

# ESTUDO EXPERIMENTAL DE UMA ÁREA CONTAMINADA POR LODO BIODOSSÍLIDO, POR MEIO DE ENSAIOS DE CAMPO DO TIPO CONE RESISTIVO

Experimental study of an area contaminated by biosolid sludge, through field tests of the type resistivity cone

Renato Pinto da Cunha\*

Luiz Heleno Albuquerque Filho\*\*

Luís Fernando Martins Ribeiro\*\*\*

Fabília de Souza Oliveira\*\*\*\*

**RESUMO** – Este artigo apresenta os resultados de uma investigação geoambiental, realizada na Estação de Tratamento de Esgoto Norte da CAESB, em Brasília, Distrito Federal do Brasil, utilizando o cone resistivo como ferramenta principal de investigação. A campanha de investigação da área de estudo compreendeu, inicialmente, a caracterização geotécnica, mineralógica e físico-química do substrato, por meio da coleta de amostras de solo, em diferentes pontos, e posterior realização de ensaios de laboratório e análises químicas. Adicionalmente, foram coletadas amostras do fluido, com um amostrador do tipo BAT, do lençol subterrâneo e, também, da superfície do lago Paranoá. A comparação entre os resultados das caracterizações do substrato, das perfilagens eletrorresistivas e dos ensaios com o cone resistivo evidenciou um contraste significativo entre as áreas contaminadas e não contaminadas, além de permitir a determinação de correlações consistentes, com determinados contaminantes.

**SYNOPSIS** – This paper presents the results of a geo-environmental investigation, carried out in the North Sewage Treatment Plant of the city of Brasília, in the Federal District of Brazil, which, on a pioneer basis, used the resistivity cone as the main site investigation tool. The investigation campaign of the study area involved the geotechnical, mineralogical and physico-chemical characterization of the substratum by means of soil samples at distinct points, and their subsequent laboratory testing and chemical analysis. Additionally, fluid samples were retrieved a BAT type sampler, which was employed in the ground water and also at the surface of the lake Paranoá. The comparison of the characterization results from the soil and fluid with those from the cone resistivity tests demonstrated a significant contrast between contaminated and non contaminated areas, besides allowing the establishment of consistent correlations with certain contaminants. The resistivity cone results have also been compared to those from conventional electroresistivity surveys.

**PALAVRAS CHAVE** – Investigação geoambiental, cone resistivo, lodos biossólidos.

---

\* Professor Adjunto (PhD), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília-DF, Brasil. E-mail: rpcunha@unb.br

\*\* Doutorando CNPq (MSc), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília-DF, Brasil. E-mail: luizheleno@unb.br

\*\*\* Professor Adjunto (DSc), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília-DF, Brasil. E-mail: lmartins@unb.br

\*\*\*\* Supervisora de Obras (MSc), Aldeias Infantis SOS Brasil. Brasília-DF, Brasil.  
E-mail: fabricia.oliveira@gmail.com

## 1 – INTRODUÇÃO

O lodo biossólido consiste no composto resultante do tratamento dos esgotos domésticos e industriais, realizado em locais específicos, pelas empresas de saneamento. Em sua composição, são encontrados elementos nutrientes e metais pesados, além de grandes concentrações de agentes patogênicos, como vírus, enterobactérias, ovos de helmintos e cistos de protozoários. Em virtude do seu elevado potencial de contaminação, a disposição do lodo biossólido não reciclado pode estar associada a diversos impactos ambientais, na área de tratamento de esgotos.

Dentre estes possíveis impactos ambientais, podem ser destacadas a produção de odores desagradáveis, a contaminação do solo, das águas superficiais e do lençol freático por agentes patogênicos e metais pesados, a proliferação de organismos indesejáveis, vetores de várias enfermidades (roedores e insetos) e os riscos de contaminação do homem e dos animais com elementos patogênicos, por inalação, ingestão ou ferimentos.

