



**Exposição da Zona Urbana de Boquira, estado da Bahia, aos Metais Tóxicos Associados à Bacia de Rejeito de Mineração Abandonada**  
Exposure of the Urban Zone of Boquira, Bahia state, to Toxic Metals Associated with the Abandoned Mining Tailings Basin

Nelize Lima dos Santos; José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos & Harald Klammler

*Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia,  
Rua Barão de Jeremoabo – Campus de Ondina, s/n, 40170-290, Salvador, BA, Brasil  
E-mails: nelizelima.geo@gmail.com; jose.anjos@ufba.com; haki@ufl.edu  
Recebido em: 24/03/2020 Aprovado em: 20/06/2020  
DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_3\\_280\\_291](http://doi.org/10.11137/2020_3_280_291)*

**Resumo**

O município Boquira, Bahia, foi palco de intensa exploração de chumbo/zinco até o início da década de 1990, quando as reservas se tornaram inviáveis economicamente, resultando no abandono das estruturas de apoio da mineração, incluindo a bacia de rejeito - um dos maiores passivos ambientais advindos da mineração do Estado. Ao longo dos últimos anos, a área do passivo ambiental vem sendo incorporado à zona urbana da cidade devido à expansão demográfica, o que aumenta a vulnerabilidade desta área à exposição aos componentes tóxicos da bacia de rejeitos. O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos da avaliação da exposição potencial na zona urbana de Boquira/BA aos componentes tóxicos da bacia de rejeito. Para tanto foi construído um modelo conceitual de exposição à contaminação, considerando as vias atmosféricas como meio de transporte principal, devido as características climáticas da região. Isso permitiu estabelecer quatro cenários de exposição, um sobre a fonte de contaminação e três na área urbana, com distâncias de 850, 1300 e 2500 m a partir da bacia de rejeitos. Os resultados mostraram concentrações de nove metais pesados na zona urbana do município, acima dos limites de prevenção e investigação estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009.

**Palavras-chave:** *modelo conceitual de exposição; metais tóxicos; bacia de rejeitos*

**Abstract**

Boquira, Bahia state, was the scene of intense lead/zinc exploitation until the early 1990s, when reserves became economically unviable, resulting in the abandonment of mining support structures, including the tailings basin - one of the biggest liabilities from mining in the State. Over the past few years, the area of environmental liabilities has been incorporated into the urban area of the city due to demographic expansion, which increases the vulnerability of this area to exposure to toxic components in the tailings basin. This article aims to present the results obtained from the evaluation of the potential exposure in the urban area of Boquira / BA to the toxic components of the tailings basin. To this end, a conceptual model of exposure to contamination was built, considering the atmospheric routes as the main means of transport based on the climatic characteristics of the region. This allowed the establishment of four exposure scenarios, one on the source of contamination and three in the urban area, with distances of 850, 1300 and 2500 m from the tailings basin. The results showed concentrations of nine heavy metals in the urban area of the municipality above the limits of prevention and investigation established by CONAMA Resolution 420/2009.

**Keywords:** *conceptual exposure model; toxic metals; tailings basin*

## 1. Introdução

A exploração do minério de chumbo e zinco em Boquira/BA se iniciou no final da década de 1950. Durante os primeiros anos de exploração da mina, as ações de fiscalização dos empreendimentos mineiros e as leis ambientais no Brasil eram quase inexistentes (Correia, 2006; Santos, 2014). Desta forma, o processo de construção da bacia de rejeitos não considerou parâmetros de qualidade ambiental. Após 1986, os altos custos da operação e o excesso de oferta internacional do chumbo inviabilizaram a exploração, causando o abandono da mina de Boquira em 1992 (Camelo, 2006; Ferran, 2007; CETEM, 2012). Assim, a mineração em Boquira deixou de legado um dos maiores passivos ambientais do Estado, visto que a bacia de rejeitos é composta por metais pesados associados à composição mineralógica do arcabouço geológico da área. Isso tem preocupado a população local (Oliveira, 2011; Conceição, 2014; Martins & Monteiro, 2017; Oliveira *et al.*, 2017), especialmente, por estar localizada próxima à zona urbana do município.

A fim de minimizar os riscos à saúde da população e ao meio ambiente, o conhecimento do meio físico e da contaminação visa estabelecer instrumentos que auxiliem na formulação de medidas de gerenciamento ambiental e na tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas, por parte do poder público. Este trabalho tem como objetivo a caracterização do uso e ocupação da zona urbana de Boquira/BA e da dispersão dos contaminantes cujas concentrações apresentaram valores maiores que os estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, para criação de um modelo conceitual de exposição.

## 2 Materiais e Métodos

A metodologia utilizada baseou-se nos fundamentos estruturais indicados pela etapa de avaliação da exposição do modelo *Public Health Assessment Guidance Manual* (ATSDR, 2005), Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2007), Resolução CONAMA 420/2009 sobre Gerenciamento de Áreas Contaminadas, NBR 16210/2013: Modelo Conceitual para áreas de Gerenciamento Ambiental (ABNT, 2013a) e NBR 16209/2013: Avaliação de Risco à Saúde Humana para Fins de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (ABNT, 2013b).

A pesquisa se iniciou por meio do levantamento dos dados disponíveis sobre o histórico da mineração em Boquira, desde o início da operação até o abandono, o que permitiu a identificação da bacia de rejeitos como fonte primária de contaminação. Para a caracterização granulométrica, mineralógica e geoquímica foram utilizados os dados de Correia (2007), Bertolino *et al.* (2014), Cunha *et al.* (2016) e Alves *et al.* (2018). Para o estudo da distribuição

espacial da contaminação foram utilizados os dados do Projeto Levantamento Geoquímico de Baixa Densidade do Estado da Bahia (Cunha *et al.*, 2016).

O cálculo de volume foi realizado a partir dos valores altimétricos obtidos do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área usando o *software* Matlab R2014a. Utilizando as coordenadas  $x$  e  $y$  no plano horizontal, as cotas  $z_{\text{topo}}(x,y)$  do topo dos rejeitos foram diretamente informadas pelo MDE. Em torno, as cotas  $z_{\text{base}}(x,y)$  da base da bacia foram estimadas a partir das cotas do MDE no contorno da bacia através de interpolação linear. Assim, a espessura  $z_{\text{topo}} - z_{\text{base}}$  dos rejeitos foi numericamente integrada (somada) pela área total da bacia resultando na estimativa do volume total de rejeitos.

Os índices pluviométricos da área foram obtidos a partir de duas estações disponíveis na base de dados da Agência Nacional de Águas (sistema HidroWeb). Ambas pertencem à bacia hidrográfica do rio Paramirim, sendo a estação principal Boquira, localizada próximo à área de estudo e a estação secundária Macaúbas, com a finalidade de verificar a existência de erros de observação ou transcrição nos dados e as falhas de preenchimento da estação principal. A escolha da estação secundária considerou o maior coeficiente de correlação e a menor distância entre as estações (25 km) e os períodos de dados coincidentes.

A Série Histórica Pluviométrica foi constituída pelo somatório das precipitações diárias que ocorreram entre o período de janeiro de 1999 a março de 2019. Os dados foram analisados com o auxílio do *software* Matlab R2014a, com o uso do método de Dupla Massa para análise da consistência dos dados e do método de Regressão Linear Múltipla para o preenchimento dos dados faltantes.

