

Análise e avaliação da distribuição de metais pesados em um antigo aterro de resíduos sólidos urbanos “Aterro Invernadinha”

MACHADO, Maria Elisabete^{*}; MENEZES, Jean Carlo Salomé dos Santos ^{**}; COSTA, João Felipe C. L. ^{***}
SCHNEIDER, Ivo André Homrich ^{****}

RESUMO

A contaminação por metais em locais que receberam resíduos sólidos urbanos (RSU) é um grave problema ambiental enfrentado atualmente. Este estudo avaliou o teor e a distribuição dos metais pesados níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), cromo (Cr), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) em diferentes profundidades na área de um antigo aterro de RSU, denominado de “Aterro Invernadinha”, o qual está situado no município de Passo Fundo, RS. A metodologia do trabalho baseou-se na realização de furos de sondagem, coletas de amostras em diferentes profundidades do solo (de 0-1 m, de 1-2 m e de 2-3 m) e análise dos metais empregando o método 3050B. A quantificação dos teores dos metais em estudo foi realizada por espectroscopia de absorção atômica com chama. Posteriormente, realizou-se análise estatística e geoestatística unidirecional horizontal para os metais Cu, Zn e Cr, utilizando os softwares GSLIB e VarioWin. A mesma metodologia de coleta e tratamento de dados foi efetuada em uma área de controle, livre de contaminação, situada próxima ao antigo aterro (Reserva Arlindo Haas). Os resultados demonstram teores elevados de metais no solo de recobrimento (0-1 m) e uma grande variabilidade dos dados na área do aterro. A geoestatística foi uma ferramenta eficiente para se verificar a distribuição espacial dos dados e para concluir que há contaminação por Zn em todo o percurso, enquanto que para Cu e Cr a contaminação é pontual e randômica.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Metais Pesados. Geoestatística.

Analysis and evaluation of distribution of heavy metals in an old urban solid waste landfill “Aterro Invernadinha”

Abstract

The metal contamination in areas that received municipal solid waste (MSW) is a serious environmental problem facing today. This study evaluated the content and distribution of heavy metals nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), chromium (Cr), cadmium (Cd) and lead (Pb) in different depths in the old disposal area of MSW, called “Aterro

^{*} Mestre em Engenharia; doutora em Química; professora da Universidade do Oeste de Santa Catarina, Campus de Videira; maria.e.pf@gmail.com

^{**} Mestre e doutor em Engenharia, professor da Universidade do Oeste de Santa Catarina; jean.menezes@unoesc.edu.br

^{***} Mestre e doutor em Engenharia, professor do DEMIN e do PPGEM, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; jfelipe@ufrgs.br

^{****} Mestre e doutor em Engenharia, professor do DEMIN e do PPGEM, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ivo.andre@ufrgs.br

Invernadinha”, which is located in the city of Passo Fundo, RS. The methodology of the study was based on the realization of boreholes, sampling of soil in different depths (0-1 m, 1-2 m and 2-3 m) and analysis of metals using the method 3050B, the quantification of the levels of metals in the study was performed by atomic absorption spectroscopy with flame. Thereafter, there was statistical and geostatistical unidirectional horizontal to Cu, Zn and Cr, using the software GSLIB and VarioWin. The same method of collection and processing of data was performed in a control area, free of contamination, located near of the old landfill (Reserva Arlindo Haas). The results show high levels of metals in the soil covering (0-1 m) and a large variability in the data area of the landfill. Geostatistics is a powerful tool for studying the distribution of spatial data and to conclude that there is contamination by Zn in all the course, while for Cu and Cr is punctual and random.

Keywords: Municipal Solid Waste. Heavy Metals. Geostatistics.

1 INTRODUÇÃO

A disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), no Brasil foi, por muitos anos, realizada na forma de lixões a céu aberto ou aterros controlados. O rigor por parte dos órgãos legisladores e fiscalizadores quanto ao exercício de seu papel de polícia no controle ambiental têm levado cada vez mais ao incremento das práticas de reciclagem e disposição adequada destes RSU.

A Lei nº. 12.305/10 (BRASIL, 2010) considera a destinação dos RSU em aterros sanitários como disposição final ambientalmente adequada; neste caso não há contaminação do solo ou a proliferação de vetores de doenças, sendo os impactos ambientais mitigados. Vários são os trabalhos descritos na literatura apontando o sucesso de tais práticas (BISORDI, 1999; TASELI, 2007; LANER et al., 2012). Contudo, na maioria dos locais onde outrora houve disposição inadequada de RSU (os chamados lixões ou aterros controlados) e que atualmente encontram-se desativados, há sérios passivos ambientais que abrangem desde a contaminação do solo, água e vegetação, até riscos à saúde humana e animal (SANTOS e RIGOTTO, 2008). Estes locais encontram-se, na sua maioria, à espera de uma solução.

Poucos estudos têm sido realizados como objetivo de caracterizar a contaminação existente em locais que receberam RSU e que atualmente encontram-se desativados (BECGATO, et al., 2009; ELIS e ZUQUETTE, 2002). De acordo com Xiaoli e colaboradores (2007), um dos principais problemas encontrados é o alto teor de metais pesados no solo e vegetação. Metais pesados como níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), cádmio (Cd) chumbo (Pb), e cromo (Cr), estão presentes em diversos tipos de resíduos dispostos em aterros, como lâmpadas, pilhas, baterias, restos de tintas, latas, dentre muitos outros produtos tóxicos.

O excesso de metais pesados no solo aumenta a possibilidade de inserção dos mesmos na cadeia alimentar e, conseqüente, contaminação dos integrantes bióticos (OLIVEIRA e JUCÁ, 2004; PRADEEP et al., 2005). Além disso, pode haver a lixiviação destes metais no solo com subsequente contaminação do lençol freático (FLYHAMMAR, 1997).

Os estudos de metais pesados em locais de disposição de RSU têm se limitado a uma avaliação dos teores totais de forma aleatória no solo superficial, o que não dá ideia de sua mobilidade e distribuição no ambiente. Assim sendo, uma avaliação criteriosa da distribuição espacial dos metais pesados e em diferentes profundidades pode fornecer informações valiosas a respeito do comportamento dos mesmos no ambiente, bem como de mecanismos que minimizem a contaminação.

