



Relação entre degradação de resíduos sólidos domiciliares e alterações na resistividade elétrica e potencial redox

César Augusto Moreira, Leonardo Zani Castello, Antônio Celso de Oliveira Braga, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, IGCE/UNESP - Campus Rio Claro.

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A correlação entre variações do parâmetro resistividade elétrica e potencial redox a partir de medidas realizadas em sete valas em um aterro de resíduos sólidos domiciliares, com datas de fechamento entre 2001 e 2007, permitiu a análise de variações no comportamento geoquímico do produto lixiviado, durante o processo de degradação de materiais orgânicos.

Introdução

A avaliação de contaminações provocadas por aterros de resíduos sólidos é uma questão que envolve a análise integrada do meio físico/geológico. Os aspectos fundamentais necessários à caracterização de tais áreas e pedológicos.

A aplicação dos métodos geofísicos em estudos e

monitoramento de áreas impactadas por contaminantes, é crescente diante da demanda de novas técnicas de investigação ambiental. A possibilidade de aquisição de dados em larga escala a um custo relativamente baixo por meio de instrumentos de medição, permite uma avaliação mais adequada do ambiente, principalmente quando integrado a resultados diretos de investigação.

Alterações no processo de aeração no solo podem afetar drasticamente o conteúdo e a proporção de elementos químicos. Mudanças adicionais em sua estrutura podem criar zonas onde a difusão de oxigênio é restrita, tais como pequenos canais ou poros com água no interior de agregados, que resulta em consumo de oxigênio mais acentuado, em relação ao oxigênio sob a forma de gás.

Em zonas onde o acesso de ar é mais eficiente, a decomposição de compostos orgânicos é facilmente processada, cuja intensificação resulta na queda dos níveis de oxigênio em compostos orgânicos. Medidas de potencial redox (Eh), portanto, representa uma alternativa para avaliação de estados de oxidação e redução em áreas contaminadas.

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação do método de Eletrorresistividade, por meio da técnica de caminhamento elétrico, concomitante a coleta de solo e

realização de medidas de potencial redox em um aterro de resíduos sólidos domiciliares do tipo vala. Foram selecionadas valas com períodos distintos de fechamento, com o objetivo de verificar a relação entre variações nos parâmetros medidos e o tempo de degradação dos materiais orgânicos. Os dados permitem apontar padrões distintos de resistividade elétrica, correlacionáveis a variações de potencial redox.

Área de Estudos

O aterro municipal de Cordeirópolis está localizado na Rodovia Cássio de Freitas Levi, km 4,5, Estado de São Paulo, Brasil (Figura 1). O município de Cordeirópolis produz lixo à taxa de 6m³/dia.

A área de estudos é um aterro controlado do tipo vala, para deposição apenas de resíduos sólidos domiciliares. O sistema de operação consiste na abertura de valas com 5m de profundidade por 4m de largura e 80m de comprimento, abertas na direção NW/SE, para deposição de resíduos diretamente sobre o solo e posterior recobrimento com 1m de solo. Possui 48.400m² de área disponível e início das atividades em novembro de 2001, com vida útil estimada em 20 anos.

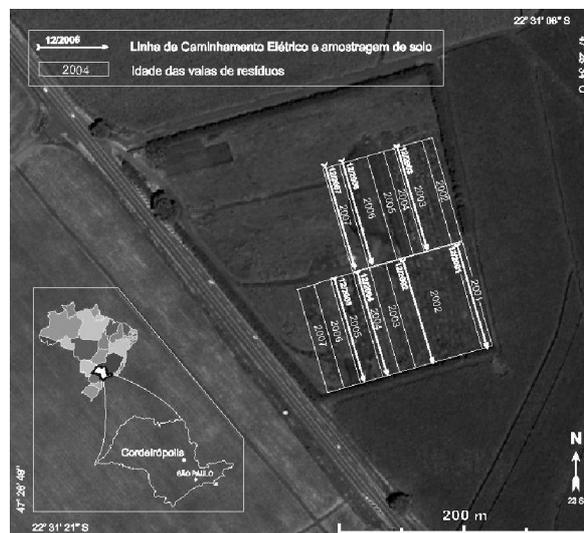


Figura 1 – Área de Estudos

A topografia da área do aterro é bastante plana, com altitude entre 660m e 559m e declive médio de 0.5% sentido sudeste. O substrato é constituído por solo argiloso com 10m de espessura, sobre um corpo de