A análise da direção e velocidade dos ventos foi realizada com base na série de precipitação, que permitiu separar o período chuvoso do período seco, e nos diferentes períodos do dia, madrugada (0h até 5h), manhã (6h até 11h), tarde (12h até 17h) e noite (18h até 23h). Os dados dos ventos foram obtidos da base de dados do INMET para a estação Macaúbas, no período entre 2016 e 2019, e analisados através de rosas dos ventos e gráficos elaborados no *software* Lakes Environmental WRPLOT View Freeware (WRPLOT, 2011). A classificação da intensidade dos ventos baseou-se na Escala de Beaufort (NATIONAL WEATHER SERVICE, 2002).

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo urbano foram utilizadas imagens de satélite fornecidas pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER), com projeção UTM SIRGAS 2000. As imagens foram realçadas pela composição colorida das bandas 543 (RGB), no *software* QGIS, visando aperfeiçoar a visualização dos sítios urbanos do município. Desta forma, possibilita-se melhor delimitação dos equipamentos urbanos e vegetações. Através de levantamento de campo em pontos georreferenciados foram inventariados os estabelecimentos

de risco, na escala 1:100, tais informações somaram-se ao estabelecido no zoneamento urbano disponível no Plano Diretor do município.

O levantamento geoquímico utilizado neste estudo foi realizado em uma única campanha de amostragem, quando foram coletadas 59 amostras de sedimentos de rua e 110 amostras de poeira de casas. Os valores obtidos foram comparados com os valores orientadores para solo contaminado por atividades antrópicas estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, visto que não existe legislação brasileira que determine valores orientadores para sedimentos de rua e poeira de casa em relação à saúde humana.

O modelo conceitual de exposição, de aplicação qualitativa, foi construído no *software* Matlab R2014a, através do cruzamento dos dados referentes ao mapeamento do uso e ocupação do solo urbano e da distribuição das concentrações de metais tóxicos em poeiras domiciliares.

### 3 Resultados

#### 3.1 Caracterização da Fonte de Contaminação

A bacia de rejeitos possui uma extensão horizontal de aproximadamente 3360 m<sup>2</sup> e um volume total calculado (Figura 1) de 894 mil m<sup>3</sup> de rejeito dispostos de forma irregular. Estudos anteriores (Correia, 2007; Bertolino *et al.*, 2014; Alves *et al.*, 2018) indicaram que a bacia de rejeitos é composta pela associação mineralógica do minério primário descrita por Carvalho *et al.* (1997): quartzo, magnetita, hematita, clorita, biotita, anfibólios (actinolita e tremolita) e carbonatos (ankerita e dolomita). As análises de Bertolino *et al.* (2014) e Alves *et al.* (2018) indicam tamanho dos grãos variando entre < 53 µm até 210 µm, correspondentes às frações granulométricas desde silte a areia fina.

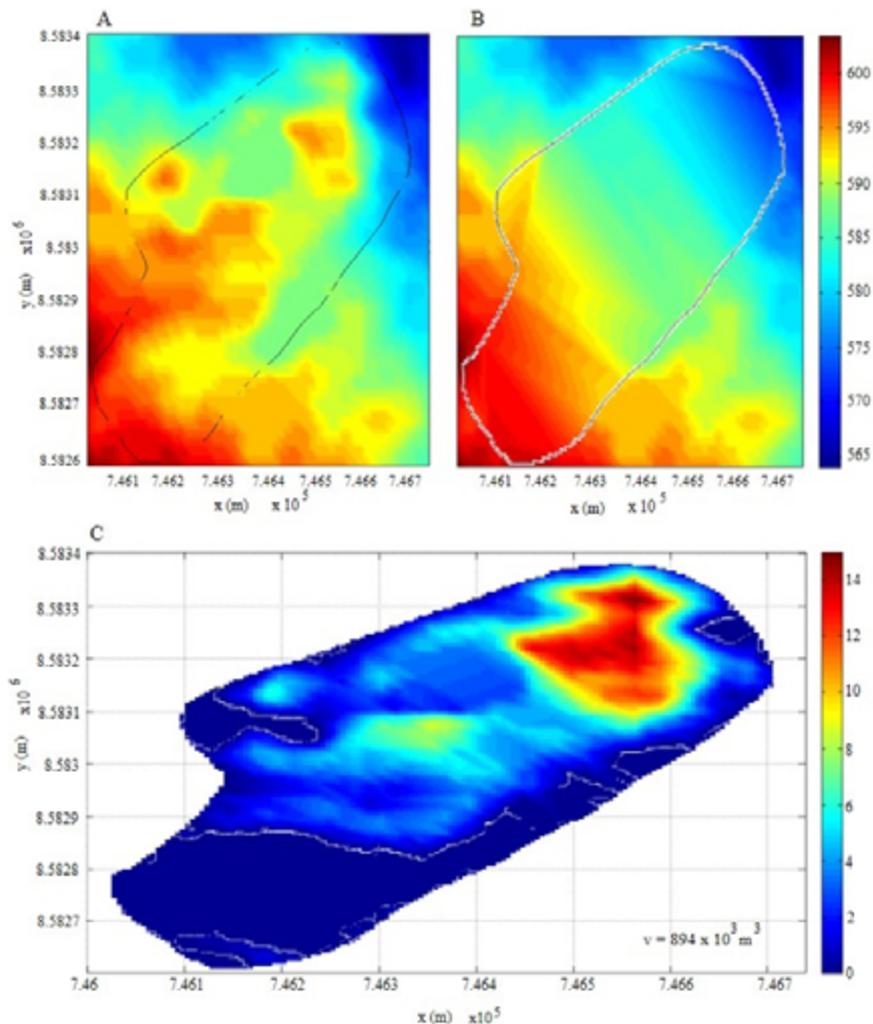


Figura 1 Volumetria da bacia de rejeitos; A. Topografia do topo da bacia obtida através do Modelo Digital de Elevação; B. Interpolação linear da base da bacia; C. Espessura da bacia.

As análises realizadas por Cunha *et al.* (2016), nos sedimentos da bacia de rejeitos, apresentaram nove metais tóxicos com valores acima dos limites de prevenção e/ou investigação estabelecidos na Resolução CONAMA 420/2009 para áreas residências (Tabela 1). Conforme a referida resolução, o valor de prevenção corresponde ao limite aceitável de determinada substância no solo, de modo que permita que este seja capaz de sustentar as suas funções principais, já o valor de investigação se refere à

concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana.

Verifica-se, pelos resultados das análises, elevadas concentrações de chumbo, zinco, cádmio e cobre na bacia de rejeitos. Estes teores estão acima do limite de investigação estabelecido na Resolução CONAMA 420/2009, indicando que existem riscos potenciais à saúde humana, em um cenário de exposição.

SUBSTÂNCIA	TEOR ENCONTRADO (mg/kg)		LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	CONAMA 420/2009 (mg/kg)	
	BACIA DE REJEITOS			PREVENÇÃO	INVESTIGAÇÃO
	MÍNIMO	MÁXIMO			
Antimônio	0,87	10,59	0,01	2	10
Bário (Ba)	13	243	5	150	500
Cádmio (Cd)	72,97	2.502,78	0,01	1,3	8
Chumbo (Pb)	3.034	>10.000	0,2	72	300
Cobre (Cu)	30,60	508,80	0,5	60	400
Cromo (Cr)	3	133	1	75	300
Níquel (Ni)	7,9	70,10	0,5	30	100
Prata (Ag)	3,28	8,93	0,05	2	50
Zinco (Zn)	2.765	>10.000	1	300	1000

Tabela 1 Metais tóxicos encontrados na bacia de rejeitos e valores orientadores da Resolução CONAMA 420/2009.  
 Fonte: Cunha *et al.* (2016).

