

## **ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO POR MEIO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

### **César Augusto Moreira<sup>(1)</sup>**

Geólogo, Mestre e Doutor em Geociências. Docente junto a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus de Caçapava do Sul (RS) entre 2009-2011. Atualmente, professor Assistente Doutor junto ao Departamento de Geologia Aplicada - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Marcus Cesar Avezum Alves de Castro**

Engenheiro Mecânico, Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Atuou como docente nas Faculdades Integradas COC (2002-2003) e Anhanguera Educacional (2003-2006). Atualmente, professor Assistente Doutor junto ao Departamento de Geologia Aplicada - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Leonardo Paioli Carrazza**

Graduação em Geologia, Instituto de Geociência e Ciências Exatas - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Fernanda Cavallari**

Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto de Geociência e Ciências Exatas - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Sarita Antonio Magnan**

Engenheira Ambiental pelo Instituto de Geociência e Ciências Exatas - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Natasha Pereira Marques**

Engenheira Ambiental pelo Instituto de Geociência e Ciências Exatas - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Guilherme Denardi Zanatta**

Engenheiro Ambiental pelo Instituto de Geociência e Ciências Exatas - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

### **Natalia Zanetti**

Engenheira Ambiental, Mestre em Geociências. Doutoranda junto ao programa de pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente - Instituto de Geociência e Ciências Exatas - IGCE/UNESP - Rio Claro - SP

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. 24 A nº 1515 Bela Vista - Rio Claro - SP - CEP: 13506-900 - Brasil - Tel: +55 (19) 35269313 - e-mail: [moreirac@rc.unesp.br](mailto:moreirac@rc.unesp.br)

### **RESUMO**

A adaptação de métodos de investigação em Geociências é algo necessário diante da diversidade de objetos de estudo nos últimos anos. A viabilidade deste procedimento reside muitas vezes na semelhança entre o parâmetro ou elemento analisado. A perfilagem geofísica é utilizada na prospecção de campos petrolíferos, onde perfurações são investigadas por meio da leitura de diversos parâmetros físicos intrínsecos ao ambiente geológico, sensíveis a concentrações de óleo e gás. Este trabalho relaciona medidas da vazão de biogás em drenos localizados em aterro sanitário com medidas de resistividade elétrica e potencial elétrico natural, obtido pela técnica de perfilagem geofísica. Os parâmetros físicos foram sensíveis à variação na vazão de biogás, fato que indica a viabilidade de estudos geofísicos no planejamento de sistemas de captação de biogás para geração energética.

**PALAVRAS-CHAVE:** geofísica, eletrorresistividade, potencial espontâneo, perfilagem, metano

## TEXTO

A adaptação de métodos e técnicas de investigação na área de Geociências é algo crescente diante da diversidade de objetos de estudo e subáreas que surgiram nos últimos anos, pois a viabilidade deste procedimento reside muitas vezes na semelhança entre o parâmetro ou elemento analisado.

A geofísica é uma ciência que estuda materiais geológicos, estruturas e camadas, sejam constituintes da Terra ou de outros planetas, por meio da análise de parâmetros físicos intrínsecos como densidade, radioatividade, magnetização, além de outros, por meio de instrumentos que permitem medidas indiretas e que possibilitam investigações que variam de centímetros a centenas de metros de profundidade.

Perfilagem é uma área da geofísica aplicada na aquisição de dados e análise de propriedades físicas em poços ou furos exploratórios por meio de instrumental semelhante ao utilizado em aquisições terrestres, embora com sensores de leitura adaptados para perfurações (Elis & Singer, 2008).

Possui aplicações em estudos hidrogeológicos e ambientais, mas com uso em larga escala na pesquisa de hidrocarbonetos. Medidas de parâmetros físicos como resistividade elétrica e potencial espontâneo fazem parte da rotina de investigações em furos exploratórios ou para detalhamento em campos petrolíferos, devido à possibilidade de estimativa de parâmetros litológicos como permeabilidade, porosidade, granulometria, tipos de rochas, dentre outros (Asquith & Gibson, 1982).

O Potencial Espontâneo é um método geofísico baseado no fenômeno de geração de potencial elétrico natural a partir de diversos processos físicos e químicos. Seu uso em pesquisa mineral é amplamente difundido e remontam trabalhos descritos no final do século XIX, essencialmente baseado na diferença de potencial elétrico ou potencial de oxidação entre corpos de minério metálico e rochas em redor (Telford *et al.*, 2004).

Variações no potencial de oxidação são comuns durante processos de degradação de matéria orgânica contida em resíduos dispostos em aterros sanitários (Baker & Cull, 2004; Revil *et al.*, 2005; Mota *et al.*, 2004).

Em estudo realizado por Mota *et al.* (2004), foram aplicados os métodos de Potencial Espontâneo e Eletroresistividade na avaliação hidrogeológica de maciço granítico subjacente a um aterro sanitário em Povoia de Lanhoso (Portugal). Os resultados permitiram definir zonas de baixa resistividade correlacionadas com valores negativos de potencial espontâneo, que indicam áreas impactadas pelo fluxo de contaminantes oriundos do aterro.