Dentre as práticas possíveis de caracterização espacial de variáveis no solo, destacam-se a estatística e a geoestatística; esta última, uma ferramenta computacional capaz de avaliar a distribuição e variabilidade em uma determinada área, a partir de um número restrito de amostragem (SEGUI et al., 1994). A geoestatística

usa a dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores distribuídos em um local não amostrado, sem tendência e com variância mínima (MATERN, 1961; MATHERON, 1963; MCBRATNEY et al., 1999; STEIN e ETTEMA, 2003). Trabalhos têm abordado a elaboração de estratégias amostrais em solo apropriadas aplicando a geoestatística (WEBSTER; OLIVER, 1992; KERRY; OLIVER, 2004). Entretanto são escassos os estudos envolvendo a aplicação desta abordagem no monitoramento de áreas de RSU (CRITTO, CARLON; MARCOMINI, 2003; GUILLEN; HERTZOG, 2004).

O objetivo do presente estudo foi avaliar o teor e a distribuição dos metais pesados níquel, cobre, zinco, cromo, cádmio e chumbo em diferentes profundidades no solo de um antigo aterro de RSU empregando a geoestatística como ferramenta para inferir a distribuição espacial dos metais no solo de recobrimento.

2 METODOLOGIA

2.1 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DO LOCAL

A área analisada no presente estudo está localizada na região Sul do Brasil, ao Norte do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Passo Fundo. Está compreendida entre os paralelos 6878000UTM e 6870000UTM de latitude Sul e os meridianos 356000UTM e 366000UTM de longitude Leste. O clima local é descrito como subtropical úmido, com chuva bem distribuída durante o ano e temperatura média anual de 17,5 °C.

O antigo aterro de RSU, denominado Aterro Invernadinha situa-se junto à BR-285, entre o Campus da Universidade de Passo Fundo e a EMBRAPA-Trigo, com área correspondente a 57,6 m². É limitada em sua porção superior por uma estrada para acesso interno e um talude de grande inclinação. Em sua porção mais baixa há um banhado cortado por um pequeno corpo d'água e estreita mata ciliar. O solo local é classificado como um latossolo vermelho distrófico, típico de todo o planalto médio do Rio Grande do Sul. Estes solos são profundos, bem drenados, possuindo horizonte A de coloração vermelha escura, argiloso (LEMOS, 1973).

O município empregou a referida área como local para disposição de RSU nas décadas de 70 e 80 (disposição antiga). Em 1991, a prefeitura encerrou oficialmente a disposição de resíduos. Desde então, o local encontra-se desativado, o que não impediu o eventual recebimento de resíduos domésticos e industriais e, muito frequentemente, restos de podas e jardins depositados clandestinamente (disposição recente). O local foi utilizado na forma de aterro controlado e no seu fechamento foi disposta uma camada de aproximadamente 10 cm de solo, onde atualmente cresce vegetação pioneira. Um mapa planialtimétrico da área do Aterro Invernadinha está apresentado na-Figura 1.