### 3.2 Fatores Geomorfológicos e Meteorológicos Controladores da Dispersão

Inserida no semiárido do estado da Bahia, a região caracteriza-se pelo balanço hídrico negativo (SEI, 2003). Segundo a classificação de Köppen, apresenta temperatura média em torno de 23,8°C, insolação média de 2800 h/ano, evaporação média de 2000 mm/ano e umidade relativa do ar média em torno de 50%.

A precipitação média está compreendida abaixo de 800 mm/ano. Os maiores valores de precipitação concentram-se entre os meses novembro a março com médias em torno de 100 mm/mês, enquanto a época de estiagem concentra-se no período entre abril a outubro com médias em torno de 19 mm/mês (Figura 2).

Em termos geológicos, a área está inserida no domínio do cráton do São Francisco, entre o corredor de deformação do Paramirim e o Espinhaço Setentrional (Alkimim *et al.*, 1993). A zona urbana de Boquira se desenvolveu sobre a área plana característica do Vale do Paramirim e está imediatamente ao lado da borda leste da Serra do Espinhaço (Figura 2). O contraste entre estes compartimentos é nítido devido às vertentes íngremes e dissecadas da Serra do Espinhaço, cuja orientação é NW-

SE, que alcança altitudes superiores a 1100 m, enquanto o Vale do Paramirim corresponde a uma grande planície com altitudes que variam entre 400 e 700 m (Garcia, 2011).

A influência topográfica é evidenciada no padrão da circulação dos ventos na região que ocorre predominantemente na direção NW-SE, especialmente no período seco (Figura 2).

Esta contribuição é ratificada nos períodos da tarde (12 h até 17h) e noite (18 h até 23 h), que apresentam ventos de até 8m/s (15,55 kn). Contudo, a análise dos ventos indica marcante modulação pelo mecanismo de brisa de vale-montanha durante o período chuvoso, apresentando direção da circulação perpendicular à orientação da Serra do Espinhaço (Figura 2), principalmente durante os períodos da madrugada (0 h até 5 h) e da manhã (6 h até 11h), embora com ventos de menor velocidade.

As rajadas de vento ocorrem com maior intensidade durante o período seco com velocidades superiores à 18m/s (34,9 kn), consideradas como muito forte segundo a escala de Beaufort. Já no período chuvoso, durante a madrugada (0 h até 5 h) e a manhã (6 h até 11h) os ventos apresentam menor velocidade, sendo observado um aumento nas calmarias, com um aumento dos ventos cuja velocidade varia entre menores de 0,3 m/s a 1,5 m/s.

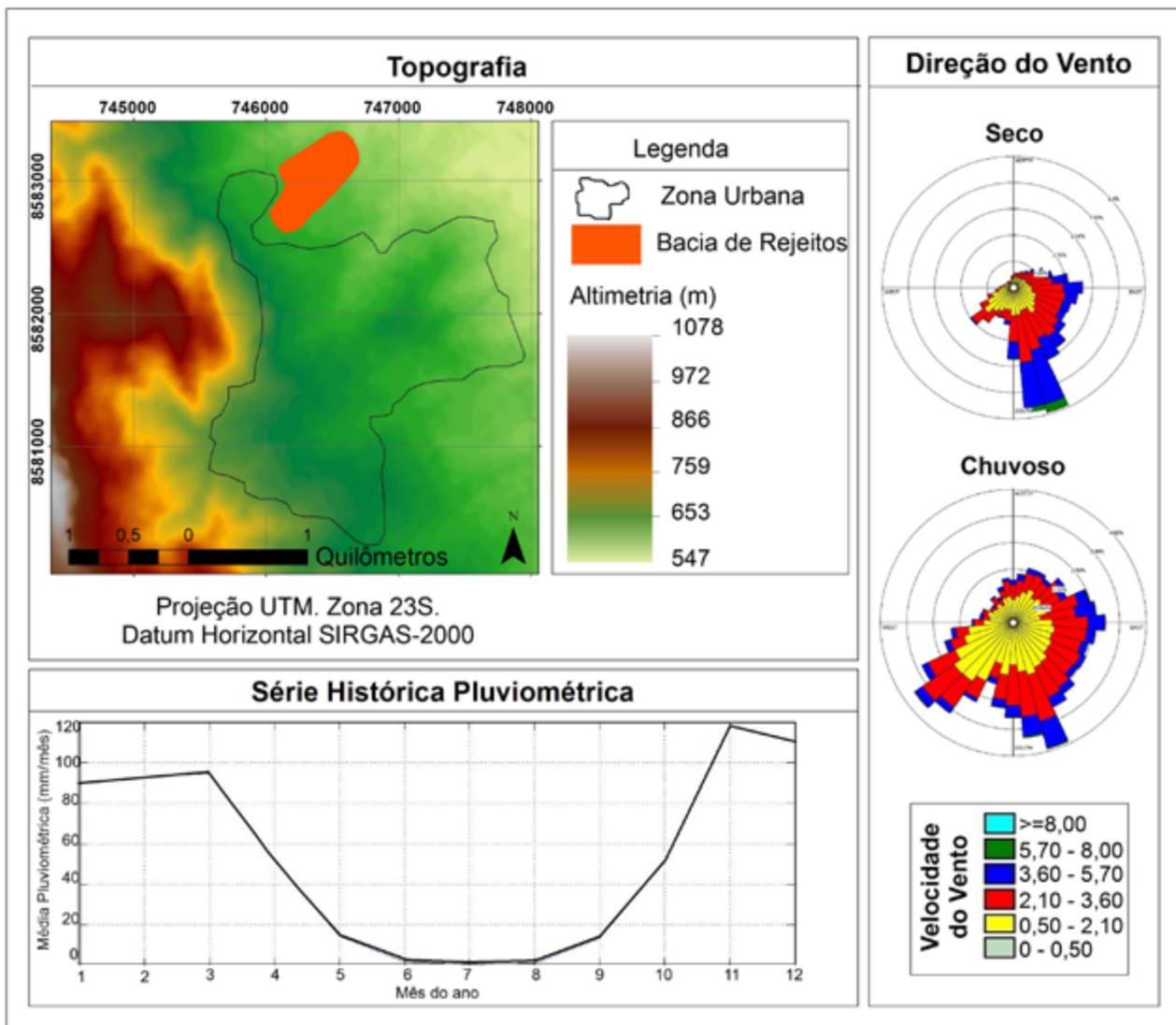


Figura 2 Fatores topográficos e meteorológicos que influenciam na dispersão de contaminantes atmosféricos.

### 3.3 Uso e Ocupação do Solo Urbano

O processo de ocupação do município se intensificou na década de 50 após a implantação da mineradora, que exerceu papel fundamental para o crescimento da população urbana e fornecimento de serviços (IBGE, 2010). Ainda nessa época foi construída a Vila Operária, utilizada para alojamento dos trabalhadores das minas e suas famílias (Ferran, 2007; Conceição, 2014).