Nesse sentido, a análise da qualidade da água subterrânea e do solo constitui um elemento fundamental para a avaliação da eventual contaminação de áreas sujeitas à ação do lodo biossólido não reciclado. Esta avaliação pode ser realizada de forma direta, por meio da coleta de amostras de solo, da água e do ar, ou indiretamente por via da medição de alguma propriedade do solo que possa ser alterada devido à presença de algum tipo de contaminante.

As técnicas geofísicas, como a utilização da resistividade elétrica, constituem um método indireto de medir as propriedades do solo, tendo sido muito aplicadas, nas últimas décadas, na determinação da contaminação das águas subterrâneas e do solo e no delineamento das plumas de contaminação. O objetivo dessa técnica é detectar características do perfil geotécnico, medindo-se a variação da resistividade elétrica do meio.

O domínio do cone resistivo, como ferramenta de investigação geoambiental, constitui um importante avanço na linha de pesquisa de áreas contaminadas, podendo tal técnica ser amplamente expandida em pesquisas futuras. Entre outras vantagens, essa ferramenta é capaz de detectar contaminação, com um contraste de cerca de 1%, entre uma área contaminada e outra sem contaminação. Adicionalmente, a sua utilização não gera resíduos, eliminando a preocupação com o material extraído que não é aproveitado durante o ensaio, além de apresentar um menor custo, quando comparada com outras técnicas atualmente utilizadas (Campanella & Weemees, 1990).

Desta forma, o presente trabalho apresenta o uso dessa técnica, de forma pioneira e preliminar, numa área contaminada do Distrito Federal do Brasil, área esta, que serviu de base de estudo de uma dissertação de mestrado recente, do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, da Universidade de Brasília (Oliveira, 2004).

## 2 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica pode ser definida como propriedade do material que quantifica a resistência à passagem de um fluxo de elétrons através de um meio condutor, sendo medida em Ohm e expressa pela equação apresentada a seguir:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (1)$$

onde  $\rho$  representa a resistividade elétrica e  $\sigma$  a condutividade elétrica de um dado material.

O estudo das características do solo através da resistividade elétrica vem sendo realizado, há muito tempo, por pesquisadores da área da hidrogeologia. As pesquisas realizadas com esta técnica indireta de investigação, envolveram basicamente a determinação de correlações da resistividade elétrica com diferentes propriedades físicas do solo, tais como a porosidade e a condutividade hidráulica, e com as propriedades físico-químicas associadas ao potencial de corrosão (Lunne et al., 1997). Mais recentemente, o conceito da resistividade foi incorporado na rotina de investigação geoambiental de sítios contaminados por resíduos orgânicos e inorgânicos (Campanella et al., 1998; Robertson et al., 1998).

A resistividade elétrica do solo é o resultado das características da eletricidade através dos componentes do mesmo, e da interação entre eles. O solo contaminado é um sistema multifásico, sendo composto por partículas sólidas, líquidos em fase aquosa (Aqueous Phase Liquids - APL), líquidos em fase não-aquosa (Non Aqueous Phase Liquids - NAPL) e ar. Assim, a principal dificuldade consiste na identificação de qual a componente que causa a mudança na resistividade.

Nos solos e nas rochas, a resistividade elétrica tende a diminuir com o aumento da umidade, da quantidade de sólidos dissolvidos na água intersticial e da porosidade comunicante total (a água presente em pequenos vazios isolados apresenta pouca influência). Em solos argilosos, os cátions adsorvidos na superfície dos cristais de argila atuam como condutores de eletricidade, tornando os solos argilosos menos resistivos que os solos arenosos (Benson et al., 1982, citado por Nascimento, 1998).

Dessa forma, segundo Daniel (1997), a resistividade elétrica do solo pode ser influenciada por diversos fatores, podendo ser destacados:

- a) o grau de saturação;
- b) a composição iônica do líquido (relacionada com a resistividade do fluido intersticial);
- c) a porosidade;
- d) a temperatura;
- e) a forma dos poros; e
- f) a capacidade de troca catiônica da matriz sólida.