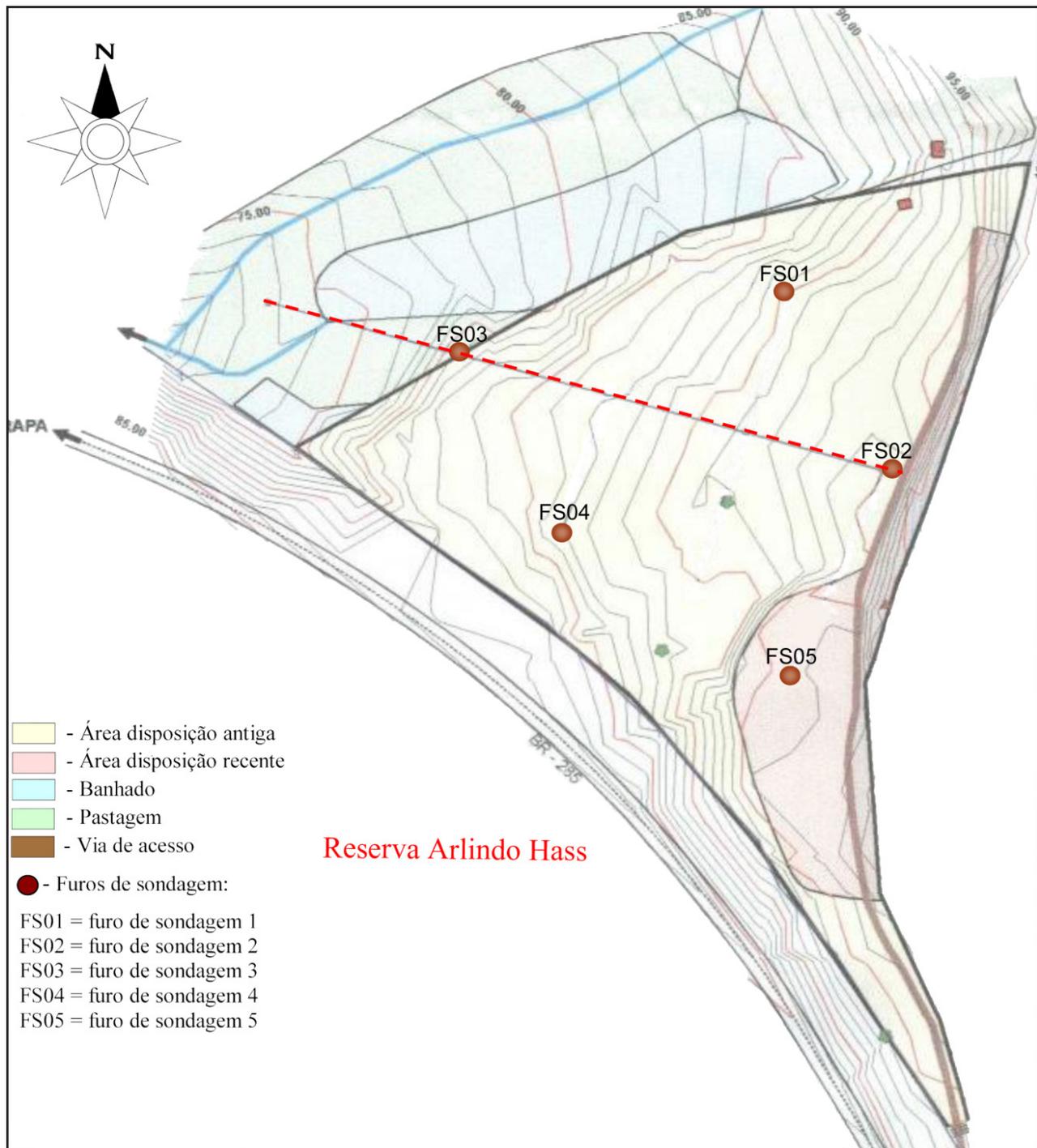


Figura 1 - Mapa do Aterro Invernadinha mostrando os pontos principais.

Fonte: Os Autores.

A área empregada neste trabalho como controle para avaliação do solo foi a Reserva Arlindo Haas. Esta possui 22 ha e está situada ao Oeste do Aterro Invernadinha, sendo que a BR-285 divide os dois locais (Figura 1). A Reserva é uma unidade de conservação cuja vegetação predominante é a Mata de Araucárias, típica do bioma original da região de Passo Fundo.

2.2 FUIROS DE SONDAGEM

A sondagem foi realizada de acordo com o teste padrão de penetração (do inglês, *Standard Penetration Test*, SPT). Realizaram-se cinco perfurações em distintos locais do aterro, visando a distribuí-los, uniformemente, na área. As sondagens tiveram como objetivo a coleta de amostras do solo em diferentes profundidades. O material foi coletado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986). Os pontos onde foram realizados os furos de sondagem estão demarcados na Figura 1 (de F01 a F05).

2.3 ANÁLISES DE METAIS NO SOLO

Para se obter um diagnóstico dos teores de metais no local, foram realizadas duas campanhas de amostragem. A primeira foi realizada de forma aleatória e teve como objetivo obter informações sobre o comportamento e teor de metais na área. A segunda campanha de amostragem foi realizada de forma sistemática, com o objetivo de avaliar a distribuição espacial dos metais ao longo da área de estudo para posterior análise geoestatística.

2.4 ANÁLISE DE METAIS NO SOLO - ESTUDO PRELIMINAR

Na primeira campanha avaliou-se a concentração dos metais Ni, Cu, Zn, Cr, Cd e Pb, os quais foram escolhidos com base na literatura científica (metais mais encontrados em locais de disposição de RSU) e, também, com a disponibilidade no laboratório. Avaliou-se o perfil vertical do solo. Com auxílio dos cinco furos de sondagem, foram obtidas amostras do solo em diferentes profundidades.

2.5 ANÁLISE DE METAIS NO SOLO – ESTUDO GEOESTATÍSTICO

A segunda campanha de amostragem levou em consideração a influência da topografia na variabilidade horizontal dos metais no solo de recobrimento do aterro. Porém, foram analisados somente os metais de concentração bastante acima da correspondente concentração na área controle ou dos padrões estabelecidos como referência (CETESB, 2001). Para tanto, a coleta de amostras foi feita em uma única direção, perpendicular às curvas de nível, próximo à sua porção mediana. Foram demarcados e geoposicionados trinta pontos dentro da área do aterro, distanciados em espaços de 5m, totalizando uma seção de 150m (Figura 1, linha pontilhada em vermelho). Em cada ponto de amostragem foram tomadas amostras do solo na mesma profundidade de 0 a 1m, uma vez que cada nível edafológico tem uma capacidade diferente de adsorção dos elementos. Os metais avaliados foram Cu, Zn e Cr (apresentaram concentração alterada na primeira campanha amostral).

Em paralelo, realizou-se uma campanha amostral na Reserva Arlindo Haas, seguindo-se os mesmos critérios aplicados na campanha de amostragem no aterro. Ou seja, a demarcação de um transecto com 30 pontos amostrais distanciados 5m entre si, perpendicular às curvas de nível, ao qual se seguiu a mesma metodologia de coleta e análise adotadas no Aterro Invernadinha.

2.6 ANÁLISES QUÍMICAS DE METAIS NO SOLO

As amostras de solo, coletadas em nas duas campanhas de amostragem passaram por uma etapa de preparo antes da análise. Inicialmente as amostras foram quarteadas de acordo com a NBR 10.007 (ABNT, 2004). Após, foram secas em estufa a uma temperatura de 65 °C, por 24 horas. A seguir, as amostras foram

peneiradas em malha com abertura de 1mm, para eliminar possíveis resíduos presentes no solo e obter todas as amostras com igual granulometria.

A análise dos metais pesados foi realizada de acordo com o método EPA 3050B (*Environmental Protection Agency*, EUA, 1996). Esse método utiliza como abertura, ácido nítrico e água oxigenada, com aquecimento em chapa elétrica e libera os metais ligados à matéria orgânica, óxidos e outras frações minerais. A detecção dos compostos foi realizada por absorção atômica com chama (modelo 220 da Varian).

2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOSTATÍSTICA DOS METAIS PESADOS NO SOLO

Com os resultados das análises químicas, provenientes da segunda campanha de amostragem, foram construídos dois bancos de dados, um referente ao Aterro Invernadinha e o outro referente à Reserva Arlindo Haas, tendo como objetivo comparar a distribuição dos metais na superfície do solo do aterro com o solo da área de referência.