Após o abandono da exploração mineral, a população do município buscou alternativas de trabalho, especialmente, na administração pública e no setor de serviços, localizados na zona urbana. O censo nacional

(IBGE, 2010) mostrou que cerca de sete mil pessoas vivem na zona urbana de Boquira, totalizando 30% da população, divididas entre os bairros Chaves, Barreiros, Salinas, Centro, Volta e Quiabento.

A Lei Complementar Municipal nº 449/2006 instituiu o Plano Diretor e o zoneamento do perímetro urbano do município (Figura 3), que inclui Zonas Residenciais (ZR), Zona de Comércio e Serviço (ZCS) e Zona de Expansão Urbana (Zex). Conforme o documento, embora a atividade predominante das Zonas Residenciais seja a moradia, poderão ser permitidas atividades dentro dos setores de serviços e comércio, da mesma forma, são permitidas atividades habitacionais na Zona de Comércio e Serviço.

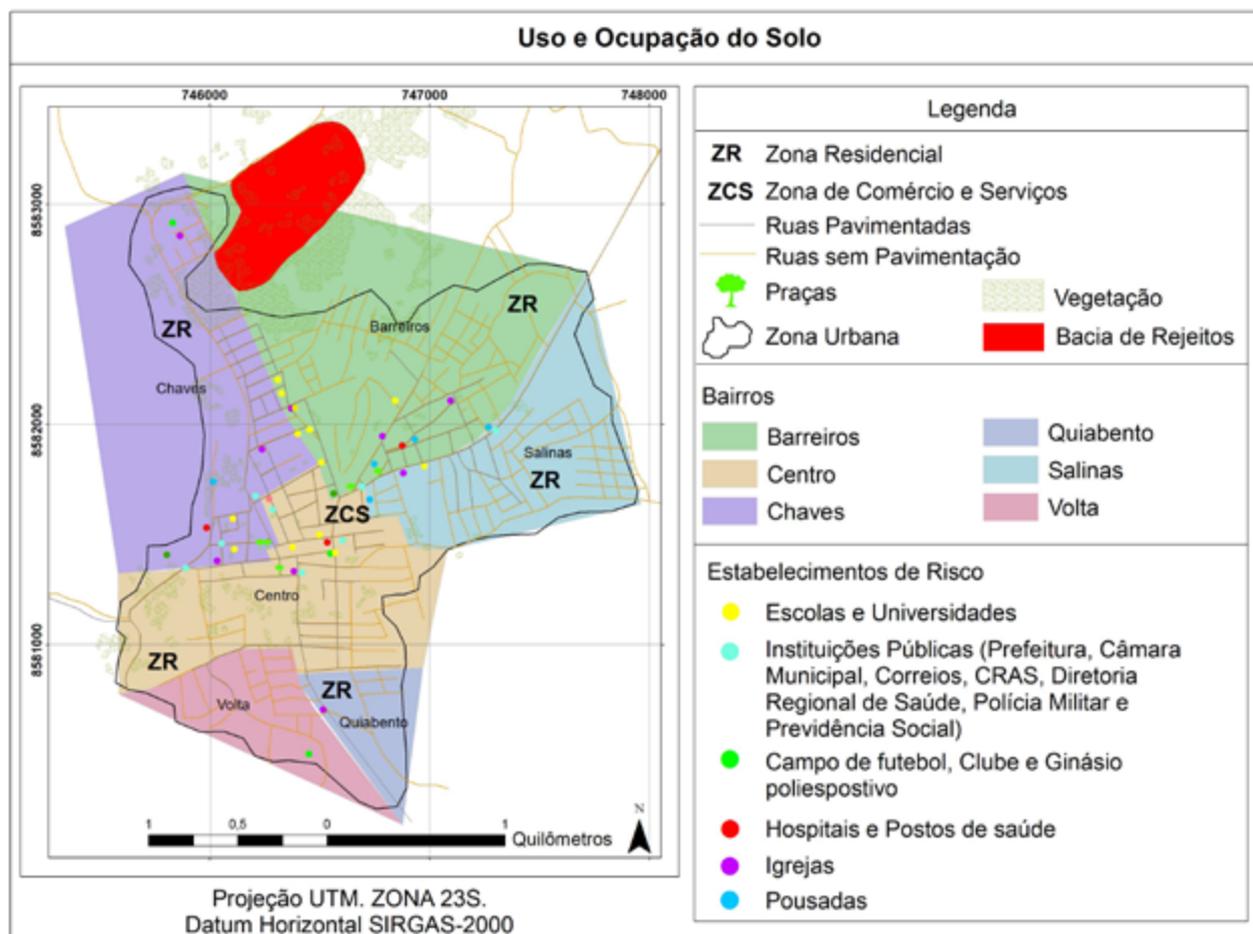


Figura 3 Uso e ocupação do solo urbano. Fonte: Boiquira (2006).

Os bairros Barreiros e Salinas estão incluídos na Zona Especial de Interesse Social, devido ao padrão de ocupação periférico e de baixa renda. Com base nos vetores de crescimento da zona urbana, são definidos pelo Plano Diretor como áreas prioritárias a ocupação. Este instrumento ainda prevê a criação da Zona de Proteção Ambiental de Uso Recreativo e de Lazer na área do antigo Núcleo de Apoio Rural de Boiquira (NARB) no bairro Chaves.

O mapeamento dos locais mais expostos à contaminação permitiu identificar uma série de estabelecimentos de risco nas áreas mais próximas à bacia, especialmente nos bairros Centro, Chaves e Barreiros. Ademais, em desacordo com a Lei Federal nº 12305/2010, o descarte de resíduos sólidos do município, pela administração pública, é realizado *in natura* sobre a área da bacia de rejeitos desde 1990 (Andrade *et al.*, 2017), com ocorrência de queimas a céu aberto, catação e criação de animais domésticos.

### 3.4 Avaliação da Contaminação

Os resultados analíticos referentes às amostras coletadas na zona urbana (Cunha *et al.*, 2016) permitiu identificar nove elementos de interesse (Figura 4), definidas através da relação entre os teores encontrados e os valores orientadores estipulados na Resolução CONAMA 420/2009 para solo superficial em áreas residenciais. Todos os metais em amostras de sedimentos de rua, exceto o chumbo, apresentaram valores de concentração abaixo do limite de quantificação do método analítico utilizado (Tabela 2).

As amostras de poeira de casas indicaram concentrações de chumbo, zinco, cobre, bário, cádmio e arsênio acima do limite de investigação e concentrações de níquel, cromo e cobalto acima do limite de prevenção estabelecidos na Resolução CONAMA 420/2009.