O caso supracitado corrobora com a hipótese de geração de potencial espontâneo pelo fluxo de soluções eletrolíticas em aquíferos porosos e fraturados, também caracterizados por fluídos com baixa resistividade elétrica.

Nos trabalhos de Naudet *et al.* (2003) e Naudet *et al.* (2004), são utilizadas medidas de Potencial Espontâneo concomitante a medidas de potencial de oxidação/redução (Eh), no estudo da evolução de uma pluma de contaminação proveniente de um aterro sanitário em Entressen (França). Os resultados indicam que o potencial elétrico decresce progressivamente na zona aeróbica, aumenta drasticamente na frente de oxidação/redução e finalmente alcança o padrão da área de estudos ao atingir a zona de oxidação. Em perfil, há uma grande correlação entre potencial elétrico natural e medidas de potencial de oxidação/redução.

Os trabalhos supracitados sugerem a possibilidade de geração de potencial elétrico natural por processos de degradação de compostos orgânicos acumulados em aterros de resíduos sólidos, além do potencial elétrico produzido pelo fluxo de chorume.

O método da Eletrorresistividade é uma ferramenta consagrada e bastante aplicada em estudos ambientais, que consiste na geração artificial de correntes elétricas que são introduzidas no solo, para medidas da diferenças de potencial resultante. Desvios no padrão de diferenças de potencial fornecem informações sobre forma e propriedades elétricas de heterogeneidades em subsuperfície (Keary, 2002; Telford *et al.*, 2004).

Este método é amplamente utilizado em estudos de diagnóstico ambiental, em casos como investigações de contaminantes em solo e águas subterrâneas provenientes de atividades industriais (Moreira *et al.*, 2007; Moreira & Braga, 2009, Menezes *et al.* 2011), vulnerabilidade ao aporte de poluentes em aquíferos (Braga, 2008; Oroko *et al.*, 2010), caracterização de subsuperfície em cemitérios, lixões, aterros controlados e sanitários (Silva *et al.*, 2009; Moreira *et al.*, 2011; Bortolin & Malagutti Filho, 2010).

A assinatura característica de contaminantes líquidos enriquecidos em sais, como o necrochorume oriundo da decomposição de cadáveres ou o chorume proveniente da decomposição de resíduos orgânicos, é a baixa resistividade elétrica, em contraste com rochas e minerais que constituem o ambiente geológico.

No trabalho de Moreira *et al.* (2009) é aplicado o método da Eletrorresistividade no aterro do município de Cordeirópolis (SP), combinado com medidas de pH e Eh. As medidas de baixa resistividade foram associadas à maior concentração de chorume no aterro. Ainda foi realizada uma correlação com parâmetros geoquímicos, tais como pH e Eh e mencionam uma provável associação entre esses parâmetros e os valores de resistividade elétrica obtidos.

Embora existam diversos estudos que descrevem o emprego de métodos geofísicos no diagnóstico ambiental de aterros, grande parte destes trabalhos versa essencialmente a caracterização de área com percolação de chorume. Contudo, são escassos os trabalhos que visam determinar relações entre resistividade elétrica, potencial elétrico natural e processos biológicos e físico-químicos e suas relações com a produção de chorume e biogás em aterros (Georgaki *et al.*, 2008; Moreira *et al.*, 2011).

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema estático de perfilagem geofísica no aterro sanitário municipal de Rio Claro (SP), na tentativa de avaliar a relação entre variações nos parâmetros físicos resistividade elétrica, potencial elétrico natural e a vazão de biogás em drenos próximos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O método de Eletrorresistividade é baseado na propagação em subsuperfície de campo elétrico gerado artificialmente, pela injeção de corrente elétrica (I) a partir de dispositivos eletródico (Telford *et al.*, 2004). O potencial elétrico ( $\Delta V$ ) produzido pela passagem deste campo em subsuperfície é captado por meio de um circuito receptor e medido por auxílio de um voltímetro. A aplicação da Lei de Ohm considerando o espaçamento entre os eletrodos, representado por um fator denominado K, permite medidas do parâmetro resistividade aparente ( $\rho_a$ ) para vários níveis de profundidade (equação 1):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \Omega.m \text{ (equação 1)}$$

O parâmetro resistividade depende da natureza e do estado físico do material analisado. A resistividade e a condutividade elétrica estão relacionadas aos mecanismos de propagação de corrente elétrica dos materiais, condicionada em materiais geológicos a processos de condutividade eletrônica ou eletrolítica (Keller & Frischknecht, 1966). O primeiro ocorre associado à presença de minerais metálicos ou condutores, enquanto o segundo ocorre devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida em poros ou fissuras.