Entre as formulações que definem a resistividade elétrica dos diferentes componentes, a considerada mais simples é a lei de Archie (1942). Esta formulação admite que a resistividade do fluido intersticial, a porosidade do solo e o grau de saturação constituem os três fatores dominantes que afetam a resistividade dos solos granulares (Daniel et al., 2000). Adicionalmente, assume-se que a resistividade do solo é diretamente proporcional à resistividade elétrica do fluido intersticial e à geometria dos espaços vazios no solo (ou rocha), sendo expressa pela equação abaixo:

$$\rho_f = \frac{\rho_b}{FF} = am^{-m}S_r^{-s} \quad (2)$$

onde  $\rho_f$  representa a resistividade elétrica do fluido intersticial, FF é um fator de forma,  $\rho_b$  é a resistividade elétrica aparente do solo,  $a$  representa uma constante dependente da porosidade,  $n$  é a porosidade do solo,  $m$  representa uma constante dependente do grau de cimentação entre as partículas,  $S_r$  é o grau de saturação do solo e  $S$  representa uma constante experimental do solo.

Com parâmetros referentes à natureza geoquímica, pode-se avaliar continuamente a resistividade detectada pelo cone resistivo e compará-la com a análise química feita nas amostras coletadas pelos sistemas de amostragem de fluido. A Tabela 1 apresenta alguns valores típicos da condutividade elétrica dos fluidos, que servem de base de comparação para os valores a serem aqui apresentados mais a frente.

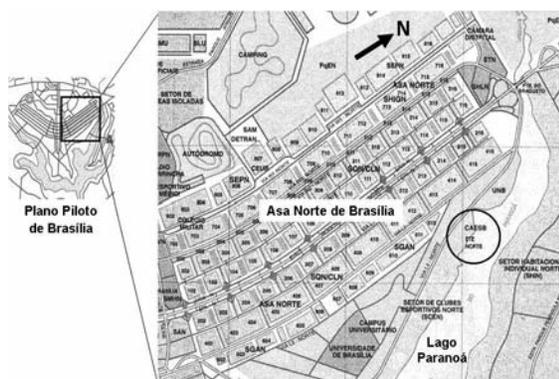
**Tabela 1** – Valores típicos de condutividade elétrica dos fluidos (Campanella et al., 1994).

Tipo de material	Condutividade integral (mS/m)	Condutividade do fluido (mS/m)
Água do mar	–	5.000
Água potável	–	< 665
Areias de rejeitos de minério com drenagem ácida	1.000 – 25	500 – 37
Areias de rejeitos de minério sem drenagem ácida	14,5 – 10	66,5 – 20
APL em areias	2.000 – 600	21
NAPL em areias	8	0,05
100% Dicloreto de etileno (ED)	–	–
50% ED e 50% água em areias	1,4	–
17% ED e 83% água em areias	3,6	–
Argilas	1.000 – 10	–
Aluviões e areias	100 – 1,2	–
Areias com óleo	250 – 1,2	–

### 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 – Descrição da Área de Estudo

O local escolhido para a realização desta campanha de investigação dos solos, por meio de ensaios de cone resistivo, foi a Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Norte, da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal do Brasil (CAESB), em Brasília, devido à suspeita de contaminação das águas do lago Paranoá, por resíduos provenientes do tratamento dos esgotos nesta região. A Figura 1 apresenta a localização da ETE Norte, da CAESB, situada nas margens do lago Paranoá, no “Plano Piloto” de Brasília.



**Fig. 1** – Mapa da Asa Norte de Brasília, destacando a ETE Norte, da CAESB.

A provável fonte desta contaminação está relacionada com o depósito de lodo em que são lançados os resíduos sólidos resultantes do tratamento do esgoto, situado a cerca de 500 m da margem do lago Paranoá, e que foi, por isso, obviamente uma das áreas escolhidas para a realização dos ensaios. Ao lado do depósito de lodo encontra-se um campo de futebol, onde nunca foram depositados os resíduos, que foi escolhido como área de comparação, por ser, teoricamente, uma área não contaminada. Entre estas duas áreas ocorre um desnível de cerca de 1 m, estando o campo de futebol na área de maior elevação.