Os resultados analíticos das amostras de poeira de casas mostraram concentrações mais elevadas de chumbo

SUBSTÂNCIA	TEOR ENCONTRADO (mg/kg)				LIMITE DE QUANTIFICAÇÃO	CONAMA 420/2009 (mg/kg)	
	SEDIMENTOS DE RUA		POEIRA DE CASAS			PREVENÇÃO	INVESTIGAÇÃO
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO			
Arsênio	0.5	0.5	<1	170	1	15	55
Bário	2.5	2.5	38	814	5	150	500
Cádmio	0.005	0.005	<0.01	95	0,01	1,3	8
Chumbo	0.1	1.2	<0.2	9020	0,2	72	300
Cobalto	0.05	0.05	<0.1	28	0,01	25	65
Cobre	0.25	0.25	<0.5	3710	0,5	60	400
Cromo	0.5	0.5	9	91	1	75	300
Níquel	0.25	0.25	<0.5	41	0,5	30	100
Zinco	0.5	0.5	<1	5790	1	300	1000

Tabela 2 Metais tóxicos encontrados em poeira de casas e sedimentos de rua e valores orientadores da Resolução CONAMA 420/2009. Fonte: Cunha *et al.* (2016).

e zinco, localizadas imediatamente ao lado da bacia de rejeitos, nos bairros Barreiros e Chaves, especialmente na Vila Operária (Figura 4). No bairro Centro, a cerca de 850 m de distância da bacia, as amostras indicaram menores concentrações de chumbo, porém acima do limites de prevenção e investigação definidos pela Resolução CONAMA 420/2009. Por outro lado, as amostras com concentrações de cádmio, cromo e cobalto, acima do limite de prevenção, localizam-se no bairro Chaves. Enquanto as concentrações de níquel, cobre e bário acima dos limites de prevenção apresentou acentuada dispersão na área de estudo. Do total de amostras analisadas, apenas 3,6% (4 amostras) apresentaram concentrações de arsênio acima do limite de prevenção e investigação, localizadas nos bairros Chaves, Centro e Salinas.

Os histogramas de frequência dos elementos de interesse (Figura 5) evidenciam uma distribuição normal de boa simetria para o bário, cromo e níquel, enquanto que o arsênio, cádmio, chumbo, cobre e zinco mostram uma distribuição normal assimétrica, com mediana mais próxima dos valores mais baixos. Esta configuração corrobora com os mapas de distribuição dos metais pesados na zona urbana que indicam teores mais elevados destes elementos concentrados nas proximidades da bacia de rejeitos (Figura 4).

### 3.5 Modelo Conceitual de Exposição

Devido às características climáticas da região que apresenta baixos índices hídricos e alto potencial eólico,

o modelo proposto estabeleceu as vias atmosféricas como meio de transporte principal. Dessa maneira, a configuração topográfica da área tem um papel relevante na orientação da migração dos contaminantes, conferindo à dispersão a direção preferencial NW-SE.

Foram delimitados quatro cenários de exposição (Figura 6) considerando os receptores localizados sobre a bacia de rejeitos e os receptores localizados na zona urbana. O cenário de exposição sobre a bacia inclui os funcionários da prefeitura que trabalham na limpeza da cidade e os catadores de resíduos sólidos, e as seguintes vias de exposição: exposição ao rejeito (ingestão direta e contato dérmico com o rejeito) e exposição ao ar atmosférico em ambientes abertos (inalação de partículas provenientes do rejeito). Os catadores de resíduos sólidos, além do contato direto com o material da bacia de rejeitos ainda estão sujeitos à liberação de poluentes através da queima desses resíduos.

Os cenários de exposição da zona urbana consideraram os receptores residenciais e comerciais, localizados aproximadamente a 850, 1300 e 2500 m da bacia de rejeitos. Para os três cenários de exposição, foram consideradas as seguintes vias de exposição: exposição ao sedimento de rua (ingestão direta e contato dérmico com o sedimento de rua) e exposição ao ar atmosférico em ambientes abertos e fechados, este último, tendo em vista que parte do material liberado da bacia e dos sedimentos da área aberta são transportados para o interior das residências e outras construções.

Exposição da Zona Urbana de Boquira, estado da Bahia, aos Metais Tóxicos Associados à Bacia de Rejeito de Mineração Abandonada  
 Nelize Lima dos Santos; José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos & Harald Klammler

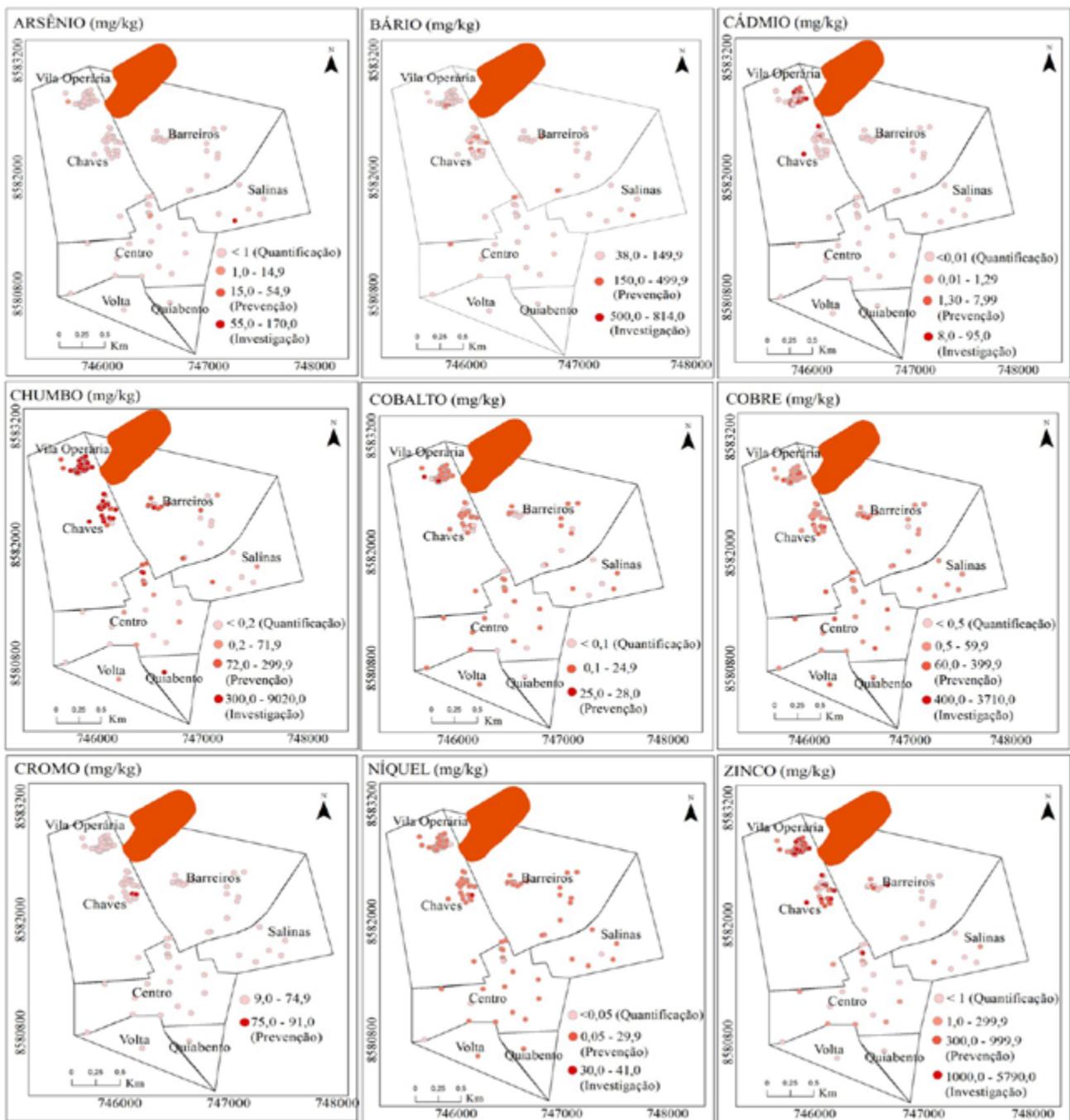


Figura 4 Concentração de metais tóxicos em poeira de casas da zona urbana de Boquira, na escala 1:15.000, projeção UTM (Sirgas 2000). Fonte: Adaptado de Cunha *et al.* (2016).