diabásio fraturado com 15m de espessura. Abaixo de 25m de profundidade ocorrem arenitos finos e siltitos pertencentes à Formação Tatuí. O aterro é cercado por fazendas de cultivo de cana de açúcar.

O nível freático está situado a uma profundidade média de 50m, determinado por meio de sondagens elétricas verticais, com fluxo d'água subterrânea para sudeste. Distante 500m do aterro em sentido sudeste, ocorre um pequeno córrego na cota 600m.

Não existem poços de monitoramento ou quaisquer outras formas ou procedimentos de monitoramento implantados até o momento na área do aterro ou adjacências.

Características dos Contaminantes

Plumas de contaminação proveniente de resíduos sólidos são freqüentemente caracterizadas por uma solução de quatro grupos de poluentes (Christensen et al., 1994):

- Matéria orgânica dissolvida, expresso pela demanda química de oxigênio ou carbono orgânico total, incluindo CH₄, ácidos graxos voláteis e compostos mais refratários como húmicos e fúlvicos.

- Macrocomponentes inorgânicos como Ca, Mg, Na, K, NH₄⁺, Fe, Mn, Cl, SO₄²⁺ e HCO₃⁻.

- Metais pesados: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn.

- Compostos orgânicos derivados de petróleo, que incluem hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos clorados alifáticos.

- Outros compostos podem ser encontrados neste ambiente, como B, As, Se, Ba, Li, Hg, e Co, sempre em concentrações muito baixas e de importância secundária.

O material lixiviado proveniente de aterros recentes é freqüentemente caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos (STD), mas grande parte da massa biodegradada é fragmentada com o tempo e a concentração destes parâmetros decresce no material lixiviado de aterros antigos (Quadro 1).

Este material contém substâncias tóxicas e perigosas em formas sólidas e gasosas e podem apresentar elevadas concentrações dos íons cloreto, ferro e zinco. Os elementos com elevada mobilidade iônica geralmente apresentam altas concentrações em comparação aos

O pH geralmente aumenta com o tempo, pois formas ácidas iniciais tendem a estados neutralizados, com decréscimo da demanda de oxigênio químico e biológico (Quadro 1).

A quantidade de água subterrânea contaminada resultante da invasão de material lixiviado depende da hidrogeologia da área e da capacidade de atenuação do substrato. Este processo pode ser efetivo por diluição e dispersão em água subterrânea, nos aquíferos de elevada permeabilidade e condutividade hidráulica. No caso de aquíferos menos permeáveis ou de baixa condutividade hidráulica, a contaminação carregada com

sais inorgânicos pode provocar mineralizações no aquífero (Meju, 2000).

Tabela 1 - Mudanças típicas nas concentrações de lixívia com a idade do resíduo (Farquhar, 1989; Birks & Eyles, 1997) (valores em mg/L).

Parâmetro	Idade do resíduo		
	0 - 5 anos	5 - 10 anos	10 - 20 anos
STD	10000 - 25000	5000 - 10000	2000 - 5000
pH	5 - 6	6 - 7	7 - 7.5
DOB	10000 - 25000	1000 - 4000	50 - 100
DOQ	15000 - 40000	10000 - 20000	1000 - 5000
N Amoniacal	500 - 1500	300 - 500	50 - 200
P total	100 - 300	10 - 100	
Cloreto	1000 - 3000	500 - 2000	100 - 500
Sulfato	500 - 2000	200 - 1000	50 - 200
Cálcio	2000 - 4000	500 - 2000	300 - 500
Sódio + Potássio	2000 - 4000	500 - 1500	100 - 500
Magnésio + Ferro	500 - 1500	500 - 1000	100 - 500
Zinco + Alumínio	100 - 200	50 - 100	10 - 50
Alcalinidade	10000 - 15000	1000 - 6000	500 - 2000