Para o tratamento estatístico dos dados empregou-se o *software* GSLIB (DEUTHSCH e ; JOURNAL, 1998). Para a aplicação da geoestatística, o *software* VarioWin (PANNATIER, 1996). Inicialmente, foi realizado tratamento estatístico dos dados com o objetivo de verificar o seu comportamento. Com o aplicativo *histplt*, obteve-se a estatística univariada: média, mediana, moda, desvio padrão, variância, coeficiente de variação e assimetria. Por meio do aplicativo *scatterplot*, obteve-se os diagramas de dispersão, cujo objetivo foi apresentar as correlações entre variáveis coletadas nas mesmas posições de espaço. A análise geoestatística, teve como objetivo avaliar a distribuição dos metais nos locais não amostrados nas áreas em investigação, empregou-se para tal, o aplicativo *pixelplt*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DE METAIS EM DIFERENTES PROFUNDIDADES – PRIMEIRA CAMPANHA DE AMOSTRAGEM

Na Tabela 1 é possível visualizar os resultados obtidos na primeira campanha amostral, onde se avaliou a concentração dos metais Ni, Cu, Zn, Cr, Cd e Pb em diferentes locais e profundidades na área do aterro Invernadinha. Os valores são comparados com os obtidos no solo superficial na área controle, a Reserva Arlindo Haas.

Como pode ser observado na Tabela 1, houve uma maior concentração de Cu, Zn e Cr em todos os pontos amostrados. Segundo Prudent e colaboradores (1996), estes metais estão presentes principalmente em plásticos, calçados, borracha, resíduos eletrônicos e metais ferrosos depositados em locais de aterro de RSU. Com base nos níveis estabelecidos pela CETESB (2001), os metais pesados foram encontrados na seguinte ordem: Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd. Este resultado mostra que o local encontra-se contaminado principalmente por Zn, Cu e Cr. Os maiores teores encontram-se na região central do aterro (vide Figura 1 F02 e F03) e na região superficial, até 1m de profundidade (Tabela 1). Comparando-se os teores de cada metal com relação à altura, verifica-se uma tendência de redução da concentração dos mesmos com o aumento da profundidade. A mesma tendência foi observada no trabalho desenvolvido por Achiba e colaboradores (2009), o qual investigou a mobilidade dos metais em composto de RSU.

Tabela 1- Concentração de metais em diferentes profundidades coletadas nos Furos de sondagem na área do Aterro Invernadinha e no solo superficial na reserva Arlindo Haas

Furo de sondagem	Profundidade (m)	Concentração de Metal (mg kg ⁻¹)											
		Ni		Cu		Zn		Cr		Cd		Pb	
		AI ^a	RA ^b	AI ^a	RA ^b	AI ^a	RA ^b	AI ^a	RA ^b	AI ^a	RA ^b	AI ^a	RA ^b
FS01	0 - 1	10,5	50,0	360,2	100	572,3	500	386,1	300	2,0	10	32,3	200
	1 - 2	9,0		76,3		150		148,6		<1,0		27,8	
	2 - 3	5,2		47,8		488		76,3		<1,0		36,0	
FS02	0 - 1	40,6		544,6		3010,0		1120		1,7		38,9	
	1 - 2	38,9		83,0		576,3		166,9		3,2		19,3	
	2 - 3	32,8		69,8		187,1		97,3		3		13,4	
F03	0 - 1	51,9		321,3		1200		914,7		4,8		85,4	
	1 - 2	45,1		178,2		423,8		60,2		4,9		41,3	
	2 - 3	31,1		84,6		422,7		28,4		1,3		13,3	
F04	0 - 1	39		362		515		60		1,5		277	
	1 - 2	31		78,2		291		105		5,9		64	
	2 - 3	27		49,7		310		92		4,2		172	
F05	0 - 1	39		134		850		349		2		106	
	1 - 2	16		81		270		151		1,4		86	
	2 - 3	14		64		136		94		1,1		47	

^a AI- Aterro Invernadinha^b RA - Reserva Arlindo Haas

Fonte: Os Autoes.

Tendo em vista a alta variabilidade nos níveis de metais nos locais amostrados, partiu-se para o estudo geoestatístico, já que esta ferramenta viabiliza a determinação em locais não amostrados com variabilidade mínima. Foram investigados os metais no solo superficial visto que estes foram os teores mais altos encontrados na investigação em diferentes profundidades.

3.2 ANÁLISE DE METAIS NO SOLO SUPERFICIAL – SEGUNDA CAMPANHA DE AMOSTRAGEM

3.2.1 Estudo estatístico

Especificamente, na segunda campanha de amostragem, buscou-se conhecer os níveis de contaminação dos metais Cu, Cr e Zn, ou seja, estimar quais as concentrações espaciais desses elementos no solo de recobrimento. Os metais foram avaliados através da coleta de amostras de solo em uma única direção, perpendicular às curvas de nível (percorrendo todo o local de disposição) conforme pode ser visto na Figura 1, linha pontilhada em vermelho (ponto F02 ao ponto F03).

A partir dos resultados das análises por absorção atômica, montou-se um banco de dados o qual serviu como base para os estudos estatísticos e geoestatísticos. Utilizando o *software* GSLIB, foram gerados os histogramas (Figura 2), onde é possível verificar estatisticamente a grande variabilidade dos dados.

Estatisticamente, o parâmetro de tendência ou posição central mais conhecido e utilizado é a média aritmética, outro parâmetro de tendência central é a mediana, que representa o valor central da variável quando as observações são classificadas em ordem crescente (TRIOLA, 1999). Portanto a quantidade de valores menores e maiores que a mediana são iguais.

Matematicamente a mediana é menos tratável que a média, mas apresenta a vantagem de ser menos sensível a valores discrepantes. Geralmente as medidas de tendência central não são suficientes para descrever plenamente um conjunto de dados, sendo necessário utilizar medidas como o desvio padrão e o coeficiente de variação (LANDIM, 2003). O desvio padrão dá ideia do afastamento dos valores em relação à média estimada e, o coeficiente de variação, a precisão com que foi realizado o experimento (TRIOLA, 1999).