Exposição da Zona Urbana de Boquira, estado da Bahia, aos Metais Tóxicos Associados à Bacia de Rejeito de Mineração Abandonada  
 Nelize Lima dos Santos; José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos & Harald Klammler

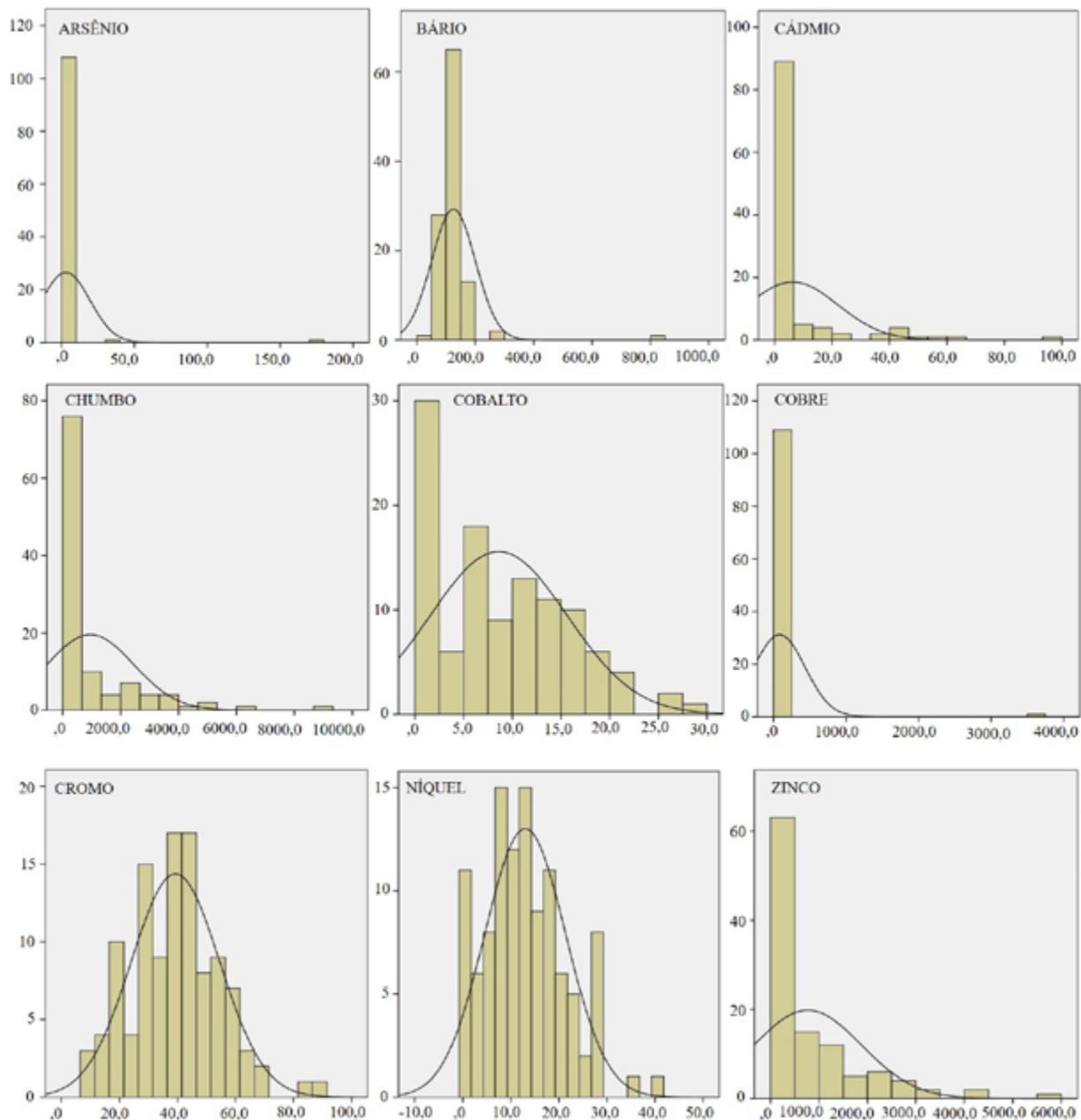


Figura 5 Histogramas de frequência dos elementos de interesse nas amostras analisadas. Fonte: Adaptado de Cunha *et al.* (2016).

Os receptores localizados até 850 m da bacia incluem os moradores dos bairros Barreiros e Chaves, especialmente na Vila Operária, e estudantes e funcionários das escolas e universidade do bairro Barreiros. A existência de ruas não pavimentadas, presentes no bairro Barreiros, eleva a quantidade de poeira em suspensão devido ao movimento de pedestres e de meios de transporte. Os grupos de

receptores localizados até 1300 metros da bacia incluem os trabalhadores do setor administrativo, de comércio e serviços localizados nos bairros Centro, Chaves e Barreiros e os moradores dos bairros Centro, Salinas, Chaves e Barreiros. Já no grupo de receptores localizados até 2500 metros da bacia estão incluídos os moradores dos bairros Centro, Salinas, Volta e Quiabento.

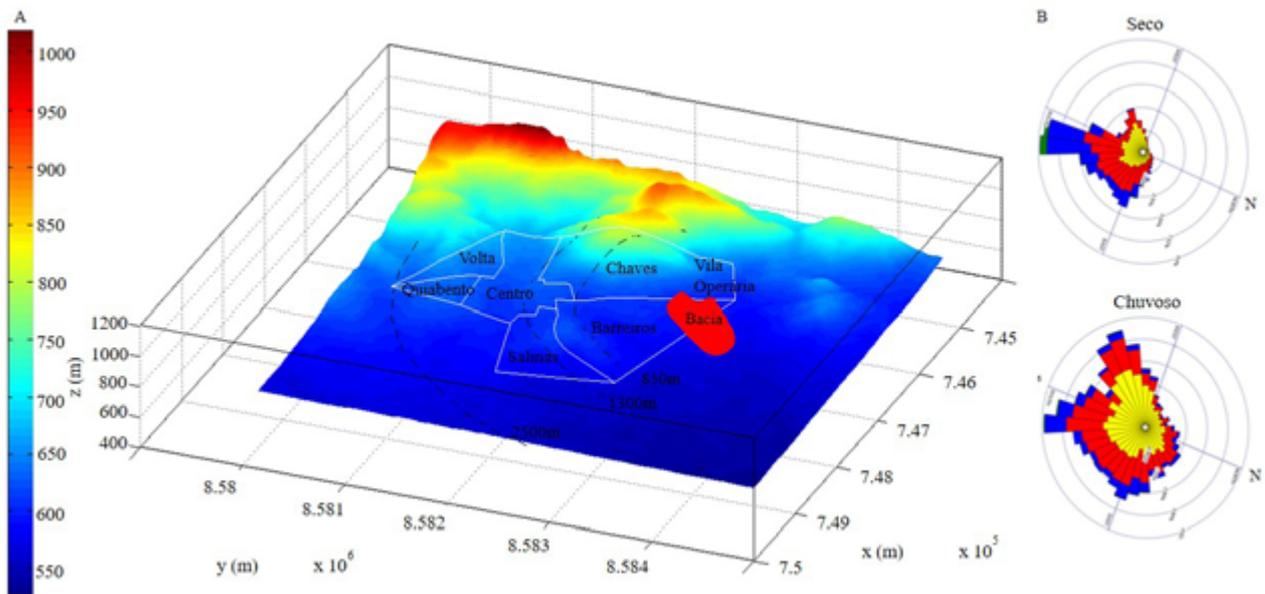


Figura 6 Modelo conceitual de exposição; A. Cenários de exposição para os receptores localizados até 850, 1300 e 2500 m de distância da bacia de rejeitos; B. Direções preferenciais do vento no período seco e úmido.