Métodos Utilizados

A aquisição de dados geofísicos utilizou a técnica de Caminhamento Elétrico por meio do arranjo dipolo-dipolo. Este arranjo consiste na instalação de pares de eletrodos metálicos ao longo da linha de investigação, para transmissão de corrente elétrica e geração de campo elétrico em profundidade (eletrodos de corrente), e posterior leitura por meio de pares de eletrodos de

A disposição de forma adequada dos pares de eletrodos de corrente e potencial permite leituras de resistividade elétrica para diversos níveis de profundidade na linha investigada. Este trabalho utilizou 5m de espaçamento entre eletrodos e leituras de resistividade em 8 níveis de profundidade e 80m de extensão.

O equipamento utilizado é o resistímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM (Suécia).

Este equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de baixa freqüência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido. A razão V/I, ou seja, potencial (V) pela corrente (I) transmitida permite leituras diretas de resistência elétrica em ohms (Ω). A resistência associada ao fator K, que representa o espaçamento dos eletrodos em superfície, resulta no parâmetro resistividade elétrica (equação 1):

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad [\Omega m] \quad (1)$$

Foram realizadas 8 linhas de caminhamento elétrico (Figura 1), divididas entre linha de referência e linhas em valas datadas. A linha referência está disposta em uma área a montante do fluxo d'água subterrânea e separada do aterro pelo talude de implantação da rodovia de cruza a área, com o objetivo de determinar os valores naturais de resistividade. As demais linhas foram realizadas em valas de resíduos com data de fechamento entre 12/2001 e 12/2007.

Medidas de potencial redox foram efetuadas em amostras de solo coletadas em todos os pontos de leitura de resistividade elétrica, ou seja, ao longo das linhas de aquisição de dados geofísicos (Figura 1). O procedimento consistiu na perfuração do solo de cobertura das valas, com espessura média de 1m, via trado manual e coleta de solo do contato com os resíduos sólidos enterrados. Em seguida as amostras foram pesadas e separadas em porções com 20g de solo.

O procedimento de leitura do potencial redox consiste na mistura das amostras separadas em 20mL de água destilada, agitação contínua durante 1 minuto seguido pela inserção de eletrodo de platina. A leitura foi realizada após 10 minutos, período necessário para estabilização dos valores.

Processos que conduzam a redução nos níveis de oxigênio e decréscimo do potencial redox são produzidos por microorganismos pelo consumo de oxigênio. Condições necessárias para redução do potencial redox incluem a presença de material orgânico passível de decomposição – fonte de energia, população de microorganismos capazes de utilizar esta fonte de energia em processo metabólico e restrição a novos suprimentos de oxigênio (Figura 2)

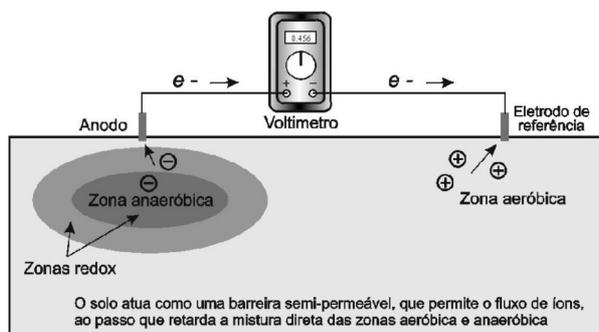


Figura 2 – Relação entre potencial elétrico e redox

Foi utilizado o equipamento PH-1500 em conjunto com eletrodo de ORP-897, ambos fabricados pela Instrutemp (Brasil). O eletrodo ORP-897 consiste num eletrodo de platina conjugado a um eletrólito de referência constituído de cloreto de prata (Pt/AgCl), que permite leituras diretas de potencial redox em meio aquoso.