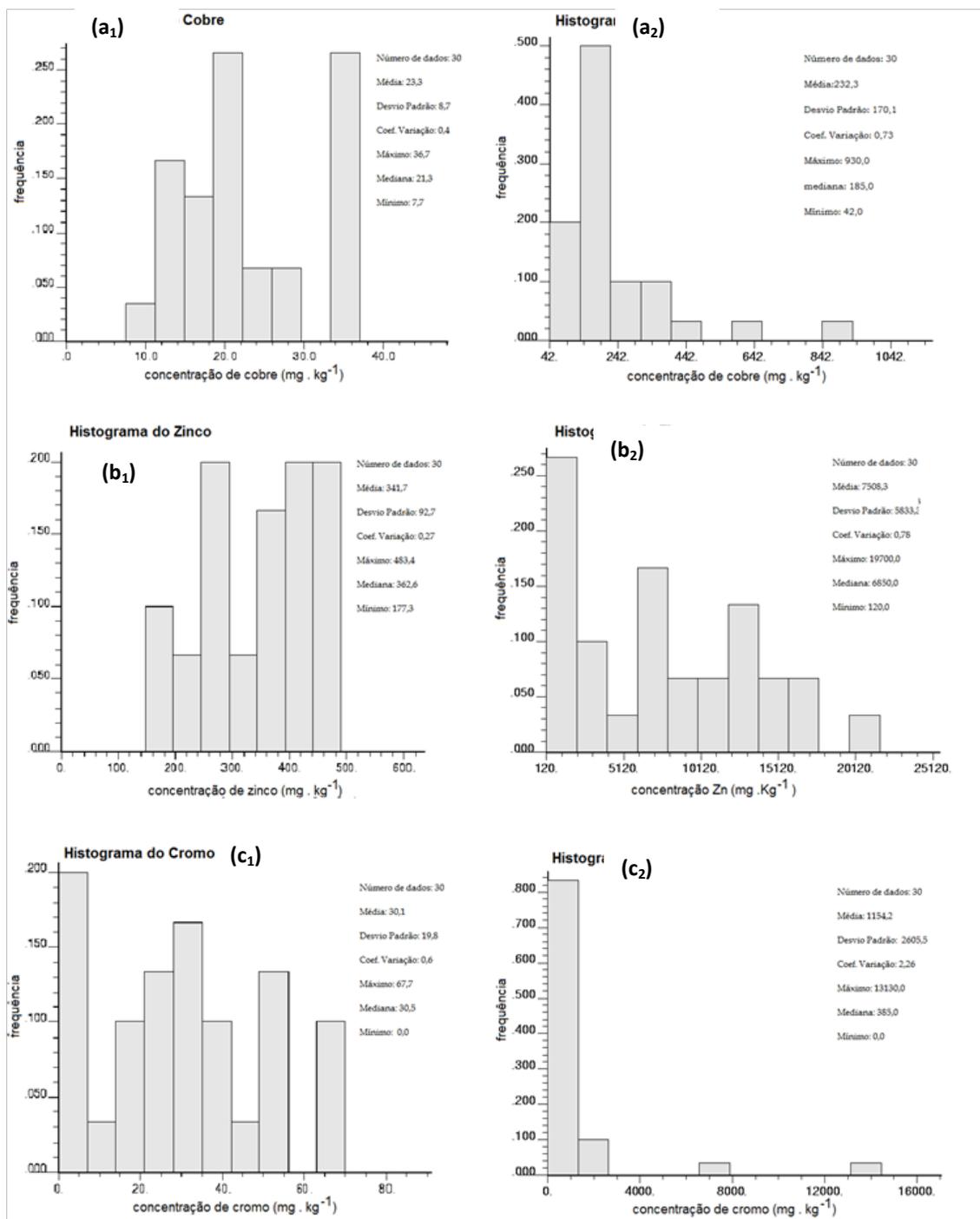


Figura 2 - Histograma de frequência para os metais cobre (a), zinco (b) e cromo (c) no solo superficial (0-1m) do Aterro Invernadinha (1) e da Reserva Arlindo Haas (2).

Fonte: Os Autores.

Uma avaliação estatística dos dados, a partir da Figura 2, facilmente se verifica através do desvio padrão (terceira linha nos histogramas da Figura 2) que a variabilidade para os três metais em estudo é alta no Aterro Invernadinha. Considerando-se que os RSU foram dispostos de forma heterogênea e encontram-se em diferentes estágios de transformação, justificam-se os valores encontrados. Pelos histogramas também se observa que o conjunto de dados distribui-se diferentemente para cada metal em estudo. No Aterro Invernadinha, percebe-se que o Zn não apresenta valores agrupados em uma faixa definida de teores, mas sim, distribui-se por todas as classes definidas. Média e mediana são próximas (segunda e sexta linha da Figura 2 b₁). Os metais Cu e Cr apresentam comportamento oposto. Há concentração de valores em faixas estreitas de teores e pontos aleatórios de maior concentração. Já na Reserva Arlindo Haas, os valores são melhor distribuídos em torno da média para os três metais.

A apreciação dos resultados do sumário estatístico do cromo mostra a relativa distância entre a média (1154,2) e a mediana (385,0) levando a entender que os dados apresentam valores totalmente extremos.

Com base na média é possível evidenciar a elevada concentração de metais na área que recebeu RSU em relação à área de controle. Todos os metais apresentaram coeficiente de variação próximo a 1, o que indica certa fidedignidade para realização das estimativas, o que dificulta a extrapolação espacial destes para todo o local. Neste caso, a geoestatística se torna uma ferramenta viável para o caso em estudo já que se utiliza da dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores distribuídos em um determinado espaço, sem tendência e com variância mínima (MATERN, 1961; MATHERON, 1963; SEGUI et al., 1994).

3.2.2 Estudo geoestatístico

O objetivo deste item foi ajustar um modelo que descreva o padrão de variabilidade espacial dos dados do Aterro Invernadinha constantes no banco de dados em estudo. As variáveis regionalizadas geradas pelo *software* VarioWin (PANNATIER, 1996), apresentam como característica principal a continuidade geográfica que se manifesta pela tendência que a variável tem de apresentar valores muito próximos em dois pontos vizinhos e mais diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes.