A outra área escolhida para realização dos ensaios, localiza-se a jusante dos leitos de secagem da estação de tratamento, nas margens do lago Paranoá. Esta área foi escolhida para que pudesse ser feita a verificação de uma provável contaminação da água subterrânea, em virtude de nesta região o nível da água se encontrar a 2,8 m de profundidade. A Figura 2 apresenta a localização das áreas onde foram realizados a coleta de amostras (solo, fluido) e os ensaios com a utilização do cone resistivo.



Fig. 2 – Detalhe da localização das áreas investigadas, na ETE Norte, da CAESB.

### 3.2 – Descrição dos Ensaios de Laboratório e de Campo

A campanha completa de investigação da área de estudo da Estação de Tratamento de Esgotos Norte, da CAESB, compreendeu, inicialmente, a realização de um levantamento topográfico e a realização de sondagens verticais, para coleta de amostras do solo e do fluido, em diferentes profundidades. Estas amostras foram devidamente acondicionadas e transportadas para o laboratório, onde foram realizados os ensaios de caracterização física (granulometria, determinação dos índices físicos e dos limites de consistência) e as análises químicas.

Adicionalmente, objetivando a definição do perfil estratigráfico e da resistência à penetração das áreas de estudo, foram realizadas sondagens à percussão, associadas ao ensaio de penetração dinâmica (SPT), e ensaios com o penetrômetro dinâmico leve (DPL). Estes ensaios foram realizados em diferentes pontos na região do depósito de lodo, no campo de futebol e nas margens do lago Paranoá, conforme esquematizado na Figura 2.

A complementação da campanha de investigação geoambiental envolveu a realização de ensaios geofísicos de eletroresistividade e ensaios com a utilização do cone resistivo, na área do campo de futebol e do depósito de lodo. As perfilagens dos ensaios de eletroresistividade foram executadas em 6 linhas de 25 m, espaçadas lateralmente de 10 m entre si, abrangendo toda a área de estudo. Estes ensaios específicos foram gentilmente realizados pelo Instituto de Geologia da Universidade de Brasília. Já os ensaios com o cone resistivo, conduzidos por Oliveira (2004), foram realizados em 8 pontos distintos, com uma profundidade média de 4 m e com medições da resistividade ocorrendo a cada 20 cm de cravação da ponteira. A Figura 3 apresenta o desenho esquemático das perfilagens dos ensaios geofísicos de eletroresistividade, e a localização dos ensaios com o cone resistivo.

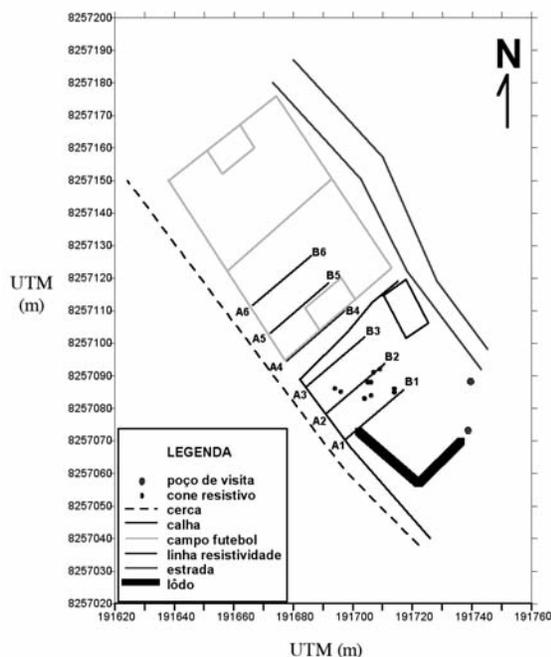


Fig. 3 – Desenho esquemático da localização dos ensaios de eletroresistividade e cone resistivo.