## 4 Discussões

Os resultados analíticos das amostras da bacia de rejeitos (Correia, 2007; Bertolino *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2018) mostraram elevadas concentrações de metais tóxicos para o ser humano, em níveis superiores ao estabelecido para segurança na Resolução CONAMA 420/2009. Uma série de estudos (Wong *et al.*, 2006; Jarup, 2013; Campos *et al.*, 2018) vêm apontando particular importância às emissões destes metais, especialmente chumbo e cádmio, na atmosfera, devido ao potencial de dispersão e exposição humana.

De acordo com Bertolino *et al.* (2014) e Alves *et al.* (2018), os metais presentes na bacia estão associados à partículas que correspondem a frações granulométricas finas, constituindo fator importante para o transporte atmosférico dos contaminantes, pois o tamanho dos grãos determina o tipo de processo de liberação das partículas e a distância que estas poderão percorrer com relação à fonte de contaminação.

Segundo Finlayson-Pitts & Pitts (2000), podem existir na atmosfera partículas maiores que 100  $\mu\text{m}$ , porém estas rapidamente se depositam em alguma superfície, não permanecendo em suspensão por períodos de tempo significativo. Estes autores afirmam que apenas as partículas cujo tamanho varia entre aproximadamente 0,002 e 100  $\mu\text{m}$  podem ficar em suspensão na atmosfera. As partículas finas podem ser transportadas a longas distâncias e o tempo de residência na atmosfera é da ordem de dias a semanas

(Seinfeld & Pandis, 1998; Horvath, 2000; Warneck, 2000; Deshmukh *et al.*, 2012), tal transporte sofre influência dos fatores físicos e meteorológicos da área.

Na região, a ocorrência de chuvas é marcada pela escassez, irregularidade e concentração num curto período. A variabilidade temporal da precipitação apresenta dois períodos distintos, entre os meses novembro e março ocorre a estação chuvosa e entre os meses abril e outubro a estação seca. Os períodos de altos índices pluviométricos podem ser responsáveis pelo carreamento dos metais tóxicos nos sedimentos de rua que, conforme (Cunha *et al.*, 2016), apresentam baixa concentração destes contaminantes.

Durante a estação seca, o condicionamento à diferenciação topográfica da área, confere ao vento orientação preferencial igual à Serra do Espinhaço (NW-SE), no sentido da zona urbana do município. O período seco apresenta ventos com maior velocidade, sendo comum ocorrerem rajadas de vento, que apesar de ter capacidade de mobilizar maior quantidade de rejeitos da bacia tem importante papel na dispersão, pois aumentam o transporte e reduz a concentração dos poluentes na atmosfera.

Já na estação chuvosa, ocorre uma modificação na orientação dos ventos, que sofrem a influência do processo montanha-vale, quando o sentido dos ventos toma posição perpendicular a Serra do Espinhaço. O período chuvoso, apesar de diminuir a velocidade média do vento, estimula a deposição úmida destes contaminantes e, conseqüentemente, diminui sua concentração na atmosfera, conforme descrito por Tresmondi (2008), Miranda (2012) e Araújo (2012).

De modo geral, os ventos apresentaram intensidades variando entre média fraca a moderada, segundo a escala de Beaufort, possibilitando a dispersão atmosférica dos contaminantes. Durante os períodos da madrugada (0 h até 5 h) e da manhã (6 h até 11h) foi observado um aumento nas calmarias caracterizadas por condições de tempo estável que dificultam a dispersão e estimulam a deposição dos contaminantes.

Os cenários de exposição, estabelecidos através do cruzamento dos estabelecimentos de risco com a distribuição das concentrações de metais tóxicos em poeiras domiciliares, incluem a bacia de rejeitos e outros três cenários.

O mapeamento dos receptores indica que os bairros Barreiros e Chaves, especialmente a Vila Operária, localizados até 850 m de distância da bacia, são os mais expostos aos contaminantes atmosféricos, devido à proximidade da fonte associada aos problemas sociais que apresentam, como o padrão de ocupação e falta de pavimentação das ruas. Nesta zona, foram considerados como principais estabelecimentos de risco as escolas e universidades do bairro Barreiros e as áreas comerciais, administrativas e de serviços no bairro Centro.

A zona de 850 a 1300 m indica o bairro Centro como a área com maior potencial de exposição, devido a tendência à concentração de pessoas, seguido das zonas residenciais dos bairros Chaves, Barreiros e Centro. A partir de 1300 a 2500 m, inclui áreas residenciais com baixa concentração de contaminantes, portanto com menor potencial de exposição.

## 5 Conclusões

A dispersão dos metais tóxicos contidos no material emitido pela bacia de rejeitos e sua deposição nas ruas e casas adjacentes submete a população da zona urbana de Boquira a uma contínua exposição a estes contaminantes. O transporte do material sofre influência da configuração topográfica da região, predominantemente NW-SE, e ocorre de modo distinto a depender tanto da sazonalidade, quanto do período do dia.

A estação seca é caracterizada por ventos de maior intensidade, portanto com maior capacidade de dispersão das partículas, ao contrário da estação chuvosa que apresenta uma redução na velocidade dos ventos. Nas duas estações, entretanto, os períodos da madrugada e da manhã, cuja condição do tempo é estável, há um estímulo as deposições seca e úmida.

A análise da contaminação acumulada em poeira de casas ao longo dos anos fornece importante informação da composição das emissões atmosféricas pretéritas e permitiu definir quatro cenários de exposição, definidos pela intensidade de exposição em cada zona. Os dados sobre

uso e ocupação do solo apontam que os bairros Chaves e Barreiros, localizados nas adjacências da bacia de rejeitos, e o bairro Centro reúnem a maioria dos estabelecimentos de risco.

A presença de metais tóxicos na zona urbana do município expõe, com base no rigor científico, a necessidade de se engendrar pesquisas de análise de risco à saúde humana em toda área, mas preferencialmente nos bairros Chaves, Barreiros e Centro que apresentaram valores de contaminação acima do limite de investigação para chumbo e zinco, e de prevenção para os demais elementos, segundo a Resolução CONAMA 420/2009.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento parcial dessa pesquisa, ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia e à Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) pela concessão das análises químicas.