A partir do tratamento de dados realizado com o programa VarioWin, obteve-se os diagramas de cores para a área do Aterro (Figura 3 a₂, b₂ e c₂) e também para a área de controle, a Reserva Arlindo Haas (Figura 3 a₁, b₁ e c₁). Na Figura 3, o eixo x representa a linha de amostragem, onde foi aplicada a geoestatística. O diagrama gerado pelo *software* permite verificar, através da intensidade das cores, os valores para os locais não amostrados. (conforme linha indicativa a esquerda da Figura 3)

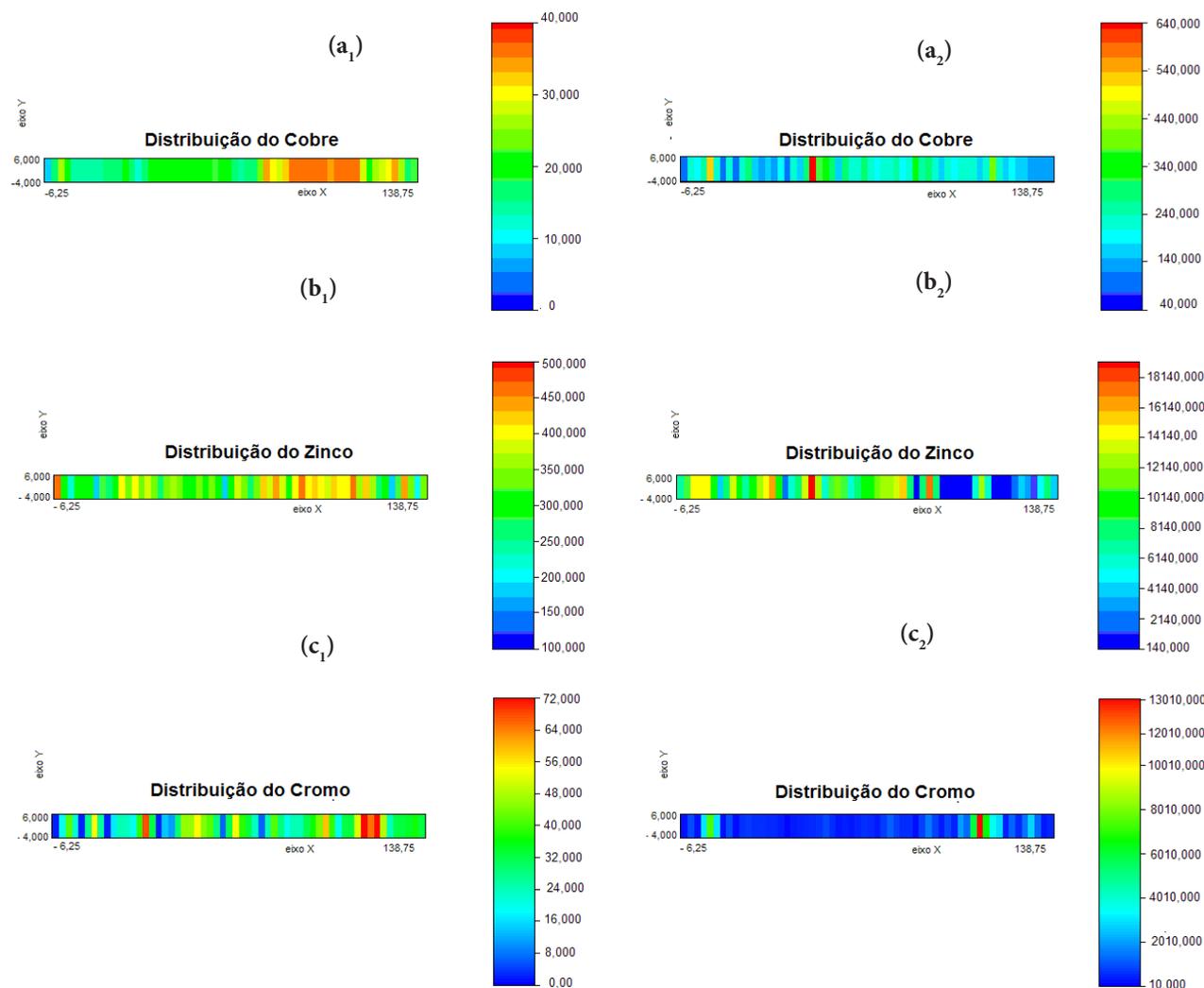


Figura 3 - Distribuição da concentração de zinco, cobre e cromo no Aterro Invernadinha (a₂, b₂ e c₂) e na Reserva Arlindo Haas (a₁, b₁ e c₁), direção Leste – Oeste.

Fonte: Os Autores.

Os valores naturais de cobre para solos situam-se entre 35 e 60 mg kg⁻¹ (CETESB, 2001). A Reserva Arlindo Haas não apresenta indícios de contaminação, já que a maioria dos pontos analisados encontram-se entre 8 e 37mg kg⁻¹ (Figura 3 a₁). A distribuição no transecto analisado na área do Aterro Invernadinha mostrou valores acima do esperado no ambiente natural, com teores variando de 48 a 641mg kg⁻¹ (Figura 3 a₂) podendo caracterizar a área como contaminada por este metal. Os valores mais elevados de cobre apresentam-se distribuídos de forma randômica, não havendo correlação com alguma região específica do Aterro. Cabe ressaltar que pontos de elevada concentração deste elemento são circundados por pontos de baixa concentração evidenciando a desconexão topografia/concentração.

Os valores naturais de zinco para solos situam-se entre 60 e 300 mg kg⁻¹ (CETESB, 2001). Os índices encontrados na Reserva Arlindo Haas variaram de 177 a 483 mg kg⁻¹, (Figura 3 b₁) mostrando ser essa a típica concentração de zinco neste ambiente. Dos pontos amostrados no Aterro Invernadinha, poucos apresentaram teores que estão dentro destes limites. Os valores de zinco variaram de 144 a 19055mg kg⁻¹ (Figura 3 b₂). Os menores teores encontram-se nos extremos da linha amostral, fora do local de disposição de resíduos propriamente dito. No restante do percurso analisado, os valores são bastante altos, com uma tendência de maior concentração na parte mais alta do aterro.