Os dados foram processados no software RES2DINV (Loke & Barker, 1996), apresentados sob a forma de seções distância x profundidade. Os intervalos de resistividade apresentados nas seções foram definidos a partir da identificação dos horizontes de solo presentes em exposição ao longo da linha referência. Os dados de potencial redox foram tabelados e são apresentados sob a forma de gráfico (Gráfico 1). Os pontos correspondem aos valores medidos enquanto que as curvas representam a idade de fechamento da vala de resíduo amostrada.

Apresentação dos Resultados

Uma análise comparativa das seções permite afirmar a ocorrência de medidas de resistividade inferiores a 30

$\Omega.m$ em todas as seções realizadas sobre as valas de resíduos, além da semelhança entre a linha referência e a seção de 2007, embora nesta última predomina medidas de resistividade entre $30\Omega.m$ e $200\Omega.m$ no intervalo de profundidade correspondente a vala de resíduos (Figura 3).

É possível separar as seções em dois grupos com base no predomínio de intervalos de resistividade. Nas seções de 2001, 2002 e 2003 predominam medidas de resistividade superiores a $10.000\Omega.m$, enquanto que nas seções de 2004, 2005 e 2006 predominam medidas de resistividade entre $30\Omega.m$ e $200\Omega.m$ (Figura 3).

As seções de 2004, 2005 e 2006 apresentam um amplo predomínio de medidas de resistividade entre $30\Omega.m$ e $200\Omega.m$, cujos limites ultrapassam a base das valas de resíduos (5m de profundidade), essencialmente nas seções de 2005 e 2004. As seções de 2001, 2002 e 2003 apresentam intervalos com medidas superiores a $10.000\Omega.m$, principalmente na seção de 2003, onde ocorrem os medidas superiores a $50.000\Omega.m$ em grande parte da seção.

Os dados de potencial redox indicam leituras contrastantes para a mesma curva no caso das linhas referentes a 2003, 2004 e 2005, enquanto que nas demais, observou-se um comportamento relativamente contínuo, mas com contrastes locais (Gráfico 1).

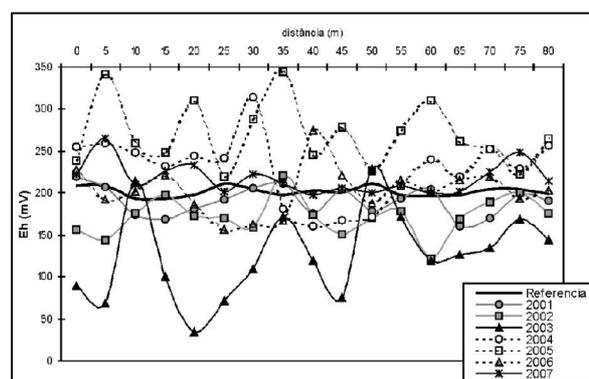


Gráfico 1 – Medidas de potencial redox

As linhas 2006 e 2007 com leve tendência de aumento, mas muito próximo aos valores da linha referência. As linhas 2004 e 2005 apresentam o conjunto de leituras mais elevadas, com máximos de 340mV, em contraste com a média de 200mV da linha referência.

A linha 2003 contrasta com as demais devido aos baixos valores de potencial redox, com mínimos de 34mV e apenas duas medidas pouco acima da média da linha referência. As linhas 2001 e 2002 apresentam leituras inferiores aos da linha referência.

O cruzamento entre dados de resistividade elétrica e potencial redox indica o predomínio de medidas elevadas de potencial redox nas linhas com baixos valores de resistividade, principalmente com relação às linhas 2004 e 2005. A linha 2003 conjuga leituras bastante baixas de potencial redox concomitante a medidas extremamente

elevadas de resistividade elétrica, enquanto que nas linhas 2001 e 2002, ocorrem medidas de relativamente elevadas de resistividade elétrica e leituras relativamente baixas de potencial redox (Figura 2).