Como freqüentemente a água subterrânea contém íons dissolvidos, o processo de condutividade eletrolítica é predominante no ambiente geológico. De forma análoga, o

chorume proveniente da decomposição de resíduos orgânicos é caracterizado pela elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos. Esta solução eletrolítica possui comportamento semelhante ao da água subterrânea quanto ao trânsito de corrente elétrica, ou seja, consiste num material de baixa resistividade elétrica.

O método de Potencial Espontâneo é caracterizado pela realização de leituras de campo elétrico natural, sem necessidade de quaisquer circuitos de injeção de corrente elétrica ou geração de campo eletromagnético (Orellana, 1972).

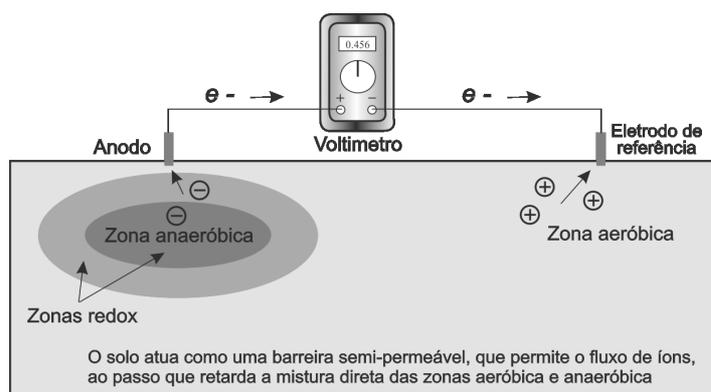
Sua vantagem reside na simplicidade no instrumental envolvido e versatilidade de aquisição de dados em pequenas áreas, além da gama de variação do parâmetro físico quando medido no ambiente geológico. As principais desvantagens associadas ao método são a necessidade de cabos de conexão, eletrodos não polarizáveis, além da elevada susceptibilidade a ruídos produzidos por sistemas elétricos como transformadores, aterramentos e motores elétricos.

Quanto aos fenômenos de geração de potencial espontâneo, são classificados em potencial mineral, eletrolítico e eletroquímico (Telford *et al.*, 2004).

O potencial mineral surge devido a reações geoquímicas de oxidação/redução num corpo de minério, equivalente a célula galvânica definida pela Eletroquímica. O potencial eletrolítico é atribuído ao fluxo produzido pela passagem de fluido com sais dissolvidos, num meio poroso ou fraturado, cuja diferença de potencial é mensurável pelo instrumental geofísico. O potencial eletroquímico pode ser originado de processos como o ataque de microrganismos em compostos orgânicos (biodegradação) num contexto de solo ou rocha com hidrocarbonetos ou matéria orgânica sólida.

Desta forma, este método permite medidas de potencial elétrico natural total, onde os valores medidos podem ser influenciados por mais de um fenômeno de geração de potencial.

A matéria orgânica presente em aterros sanitários é freqüentemente recoberta por camadas sucessivas de resíduos, posteriormente isolado do contato atmosférico por uma camada de solo após o preenchimento total das células de disposição. Este contexto permite a instalação de condições físico-químicas redutoras nos resíduos, algo que colabora para a proliferação de colônias de microrganismos anaeróbicos. A destes microrganismos em compostos orgânicos resulta na geração de potencial elétrico, cujo contraste com um ponto de referência possibilita medições por meio de instrumentos geofísicos (Figura 1).



**Figura 1: Diferença de potencial produzida pelo metabolismo de bactérias em contaminantes orgânicos (Adaptado de Nyquist & Corry, 2002).**

A área de estudo está situada no município de Rio Claro, Estado de São Paulo, cuja principal via de acesso é a Rodovia Cornelio Pires (SP-127), que realiza a ligação entre os municípios de Rio Claro e Piracicaba. O aterro recebe em média 5 mil toneladas de resíduos sólidos domésticos por mês, possui uma área de 142 mil m<sup>2</sup> e está em atividade desde 2001.

Segundo Zaine (1994), o contexto geológico da área de estudos é representado por rochas sedimentares reunidas nas Formações Corumbataí e Rio Claro. A Formação Corumbataí é caracterizada por argilitos, siltitos e folhelhos arroxeados e marrom-avermelhados, às vezes esverdeados, com intercalações de arenitos, leitos carbonáticos e coquina. A Formação Rio Claro é representada por arenitos finos a médios de coloração variada, tais como esbranquiçada, amarelada, avermelhada e arroxeadada.

O procedimento de aquisição de dados foi iniciado a partir da seleção de dois drenos de gás que apresentam características distintas por conta da idade de deposição de resíduos. O dreno 5 cruza resíduos mais antigo, cuja porção basal remonta ao início da operação do aterro, enquanto que o dreno 28 está localizado numa região com resíduos lançados a poucos anos e que atingiu a capacidade de recebimento de materiais.