Para o cromo, os valores naturais em solos situam-se entre 40 e 300 mg kg⁻¹ (CETESB, 2001). A Reserva Arlindo Haas não apresenta contaminação por cromo, pois os valores variaram de 1 a 68mg kg⁻¹ (Figura 3 c₁). Dos pontos amostrados no Aterro Invernadinha, verificou-se que a maior parte está na faixa entre 19 e 1000mg kg⁻¹(Figura 3 c₂). Porém, existem locais onde o teor é extremamente alto (chegando a 13130mg kg⁻¹), indicando que a contaminação existente na área é pontual. Isso ocorre provavelmente devido à disposição aleatória de aparas de couro curtidas ao cromo, que ainda hoje podem ser observadas a céu aberto.

A partir do *software Scatplt* (DEUTSCH e JOURNAL, 1998) foi possível verificar as correlações entre variáveis definidas nas mesmas posições de espaço. A Figura 4 apresenta os gráficos de correlação entre os metais estudados.

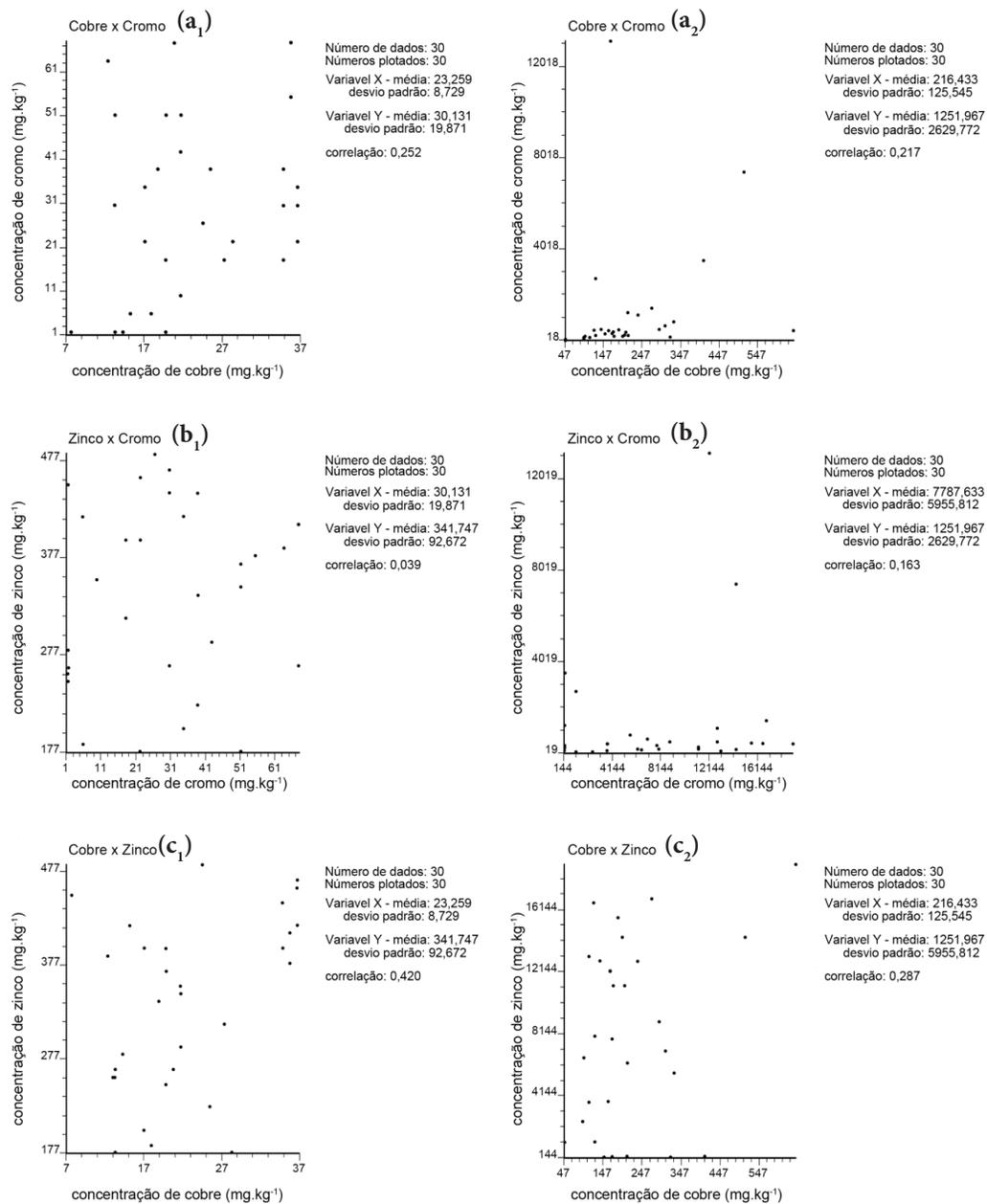


Figura 4 - Correlação entre a distribuição dos metais cobre e cromo, cobre e zinco e zinco e cromo nos pontos de amostragem obtidos no Aterro Invernadinha e na Reserva Arlindo Haas.

Fonte: Os Autores.

Pode-se observar que, nas três situações avaliadas na área do aterro Invernadinha, a correlação entre os elementos foi baixa: cobre e cromo, correlação de 0,217 (Figura a₂), cobre e zinco, correlação de 0,287 (Figura c₂) e zinco e cromo, correlação de 0,163 (Figura b₂). A maior correlação foi obtida entre os elementos cobre e zinco, o que de certa forma pode ser esperado por serem os constituintes majoritários da liga metálica conhecida como “latão”, abundante em embalagens e presente nos resíduos doméstico. Percebe-se que há também certa correlação entre as variáveis cobre e cromo, estando esta concentrada nos valores mais baixos. Nos valores mais altos de cromo, os valores de cobre são baixos, o que confirma a possível fonte de cromo nestes pontos devido às aparas de couro, dispostas no local. Da mesma forma, valores altos de cobre também foram encontrados com valores baixos de cromo.