Análise dos Resultados

A relação entre anomalias de baixa resistividade e elevadas quantidades de sólidos STD, característica de contaminantes provenientes da degradação de resíduos orgânicos (Tabela 1), é descrita em diversos trabalhos de aplicação de métodos elétricos e permite afirmar a presença de material lixiviado, principalmente entre 30 Ω .m e 200 Ω .m, ausente na linha referência.

A semelhança entre a linha referência e a linha 2007 pode indicar que os processos de degradação de geração de material lixiviado nos resíduos contidos nesta vala ainda são incipientes.

O padrão correlativo descrito para as linhas 2004, 2005 e 2006, com elevada oxidação conjugada a áreas pouco resistivas, revelam que a degradação de resíduos orgânicos está em atividade, ou seja, elevado consumo de oxigênio e liberação de íons por quebra de cadeias carbônicas ou dissolução de sais pelo estabelecimento de ambiente ácido.

Entretanto, o padrão correlativo descrito na linha 2003 provavelmente rompe o processo em curso nas valas de resíduos mais recentes. A conjugação de baixa oxidação e elevada resistividade pode indicar alterações geoquímicas prenunciadas na linha 2004, onde ocorre uma área relativamente grande com medidas de resistividade acima de 2000 Ω .m, em relação às linhas 2005 e 2006.

O processo de consumo de material orgânico resulta na geração de ácidos orgânicos e de STD (Tabela 1), que em parte são produtos diretos deste processo. Entretanto, a interação de ácidos orgânicos seja com materiais metálicos contidos nos resíduos sólidos domiciliares, seja sob a forma mineral como constituinte do ambiente geológico, pode resultar na solubilização de metais no produto lixiviado.

A continuidade do processo por longos períodos devido à abundância de materiais potencialmente degradáveis, sob condições geoquímicas relativamente estáveis, pode resultar na saturação de íons metálicos no material lixiviado. O resultado é a desestabilização geoquímica do sistema e precipitação destes elementos.

Aparentemente este processo está em curso na linha 2003, pois o estabelecimento de condições relativamente redutoras descritas nos baixos valores potencial redox indica uma desaceleração no processo de degradação e a presença de intervalos bastante resistivos podem indicar a precipitação de íons anteriormente em solução.

Sob novas condições geoquímicas, os elementos precipitados tendem ao rearranjo sob a forma de neoformações minerais, principalmente em terrenos argilosos e de baixa condutividade hidráulica, como no caso da área de estudos. A assimilação de fases minerais pelo ambiente geológico e conseqüente

insaturação do material lixiviado, permite a retomada do processo de degradação devido ao estabelecimento do sistema geoquímico anteriormente reinante.

O indicativo desta continuidade pode ser identificada no padrão correlativo das linhas 2001 e 2002, que apresentam medidas de potencial redox mais elevadas em relação a linha 2003 concomitante a ocorrência de amplas áreas com resistividade abaixo de 30 Ω .m, ou seja, retomada do processo de degradação. A presença de áreas com resistividade acima de 10000 Ω .m em conjunto com áreas de baixa resistividade pode indicar que o processo de mineralização e de degradação ocorrem simultaneamente, ao menos a partir de linha 2003.

Discussão e Conclusões

Na ausência de poços de monitoramento ou outras formas diretas de investigação na área do aterro, a caracterização geológica juntamente com a aplicação de técnicas geofísicas e analíticas de campo e o cruzamento com a idade de fechamento das valas de resíduos demonstram ser uma alternativa para caracterização e monitoramento de materiais lixiviados.

Elevadas concentrações de STD associado a plumas de contaminação provenientes de aterro e seu comportamento no ambiente geológico, caracterizado como condutor elétrico contrastante em relação ao ambiente natural, permitiram sua detecção pela aplicação da técnica de eletrorresistividade.

Os valores de resistividade abaixo de 30 Ω .m podem estar associados a elevadas concentrações de sais dissolvidos e, conseqüentemente, com elevado grau de contaminação, que gradualmente passa para níveis com menor grau de contaminação, provavelmente nos intervalos entre 30 Ω .m e 200 Ω .m.