Posteriormente foram realizadas medidas da composição e vazão dos gases emanados destes dois dutos, por meio do equipamento Lantec GEM-2000, que permite medidas de concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub>, em porcentagem, além de medidas da temperatura do biogás. A vazão foi encontrada a partir da velocidade do biogás, encontrada a partir de um termo-anemômetro inserido em cada dreno.

Nas proximidades dos dutos selecionados, foram realizadas perfurações verticais para instalação dos cabos elétricos, elaborados com sensores desenvolvidos a base de grafita (Figura 2).

Foi utilizada a técnica de perfilagem geofísica para leitura dos parâmetros resistividade elétrica e potencial espontâneo, com movimentação dos pontos de leitura com a profundidade, a partir do arranjo Wenner para o método da Eletroresistividade. Para o método do Potencial Espontâneo, foi adotado o arranjo de base fixa, com eletrodo de referencia representado pelo sensor mais próximo da superfície.

Os cabos enterrados possuem sensores não polarizáveis, constituídos de grafite, com 40cm de espaçamento entre sensores, por meio dos quais foram realizadas medidas de resistividade elétrica e potencial elétrico natural. Foi utilizado o resistivímetro Terrameter SAS 4000, que possibilita leituras de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial elétrico natural, por meio de ciclos periódicos de leitura em intervalos de tempo programados (ABEM, 2006).

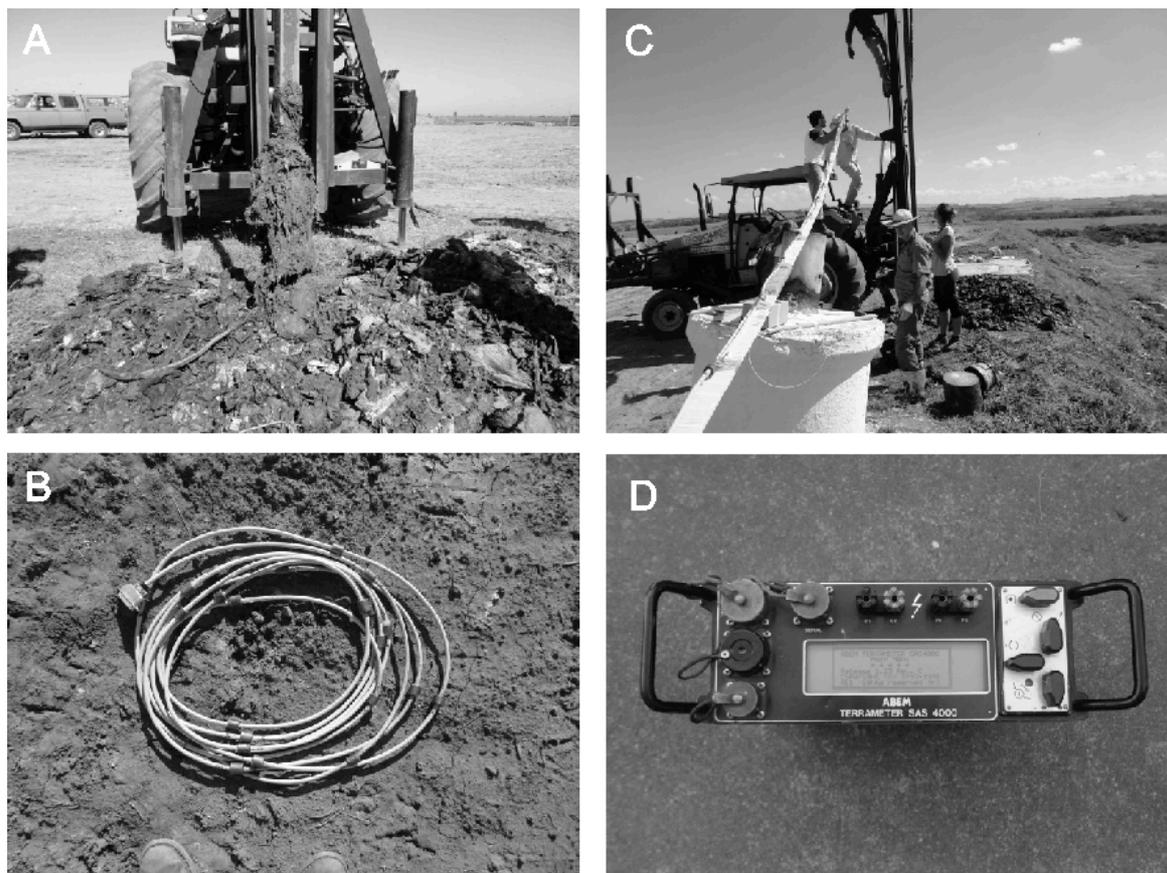


Figura 2: A) Perfuração de poço. B) Cabo para medidas de potencial elétrico natural. C) Procedimento de instalação. D) Equipamento de medidas (resistímetro).