## 7 Referências

- Alves, F.E.A.; Bertolino, L.C. & Mendes, J. 2018. Mineralogical Characterization of Lead Mine Tailing in Boquira, Bahia State, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 40(3): 14-23.
- Andrade, A.X.; Soares, E.M.B.; Cunha, D.A. & Oliveira, M.L.R. 2017. Riscos e incertezas: a realidade pós-extração do minério de chumbo em Boquira, BA. *Interações*, 18: 103-117.
- Araújo, I.R.S. 2012. *Simulação da dispersão de poluentes atmosféricos e avaliação da qualidade do ar na área de abrangência do Distrito Industrial de Barcarena-PA*. Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais. Universidade Federal do Pará. Dissertação de mestrado, 98p.
- ATSDR. 2005. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Public Health Assessment Guidance*. Disponível em: <http://www.atsdr.cdc.gov/HAC/HAGM/index.html>. Acesso em: 15 de janeiro de 2019.
- ABNT. 2013a. *Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16.210. Modelo conceitual no gerenciamento de áreas contaminadas — Procedimento*. Rio de Janeiro, 4p.
- ABNT. 2013b. *Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16209. Avaliação de risco a saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas*. Rio de Janeiro, 4p.
- Bertolino, L.C.; Alves, F.E.A.; Mendes, J.C. & Neumann, R. 2014. Caracterização mineralógica preliminar de amostras do rejeito da antiga mineração de chumbo em Boquira, Bahia. *Comunicações Geológicas*, 101 (II): 965-968.
- Boquira. 2006. Lei n ° 449, de 25 de outubro de 2006. Institui o Plano Diretor Participativo de Boquira. Disponível em: <http://ba.portaldatransparencia>.

- com.br/prefeitura/boquira/iframe.cfm?pagina=abre Documento&arquivo=33E20A588E47. Acesso em: 15 de junho de 2020.
- Camelo, M.S.M. 2006. *Fechamento de mina: análise de casos selecionados sob os focos ambiental, econômico e social*. Núcleo de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. Ouro Preto – MG, 290p.
- Campos, M.L.; Andreola, A.; Bueno, D.K.; Daniel, E.S.; Lopes, H.S.S.; Borges, K.S.C. & Souza, L.C. 2018. Riscos à saúde humana decorrentes da contaminação ambiental por arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio. In: HESS, S.C. (Org.). *Ensaio sobre a poluição e doenças no Brasil*. 1º ed. São Paulo, SP. p. 263-280.
- Carvalho, I.G.; Iyer, S.S.S.; Tassinari, C.C.G. & Misi, A. 1997. Lead and sulfur-isotope investigations of the Boquira sediment-hosted sulfide deposits, Brazil. *International Geology Review*, 5: 39-97.
- CETEM. 2012. *Centro de Tecnologia Mineral. Lavra de minério de chumbo em Boquira (BA) deixa rejeitos com altos teores de metais pesados*. Disponível em: [http://www.cetem.gov.br/s\\_amaro/Boquira.pdf](http://www.cetem.gov.br/s_amaro/Boquira.pdf). Acesso em: 15 de janeiro de 2019
- Clemente, C.M.S.; Leite, M.E. & Pereira, D.M. 2013. Estudo Comparado da Área de Mineração no Município de Itabira/MG nos anos de 1985, 1997 e 2007. *OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia*, 5(13): 84-100.
- CETESB. 2007. *Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*. 2º ed. São Paulo, SP. 389p.
- CONAMA. 2009. *Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº420 – Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências*. Brasília, DF, 20p.
- Conceição, A.S. 2014. *A mineração do chumbo em Boquira: memórias e experiências dos trabalhadores mineiros*. Universidade do Estado da Bahia. Monografia de graduação. Itaberaba – BA, 159p.
- Correia, D.M.B. 2007. *Avaliação dos impactos causados no solo e drenagem a jusante da bacia de contenção dos rejeitos da mina de Boquira-Ba*. Pós-graduação em Tecnologias Geoambientais. Universidade Federal da Bahia. Monografia de Especialização, 68p.
- Cunha, F.G.; Viglio, E.P.; Anjos, J.A.S.A. & Loureiro, T.B. 2016. *Estudos geoquímicos no município de Boquira – Estado da Bahia*. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Rio de Janeiro. 44p. No prelo.
- Deshmukh, D.K.; Deb, K. & Mkoma, S.L. 2012. Size distribution and seasonal variation of size-segregated particulate matter in the ambient air of Raipur city, India. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8: 259-276.
- Ferran, A.P.N.A. 2007. *Mineração e a flotação no Brasil – Uma perspectiva histórica*. Departamento de Produção Mineral (DNPM), Ministério de Minas e Energia-Brasil. 171p.
- Finlayson-Pitts, B.J. & Pitts, J.N.P. 2000. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press, San Diego. 969p.
- Horvarth, H. 2000. Aerosols – an introduction. *Journal of Environmental Radioactivity*, 51: 5-25.
- IBGE. 2010. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base de informações geográficas do setor censitário*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 24 de março de 2019.
- Järup, L. 2013. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68(1): 167–182.
- Martins, E.H.C. & Monteiro, E.M.S. 2017. Riscos à saúde da população causados pela contaminação por chumbo no município de Boquira. *Revista Baiana de Saúde Pública*, [S.I.], 40(2): 114-131.
- Miranda, R.M.; Andrade, M.F.; Fornaro, A.; Astolfo, R.; Andre, P.A. & Saldiva, P. 2012. Urban air pollution: A representative survey of PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 5(1): 63-77.
- NWE. 2019. *National Weather Service. The Beaufort wind force scale*. Disponível em: <http://www.crh.noaa.gov/lot/webpage/beaufort>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- Oliveira, I.S. 2011. *A mineração de chumbo e a produção do território de Boquira-Bahia: impactos socioeconômicos e exploração do trabalho*. Universidade Federal da Bahia – UFBA. Monografia de Graduação. Barreiras – BA, 89p.
- Oliveira, F.; Marques, J. & Bomfim, L. 2017. Ecologia das águas e das almas de Boquira: dilemas socioambientais no sertão baiano. *Revista Ecologias Humanas*, 3(3): 31-52.
- Poveda, E.P.R. 2007. *A eficácia legal na desativação de empreendimentos mineiros*. São Paulo: Signus Editora, 87p.
- Santos, P.H.R. 2014. *Avaliação preliminar dos impactos ambientais da mineração de Pb-Zn de Boquira, Bahia*. Universidade Federal da Bahia – UFBA. Monografia de Graduação, Salvador – BA, 69p.
- Seinfeld, J. & Pandis, S. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. California Institute of Technology: New York. 181p.
- SEI. 2003. *Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Mapa da tipologia climática da Bahia*. Disponível em: [http://www.sei.ba.gov.br/index.phpcom\\_content&](http://www.sei.ba.gov.br/index.phpcom_content&). Acesso em 15 agosto de 2016.
- Tresmondi, A.C.C.L.; Beli, E. & Tomaz, E. 2008. Concentração de material particulado inalável MP10 em Espírito Santo do Pinhal-SP. *Revista Engenharia Ambiental*, 5(1): 133-144.
- Warneck, P. 2000. *Chemistry of the natural atmosphere*. 2ª ed. Academic Press, 927p.
- Wong, C.; Li, X.D. & Thornton, I. 2006. Urban Environmental Geochemistry of Trace Metals. *Environmental Pollution*, 142: 1-16.