Uma comparação entre seções de sete anos consecutivos permite concluir que o processo de degradação de resíduos orgânicos em aterros é algo complexo e descontínuo. Os dados sugerem uma evolução contínua entre 2007 e 2004, ou seja, durante os três primeiros anos de residência dos resíduos nas valas, essencialmente a partir do primeiro ano, ocorre a geração e liberação de grande quantidade de íons resultantes do processo intenso de degradação, determinado pelo cruzamento entre baixos valores de resistividade e elevados de potencial redox.

A seção de 2003 define um contraponto ao processo com curso nos primeiros anos. O surgimento de um amplo intervalo com resistividade extremamente elevada conjugado a medidas bastante baixas de potencial redox, indicativo de baixo consumo de oxigênio, revela que a decomposição dos materiais orgânicos encontra-se parcialmente estagnada.

A causa provável resulta na saturação de íons no produto lixiviado, que provoca a precipitação destes elementos e o conseqüente desequilíbrio geoquímico. A disposição da camada resistiva abaixo de 5m de profundidade, ou seja, abaixo da vala de resíduos, indica que este processo

ocorre no ambiente geológico e que quantidades consideráveis de minerais metálicos previamente dissolvidos por ação de ácidos orgânicos possam estar envolvidos.

Nas seções de 2002 e 2001 o processo de degradação provavelmente é acelerado, devido ao surgimento de áreas de baixa resistividade conjugado as medidas relativamente mais elevadas de potencial redox, ou seja, retomada no consumo de oxigênio.

A ocorrência de áreas de baixa resistividade em profundidade superiores a 5m nestas seções pode estar associada a uma nova assimilação de materiais precipitados por parte do líquido percolado ou neoformação mineral, prevista em ambientes geológicos argilosos e de baixa condutividade hidráulica, que também poderia resultar de padrões de baixa resistividade.

Alterações de rochas básicas tipicamente enriquecidas em Ferro resultam em solos de coloração vermelha-escuro, descrito na área. A interação deste tipo de solo com o material lixiviado, caracterizado por baixo pH, pode resultar na solubilização mineral, que podem retornar ao ambiente geológico a partir da supersaturação do líquido percolado.

Neste sentido, a aplicação de técnicas geofísicas sensíveis a concentrações de minerais metálicos, como o método de Polarização Induzida, pode contribuir ao entendimento nos processos geoquímicos envolvidos na degradação de resíduos orgânicos, a partir da identificação de zonas enriquecidas em minerais metálicos.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Agradecemos a Fabíola Coutinho Servidoni pelo auxílio na aquisição de dados.

Referências

Aristodemou, E., Thomas-Betts, A., 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at waste disposal sites and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, p. 275-302.

Bagchi, A. 1987. Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism. *Waste Management Research*, n° 5, p. 452-464.

Birks, J. & Eyles, C. A., 1997. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. In: Eyles, N. (ed.), *Environmental Geology of Urban Areas*. Geological Association of Canada. Canada. p. 347-363.

Carpenter, P. J., Kaufmann, R. S., Price, B., 1990. Use of Resistivity Soundings to Determine Landfill Structure, *Ground Water*, vol. 28, p. 569-575.

Christensen, T. H.; Kjeldsen, P.; Albrechtsen, H. J.; Heron, G; Nielsen, P. H.; Bjerg, P. L.; Holm, P. E., 1994. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical Review in Environmental Science and Technology*, n° 24, p. 119-202.

Farquhar, G. J., 1989. Leachate: production and characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*, n° 16, p. 317-325.

English, B. K.; Fisher, J. J.; Sumner, E., 1996. Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rodhe Island, USA. *Journal of Applied Geophysics*, n° 35, p. 249-259.

Loke, M. H. & Barker, R. D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, n 44, p. 131-152.

Meju, M. A., 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, p.115-150.

Naudet, V., Revil, A., Bottero, J. Y., Bégassat, P., 2003. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, vol. 30, n° 21, p. 1-4.