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

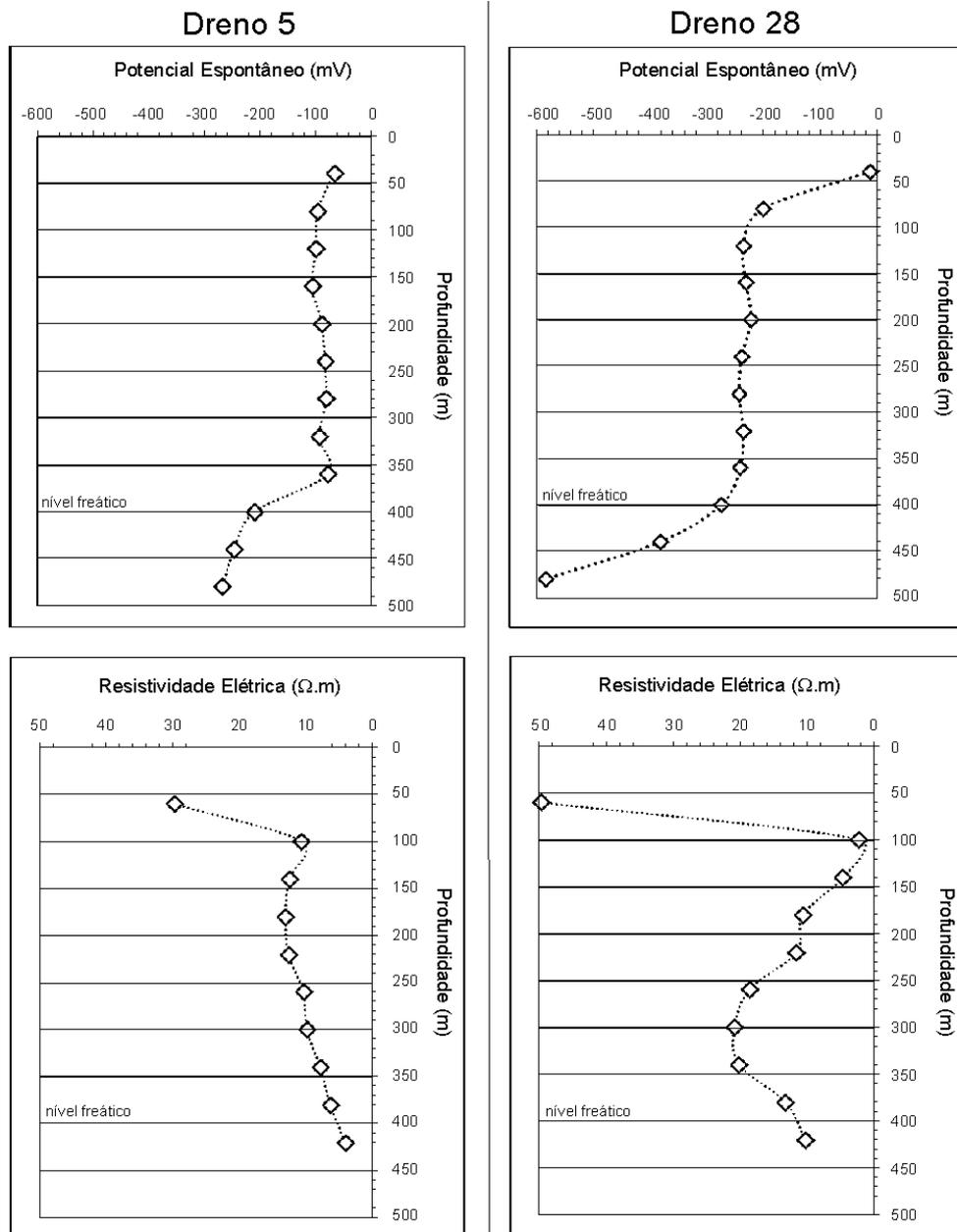
Os dados de potencial elétrico natural indicam valores relativamente constantes com a profundidade de até 4,0m, onde ocorre o nível freático local, comprovado durante a abertura dos poços. A espessura total da camada de resíduos nas regiões do dreno 5 e 28 variam de 17m a 20m, assentados em manta que impermeabiliza a célula de disposição de resíduos. Desta forma, o nível freático considerado neste trabalho consiste na zona saturada ou coluna de chorume contida nos resíduos.

As medidas ao lado do dreno 5 apresentam média próximo de -100mV para o intervalo acima do nível freático, enquanto que as medidas para o dreno 28 apresentam média em torno de -250mV. As medidas em níveis mais profundos são acentuadamente eletronegativas, variáveis entre -250mV e -300mV para o dreno 5 e entre -300mV e -600mV para o dreno 28 (Figura 3).

Os dados de resistividade elétrica apresentam variação relativamente grande entre o primeiro e os demais valores. Esta medida inicial foi realizada no intervalo do solo de cobertura, representado por siltitos e argilitos provenientes da abertura de nova célula de resíduos. Este material é diariamente compactado pelo trânsito de máquinas e apresentam baixo teor de umidade, fatores que contribuem para a resistividade elétrica relativamente elevada.