## 4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados desta campanha foi realizada por meio da avaliação das diferentes informações e parâmetros obtidos nos ensaios. Assim, tornou-se possível a comparação dos resultados do cone resistivo com as análises químicas do fluido, com o perfil de umidade e com os resultados obtidos através da perfilagem eletroresistiva. Este processo de comparação dos resultados foi utilizado para comprovar a validade do uso do cone resistivo no delineamento da contaminação, no zonamento e identificação de áreas prioritárias ou nas suspeitas que possam requerer uma investigação mais detalhada.

### 4.1 – Comparação dos Resultados do Cone Resistivo com os Perfis de Umidade

Sabe-se, pela lei de Archie (1942), que o grau de saturação apresenta uma grande influência nos valores da resistividade elétrica (condutividade), especialmente para baixos graus de saturação. Assim, analisou-se, neste item, a influência da umidade “in situ” do solo na resistividade elétrica, comparando-se os resultados obtidos pelo cone resistivo, com a umidade do solo, tanto no depósito de lodo, quanto na margem do lago.

A Figura 4 apresenta, respectivamente, a variação do teor de umidade no campo e da resistividade elétrica com a profundidade, em sondagens verticais realizadas no depósito de lodo. Os valores de umidade utilizados correspondem àqueles obtidos em amostras coletadas no mesmo dia da realização das sondagens verticais com o cone resistivo.

A análise dos perfis apresentados na Figura 4 permite identificar a pouca variação dos valores da resistividade elétrica do solo, ao longo da profundidade, apesar da ocorrência de uma franca variação do teor de umidade.

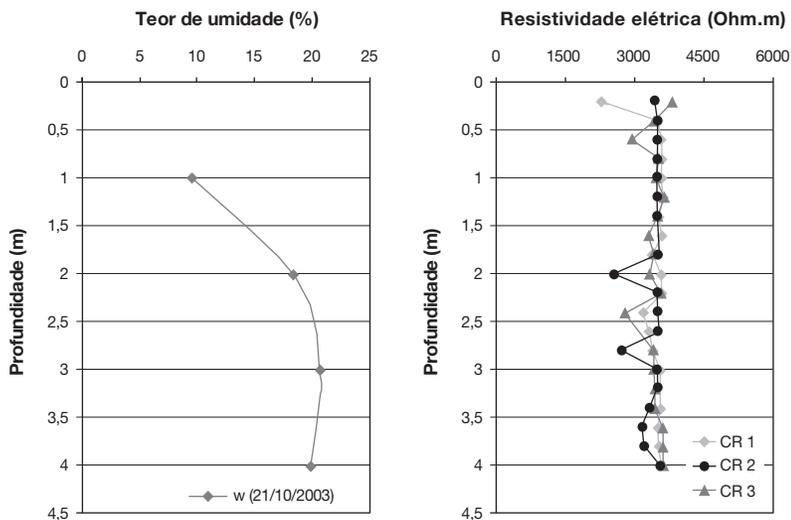


Fig. 4 – Perfis de umidade e de resistividade elétrica, medidos no depósito de lodo.

A Figura 5 apresenta o perfil de variação da umidade de campo e da resistividade elétrica em sondagens verticais, realizadas na margem do lago Paranoá, em época semelhante à das medições apresentadas na Figura 4. Nestes resultados, pode-se identificar um comportamento bastante diferenciado daquele obtido nos ensaios realizados no depósito de lodo, tanto na magnitude dos valores, quanto na forma da curva. Adicionalmente, observa-se, na faixa de saturação do solo (profundidade superior a 2,8 m, onde se encontra o nível de água local), uma estabilização das medidas da resistividade elétrica.