Naudet, V., Revil, A., Rizzo, E., Bottero, J. Y.; BÉGASSAT, P., 2004. Groundwater redox conditions in a contaminant plume from geoelectrical investigations. *Hydrogeology and Earth System Sciences*, vol. 8, n° 1, p.8-22.

Orellana, E. 1972. *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Biblioteca Técnica Philips. Madrid: Paraninfo, 523 p.

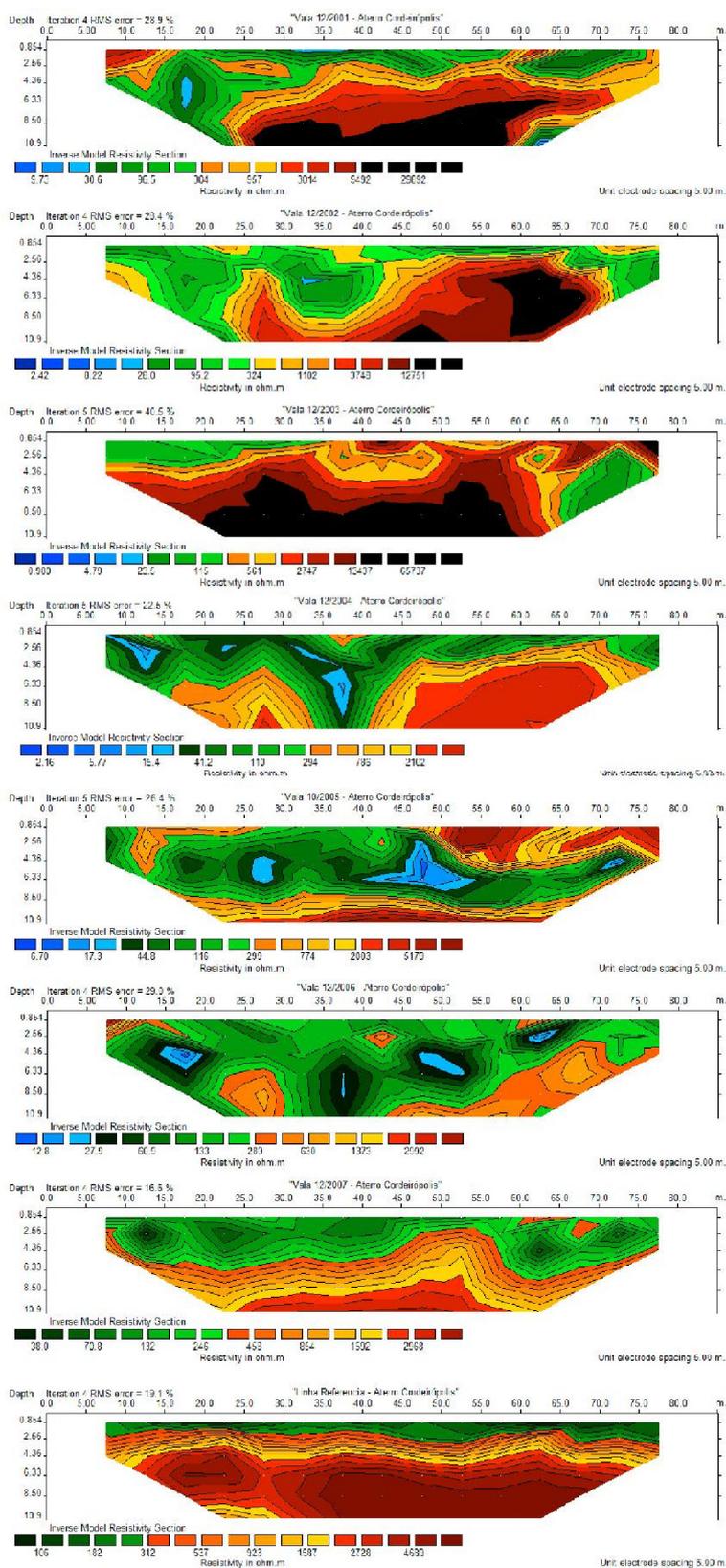


Figura 3 – Linhas de caminhamento elétrico