Abaixo de 1m de profundidade há uma queda drástica nos valores para as regiões de ambos os drenos. Para o dreno 5, os valores iniciais são de 12 $\Omega$ .m e diminuem gradativamente com a profundidade, até valores de 2 $\Omega$ .m abaixo do nível freático. O dreno

28 apresenta  $2\Omega.m$  abaixo da camada de solo e aumento constante de valores até 300cm de profundidade, como máximo de  $24\Omega.m$  entre 300cm e 350cm, sucedido por queda nos valores até o mínimo de  $11\Omega.m$  (Figura 3).



**Figuras 3: Medidas da resistividade elétrica e potencial elétrico natural em função da profundidade para os drenos 5 e 28.**

Quanto as medidas de composição dos gases emanados nos drenos, existe um pequena acréscimo no teor de  $CH_4$  medido no biogás coletado no dreno 5 em relação ao dreno 28, em contraste ao teor de  $CO_2$  relativamente superior para o dreno 28 em relação ao dreno 5 (Tabela 1). Contudo, há um grande contraste na vazão de biogás, acentuadamente superior para o dreno 28 em comparação ao dreno 5 (Tabela 2).

**Tabela 1: Composição do biogás produzido nos drenos 5 e 28.**

| Dia      | 17 de maio de 2012 |                 |                | 31 de maio de 2012 |                 |                |
|----------|--------------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------|----------------|
|          | Composição (%)     |                 |                | Composição (%)     |                 |                |
|          | CH <sub>4</sub>    | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>    | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> |
| Dreno 5  | 56,7               | 43              | 0,2            | 57,4               | 41,6            | 0,1            |
| Dreno 28 | 54,8               | 45,1            | 0,2            | 49                 | 50,5            | 0,2            |

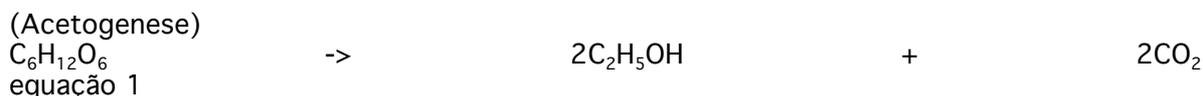
**Tabela 2: Vazão de biogás produzido nos drenos 5 e 28.**

| Dia      | 17 de maio de 2012        | 31 de maio de 2012        |
|----------|---------------------------|---------------------------|
|          | Vazão (m <sup>3</sup> /s) | Vazão (m <sup>3</sup> /s) |
| Dreno 5  | 0,011673                  | 0,011581                  |
| Dreno 28 | 0,032572                  | 0,026376                  |

A análise integrada dos resultados possibilita algumas considerações importantes acerca da ação de processos de degradação anaeróbica de matéria orgânica e seus reflexos na alteração de propriedades físicas no intervalo não saturado por chorume.

São iniciadas reações biogeoquímicas imediatamente após cobertura de resíduos em aterros. Os compostos orgânicos são oxidados em processos aeróbicos nas posições rasas, onde ocorre aeração por aporte de oxigênio atmosférico ou infiltração de águas meteóricas, em reações semelhantes à combustão, com geração de CO<sub>2</sub> e vapor de água.

Entretanto, o efeito de processos químicos e biológicos é acentuado por digestão anaeróbica em três estágios principais (Themelis & Ulloa, 2007). A princípio ocorre hidrólise de matéria orgânica complexa por ação de bactérias fermentativas em moléculas solúveis. Na seqüência estas moléculas são convertidas em ácidos orgânicos simples como ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico e etanol, além de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. No terceiro estágio ocorre a geração de CH<sub>4</sub> por bactérias metanogênicas, pela quebra de ácidos em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> ou pela redução de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> (Equações 1, 2 e 3).



A quantidade máxima de biogás que pode ser produzida por decomposição anaeróbica pode ser determinada de forma aproximada (Equação 4).



Esta reação exotérmica libera uma pequena quantidade de calor e produz um gás com teores médios de 54% de CH<sub>4</sub> e 46% de CO<sub>2</sub>. O biogás gerado em aterros contém também vapor de água próximo do ponto de saturação, além de pequenas quantidades de NH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e outros constituintes menores.

Existem diversos fatores a serem atendidos para que haja continuidade do processo anaeróbico. Contudo, é fundamental que haja um suprimento constante do principal reagente envolvido no processo, ou seja, água (Themelis & Ulloa, 2007).

O balanço de massa entre o composto orgânico e água na equação 4 indica que 1Kg de água possibilita o consumo de 5,4Kg de matéria orgânica.

Os drenos avaliados no aterro de Rio Claro estão distantes entre si cerca de 200m, constituídos por resíduos provenientes da mesma cidade, submetidos aos mesmos processos de lançamento, compactação e material de cobertura, além de submetidos à mesma quantidade de chuvas.