A ocorrência de valores significativamente elevados de resistividade elétrica, na área do depósito de lodo, encontra-se associada ao baixo grau de saturação do solo, nesta região. A fase sólida

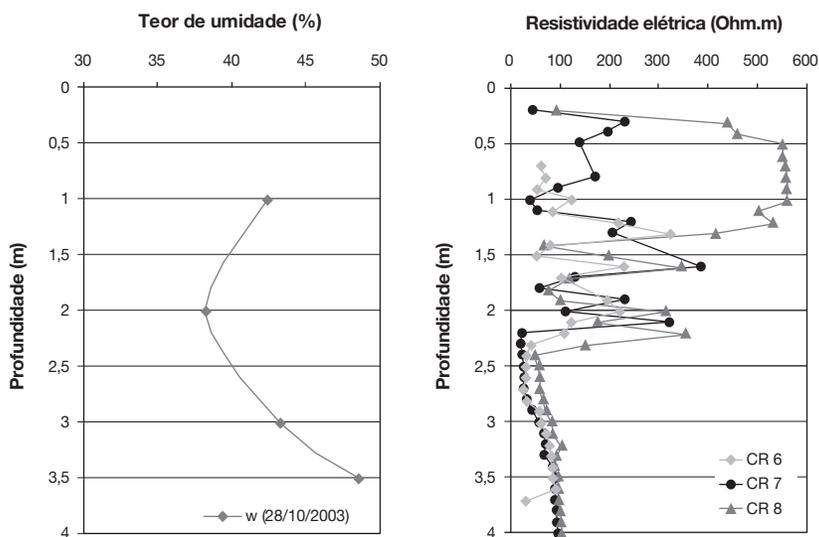
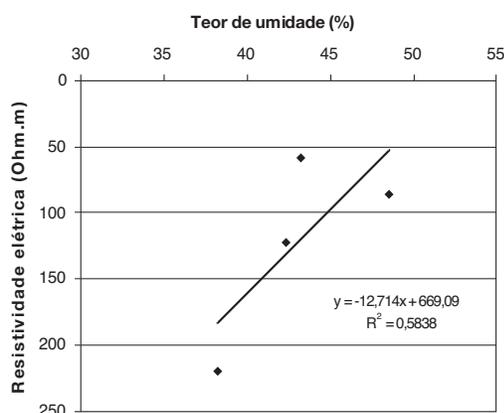


Fig. 5 – Perfis de umidade e de resistividade elétrica medidos, na margem do lago Paranoá.

e o ar presentes no solo comportam-se como um material isolante, reduzindo a condução elétrica e, conseqüentemente, aumentando sua resistividade. Dessa forma, a utilização de técnicas baseadas no princípio da resistividade elétrica, em meios não saturados, ainda constitui um grande desafio para a geotecnia, em virtude da dificuldade em correlacionar a resistividade elétrica com as propriedades físicas do solo, neste tipo de condição do mesmo.

Entretanto, na região da margem do lago Paranoá, em virtude da maior umidade do solo e da consistência dos dados obtidos, tornou-se possível obter uma correlação da resistividade elétrica com o teor de umidade (Figura 6). Embora o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) obtido seja relativamente baixo, comprovou-se a tendência de aumento da resistividade elétrica com a redução do teor de umidade nos solos.



**Fig. 6** – Correlação da resistividade elétrica com o teor de umidade.

Adicionalmente, a análise global dos resultados dos ensaios realizados, na região do depósito de lodo e na margem do lago Paranoá, permitiu atestar que a resposta do cone resistivo mostrou-se significativamente melhor em solos que apresentam um teor de umidade superior a 30%.

## 4.2 – Comparação dos Resultados do Cone Resistivo com as Análises Químicas do Solo e do Fluido

### 4.2.1 – Análises químicas do solo

As análises químicas dos solos foram realizadas a partir de amostras coletadas em diferentes profundidades, nas regiões do depósito de lodo, do campo de futebol e da margem do lago Paranoá. Estas análises químicas objetivaram identificar a concentração de macroelementos (Ca, Mg, K, Na, Al, H<sup>+</sup>Al, CTC e Valor S), a saturação de alumínio e de bases, a presença de carbono orgânico e matéria orgânica, a concentração de fósforo, o pH na água e o pH no KCl. As Figuras 7 a 11 apresentam os perfis de concentração de alguns destes elementos, necessários para a identificação da contaminação, nas diferentes áreas estudadas.