Já a correlação apresentada pelos metais na área da reserva Arlindo Haas demonstram correlações diferenciadas e bem distribuídas ao longo da área, evidenciando ser esta a distribuição em ambiente não contaminado.

4 CONCLUSÃO

A avaliação do teor e da distribuição dos metais na área do Aterro Invernadinha indicaram que o solo encontra-se contaminado, entre os elementos selecionados para o estudo, Cu, Zn, Cr e Pb, pelo menos em algum ponto amostrado apresentaram teores superiores aos padrões de referência. Observou-se uma tendência de diminuição dos teores de metais em relação ao aumento da profundidade.

As concentrações mais elevadas foram encontradas no solo de cobertura (0 a 1m). Os elementos em maior quantidade são o Zn, Cu e Cr, que na parte superficial do Aterro ultrapassam os níveis de intervenção, conforme valores orientadores estabelecidos pela CETESB. Da mesma forma, os teores de metais na área do Aterro Invernadinha são bem mais elevados do que os encontrados na Reserva Arlindo Haas, considerada como padrão de solo não contaminado.

Por meio dos histogramas foi possível verificar estatisticamente a grande variabilidade dos metais em estudo.

A aplicação da geoestatística permitiu verificar a distribuição espacial dos dados e também a grande variabilidade nos dados levantados na área do Aterro Invernadinha, quando comparado aos dados da Reserva Arlindo Haas. Há contaminação por Zn em praticamente todo o percurso analisado. A contaminação por Cu e Cr também é evidente, porém de forma mais pontual e randômica. Os valores de correlação entre os elementos estudados foram baixos. A maior correlação encontrada foi a de cobre e zinco.

Com vistas à recuperação da área, pode-se dizer que a mesma se encontra contaminada e que isso deve ser levado em conta em qualquer iniciativa de recuperação e reúso da área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio financeiro (processo 477182/01-1), à CAPES pelas bolsas concedidas, à Universidade de Passo Fundo e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo apoio disponibilizado.

REFERÊNCIAS

ACHIBA, W.B. et al. Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.130, p. 156–163, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Resíduos sólidos**: classificação, NBR 10.004. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6457/86**: amostra de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

BECEGATO, V.A. et al. Investigações geofísicas aplicadas no lixão desativado do município de Saudade do Iguaçu-PR. **Revista Geográfica Acadêmica**, v.3, n., 12009.

BISORDI, M.S. Encerramento e Projetos de Recuperação Ambiental de Aterros Sanitários. In: SEMINÁRIOS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, ABGE, São Paulo, 1999, São Paulo, **Anais...** São Paulo, p.69-81, 1999.

BUSINELLI, D. L. et al. Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. **Science of the Total Environment**, v. 4, n.7. p. 1426-1435, 2009.

BRASIL, **Lei 12.305** de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 20 de mar. de 2012.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas**. São Paulo: CETESB, 2001.

CRITTO, A.; CARLON, C.; MARCOMINI, A. Characterization of contaminated soil and groundwater surrounding an illegal landfill (S. Giuliano, Venice, Italy) by principal component analysis and kriging. **Environmental Pollution**, v.122, p.235-244, 2003.

DEUTSCH, C.V. JOURNAL, A.G. GSLIB. **Geostatistical Software Library and User's Guide**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 369 p.

ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L.V. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 32, n.1, p. 119-134, 2002.

EPA. Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. Método 3050B, 1996. 12 p.

GUILLEN, D.P.; HERTZOG, R.C. A survey of department of energy – sponsored geophysical research for shallow waste site characterization. **Vadose Zone Journal**, v.3, p.122-133, 2004.

FLYHAMMAR, P. Estimation of heavy metal transformations in municipal solid waste. **Science of the Total Environment**, v.198, n. 2, 30 p. 123-133, 1997.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. Average variograms to guide soil sampling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, p. 307-325, 2004.

LANER, D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. **Waste Management**, v. 32, p. 498-512, 2012.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo. UNESP. 2003. 253 p.

LEMOS, R. C. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Boletim Técnico nº 30**. Recife: Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973.

McBRATNEY, A. B. et al. A purposive sampling scheme for precision agriculture. In: STAFFORD, J.J. (Ed.). **Precision Agriculture'99**. Sheffield: Academic Press, 1999. p.101-110.

MATERN, B. **Spatial Variation**. Stockholm: Almaenna Foerlaget, 1961.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, v.58, p.1246-1266, 1963.

OLIVEIRA, J. S.; JUCÁ, J. F. Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.9., n.3, p.211-217, 2004.
PANNATIER, Y. **VARIOWIN**: software for spatial data analysis in 2D. Springer-Verlag, 1996.

PRADEEP, J. et al. Heavy Metal in soil reclaimed from a municipal solid waste landfill. **Waste Management**, v.25, p.25-35, 2005.

PRUDENT, M.; DOMEIZEL, C. MASSIANI, Chemical sequential extraction as decision-making tool: application to municipal solid waste and its individual constituents. **Science of Total Environmental**, v. 178, p. 55-61, 1996.

SANTOS, G.O.; RIGOTTO, R.M. Possíveis impactos sobre o ambiente e a saúde humana decorrentes dos lixões inativos de Fortaleza (CE). **Revista Saúde e Ambiente / Health and Environment Journal**, v. 9, n. 2, p. 45-58, 2008.

SEGUI, J. et al. O Uso da Geoestatística na Delimitação de Áreas Contaminadas por Metais Pesados. **Egatea**, v.2, n.2, p.63-72,1994.

STEIN, A.; ETTEMA, C. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.94, p.31-47, 2003.

TASELI, B.K. The impact of the european landfill directive on waste management strategy and current legislation in Turkey's specially protected areas. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 1, p. 119-135, 2007.

TRIOLA, M.F. **Introdução à estatística**. Rio de Janeiro: LTC. 7. ed., 1999. 410 p.

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **European Journal of Soil Science**, v.43, p.177-192, 1992.

XIAOLI, C. et al. Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: Implications in risk assessment and reclamation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 144, n. 1-2, p. 485-491, 2007.

Recebido em 17 de abril de 2012

Aceito em 22 de maio de 2012