Portanto, as diferenças na vazão de gases entre os drenos são atribuíveis a quantidade de matéria orgânica disponível para reações anaeróbicas. O dreno 28 é mais recente e, portanto, sua elevada produção de biogás deriva da quantidade de matéria orgânica em processo de decomposição. Os teores de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  produzidos são semelhantes e, portanto, independem da idade do resíduo ou da quantidade de matéria orgânica passível de decomposição.

A variação na intensidade do processo de decomposição dos resíduos orgânicos é refletida na vazão de biogás e aparentemente provoca alterações significativas em propriedades físicas como o potencial elétrico natural.

O perfil obtido para o dreno 28 apresenta média de valores 2,5 vezes superiores (-250mV) ao obtido para o dreno 5 (-100mV). O consumo de elétrons no processo de degradação anaeróbica torna a região do dreno 28 mais eletronegativa, em contraste com a região do dreno 5.

Neste sentido, há uma relação entre intensidade do processo de decomposição anaeróbica, refletido na vazão de biogás em aterros, com alterações significativas no potencial elétrico natural.

Os padrões contrastantes de resistividade elétrica entre os drenos podem ser associados ao acúmulo de biogás nos horizontes de produção. Gases como  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  são altamente resistivos ao trânsito de corrente elétrica, assinatura característica de perfilagens geofísicas de áreas com acumulações de gás natural em campos petrolíferos (Asquith & Gibson, 1982).

O intervalo resistivo ( $24\Omega.m$ ) entre 250cm e 300cm de profundidade no perfil da região do dreno 28 pode refletir acumulações de biogás na camada de resíduos não saturados, algo refletivo na elevada vazão deste dreno.

As porções próximas ao nível freático no intervalo de resíduos não saturados apresentam as condições mais redutoras e efetivas para ação dos processos de degradação anaeróbica. A ocorrência de valores médios de  $10\Omega.m$  entre 250cm e 300cm de profundidade na região do dreno 5 é aproximadamente 2,5 vezes inferior ao padrão obtido para a região do dreno 28 ( $24\Omega.m$ ) e coincidente em termos proporcionais com a vazão de biogás

## **CONCLUSÕES**

Os resultados geofísicos indicam a sensibilidade dos parâmetros físicos resistividade elétrica e potencial elétrico natural, aos processos e produtos de degradação que envolve o consumo de matéria orgânica em aterro.

O contraste nas vazões de biogás pode ser atribuído à idade dos resíduos. O dreno mais novo possui vazão 2,5 vezes superior ao dreno mais antigo. As reações químicas que descrevem a geração de biogás em aterro envolvem matéria orgânica e água.

A proximidade dos drenos analisados e o regime análogo de ação da chuva permitem atribuir às diferenças na vazão de biogás especificamente a disponibilidade de matéria orgânica passível de consumo. É provável que grande parte da matéria orgânica disponível na região do dreno 5 tenha sido consumida, enquanto na região do dreno 28 haja grande disponibilidade de material.

Os dados de potencial elétrico natural corroboram esta hipótese, pois as medidas obtidas para o dreno mais novo revelam valores fortemente eletronegativos, indicativos da ação intensiva de processos que envolvem o consumo de elétrons, como oxidação da matéria orgânica. Em contrapartida, os valores obtidos para o dreno mais antigo são pouco eletronegativos, indicativos da baixa intensidade de processos de oxidação na área.

Neste aspecto, o método de Potencial Espontâneo demonstra aplicabilidade no mapeamento de áreas com potencial para geração de biogás em aterros, cuja intensidade de degradação ou vazão de biogás é inversamente proporcional ao potencial elétrico natural, ou seja, as maiores vazões de biogás estão associadas a áreas mais eletronegativas.

Os dados de resistividade elétrica podem ser relacionados com zonas de acumulação de gás na camada não saturada de resíduos. O dreno com maior produção de biogás apresentem uma zona resistiva em profundidade, com valores cerca de 2,5 vezes superiores aos obtidos para a mesma profundidade no dreno de menor vazão.

Estes resultados são semelhantes aos obtidos em perfisagens geofísicas de campos petrolíferos, onde rochas com acumulações de gás são caracterizadas pela alta resistividade. Portanto, a camada resistiva identificada no perfil pode estar relacionada a um horizonte de acumulação de biogás.

Os valores médios de resistividade elétrica entre os horizontes com provável acumulação de biogás e as vazões entre os drenos são correlacionais. A produção do dreno 28 é cerca de 2,5 vezes superior ao dreno 5, ao passo que a camada insaturada próxima ao nível freático é cerca de 2,5 vezes mais resistiva para o dreno 28 em relação ao dreno 5.

Neste sentido, o método da Eletrorresistividade demonstra aplicabilidade na definição de zonas com acumulação de gases em aterro. Contudo, a presença de materiais bastante resistivos como plásticos e borrachas, podem dificultar a interpretação de dados, principalmente na ausência de informações diretas como vazão de biogás.