Os resultados das análises químicas da região do depósito de lodo e na margem do lago Paranoá indicam alterações significativas na composição original dos solos, em praticamente todos os parâmetros ensaiados. Esta constatação torna-se evidente quando se comparam os valores determinados nestas regiões, com os resultados obtidos no campo de futebol (área de referência, livre de

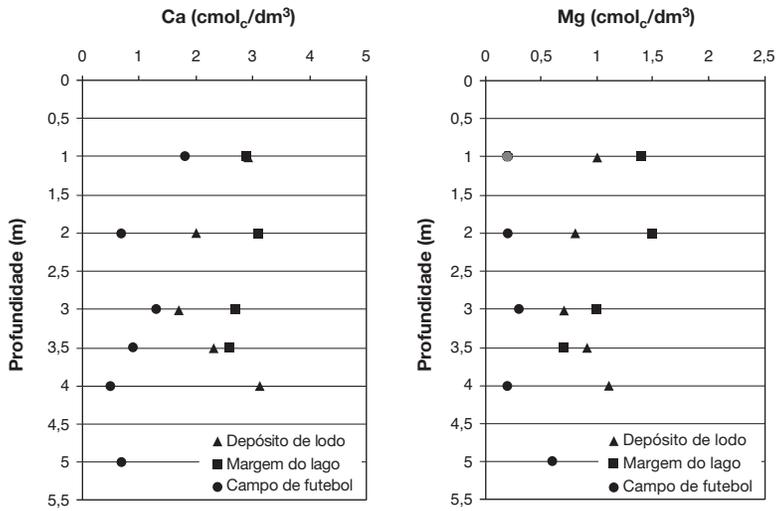


Fig. 7 – Perfis de concentração de cálcio e de magnésio, nas diferentes áreas de estudo.

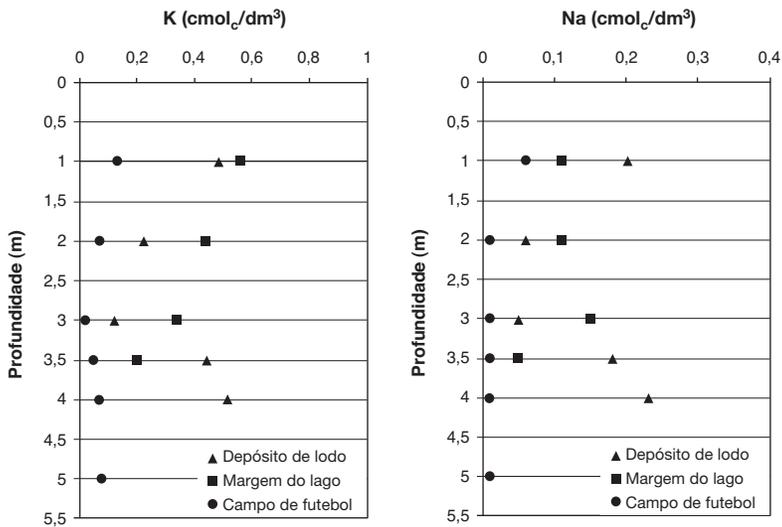
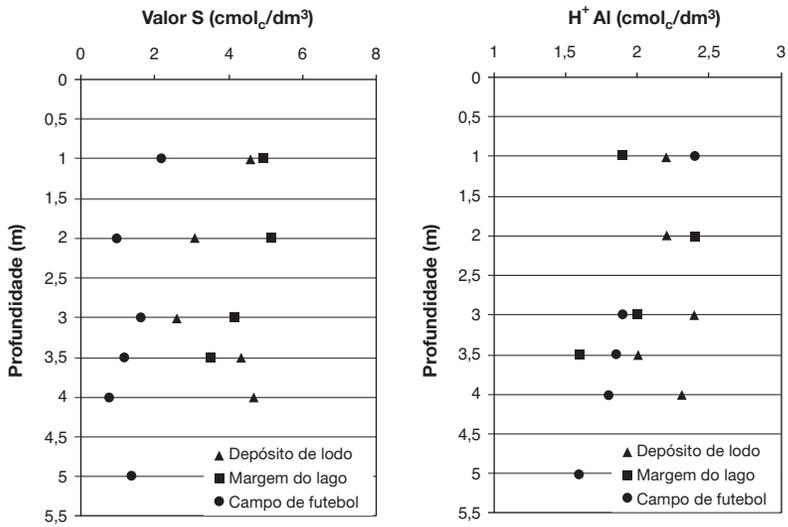
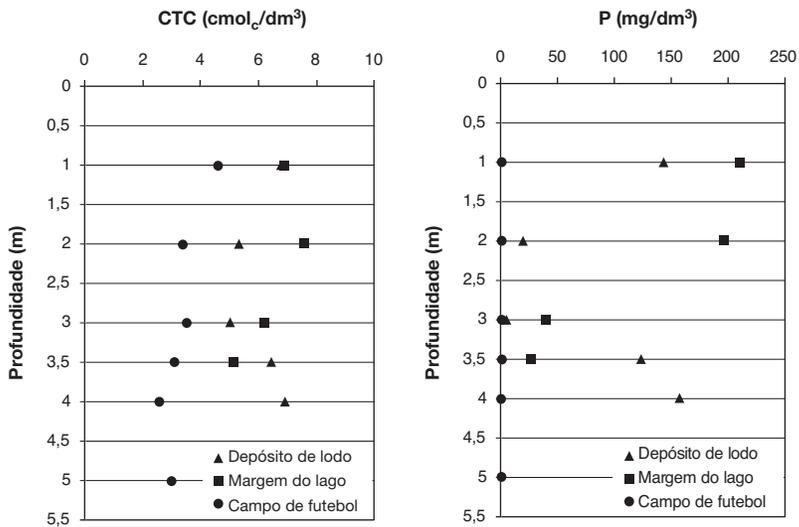


