo | 2 | 0 | 2 | | X | | X | | | | | |
| Ligas Gerais Ind. Com. Ltda. | São João Del Rei | 1 | 0 | 1 | | | X | | | | | | |
| Totais | | 60 | 16 | 44 | | 5 | 4 | 1 | 9 | 5 | 7 | 6 | 7 |
| Total de filtros a implantar | | | | | 19 | | | | | 25 | | | |

Fonte: Arquivos da FEAM