A região do dreno com elevada produção de gás foi caracterizada pela existência de uma camada resistividade e ao mesmo tempo bastante eletronegativa.

Portanto, o uso combinado dos métodos geofísicos supracitados pode suplantar eventuais dificuldades na avaliação dos dados, assim como auxiliar estudos que envolvam o planejamento de empreendimentos de geração energética pela queima de biogás, especificamente no mapeamento e detecção de áreas mais favoráveis para instalação de drenos de captação.

## REFERÊNCIAS

ABEM Terrameter SAS 4000 / SAS 1000 - Instruction Manual, 136f., 2006.

ASQUITH, G.B. & GIBSON, C.R. Basic Well Log Analysis for Geologists. American Association of Petroleum Geologists, Oklahoma, 234p., 1982.

BAKER, S. S. & CULL, J. P. Streaming potential and groundwater contamination. Exploration Geophysics, nº 35, p. 41-44, 2004.

BORTOLIN, J.R.M. & MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. Revista de Engenharia Sanitária em Ambiental, v. 15, nº4, p.367-374, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n4/a09v15n4.pdf> . Acesso em 10 out. de 2012

BRAGA, A. C. O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*. v. 26, n° 1, p. 61-68, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v26n1/a05v26n1.pdf> . Acesso em 10 out. de 2011.

ELLIS, D.V. & SINGER J.M. *Well logging for earth Scientists*. Springer, Netherlands, 2°ed., 699p., 2008.

GEORGAKI, I.; SOUPIOIS, P.; SAKKAS, N.; VERVERIDIS, F.; TRANTAS, E.; VALLIANATOS, F.; MANIOS, T. Evaluating the use of electrical resistivity imaging technique for improving CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission rate estimations in landfills. *Science of the Total Environment*, vol. 389, p.522-531, 2008.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science, London, 262 p., 2002.

KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, 562p., 1966.

MENEZES, A.M.C.; MOREIRA, C.A.; ILHA, L.M.; SCHWEIG, C. Estudo geofísico de vazamento de combustível em posto de abastecimento. *Geociências*, vol. 30, n.4, p.601-609, 2011. Disponível em <http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/5587/4304>. Acesso em 10 ago. de 2012.

MOREIRA, C.A.; AQUINO,V.F.; DOURADO, J.C. Aplicação do método eletromagnético indutivo (EM) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 25, n.4, p.413-420, 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v25n4/a05v25n4.pdf> . Acesso em 10 ago. de 2012.

MOREIRA, C. A. & BRAGA, A. C. O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Revista de Engenharia Sanitária em Ambiental*, v. 14, n°2, p.257-264, 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a13v14n2.pdf> . Acesso em 10 out. de 2012.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; FRIES, M. Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 27, n2, p.283-293, 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v27n1/a05v27n1.pdf> . Acesso em 10 ago. de 2012.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; HANSEN, M.A.F. Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 41, n.3, p.549-557, 2011. Disponível em <http://www.ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/article/view/21281/17148> . Acesso em 10 ago. de 2012

MOTA, R.; MONTEIRO SANTOS, F. A.; MATEUS, A.; MARQUES, F. O.; GONÇALVES, M. A.; FIGUEIRAS, J.; AMARAL, H. Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 57, p.11-22, 2004.

NAUDET, V.; REVIL, A.; BOTTERO, J. Y.; BÉGASSAT, P. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, vol. 30, n° 21, p. 1-4, 2003.

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

NYQUIST, J.E. & CORRY, C.E. Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics. *The Leading Edge*, vol. 1, p. 446-451, 2002.

OKORO, E. I; EGBOKA, B. C. E.; ONWUEMESI, A . G. Evaluation of the aquifer characteristic of Nanka sands using hydrogeological method in combination with Vertical Electrical Sounding (VES). *Journal Applied Environmental Management*, v. 14, n°2, p. 5-9, 2010. Disponível em <http://www.ajol.info/index.php/jasem/article/viewFile/57822/46190>. Acesso em 10 out. de 2011.

ORELLANA, E. *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*, Biblioteca Técnica Philips, Madrid, 523 p., 1972

REVIL, A.; CARY, L.; FAN, Q.; FINIZOLA, A.; TROLAND, F. Self-potential signals associated with preferential ground water flow pathways in a buried paleo-channel. *Geophysical Research Letters*, vol. 32, p. 1-4, 2005

SILVA, R.W.C.; MALAGUTTI FILHO, W.; MOREIRA, C.A. Emprego do método da Eletroresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério municipal de vila Resende, Piracicaba-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol 27, n.3, p.389-399, 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v27n3/a07v27n3.pdf> . Acesso em 10 ago. de 2012

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. *Applied Geophysics*. 2° ed., New York: Cambridge University Press, 774 p., 2004.

THEMELIS, N.J. & ULLOA, P.A. Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, vol. 32, p. 1243-1257, 2007

ZAINE, J. E. *A geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)*. 192 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1994.