Fig. 8 – Perfis de concentração de potássio e de sódio, nas diferentes áreas de estudo.



**Fig. 9** – Perfis de concentração do valor S e da acidez total, nas diferentes áreas de estudo.



**Fig. 10** – Perfis de concentração da capacidade de troca catiônica e de fósforo, nas diferentes áreas de estudo.

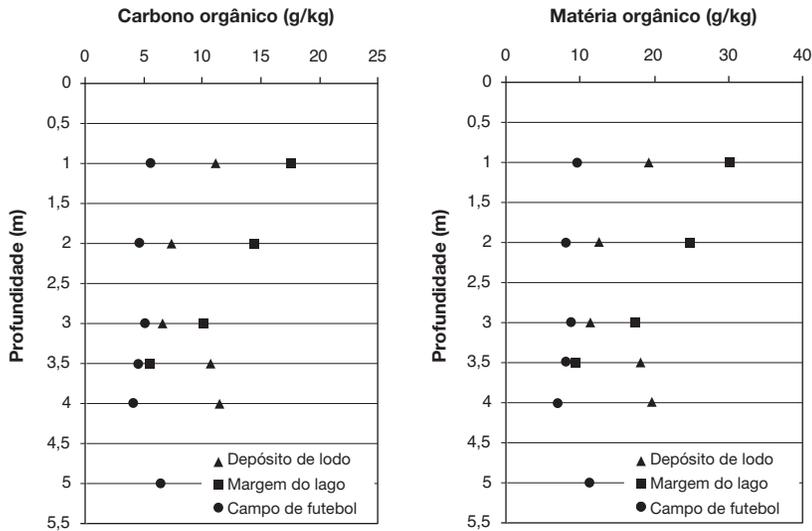


Fig. 11 – Perfis de concentração do carbono orgânico e da matéria orgânica, nas diferentes áreas de estudo.

contaminação pelo lodo biossólido). A magnitude da variação dos parâmetros químicos, entre as regiões estudadas, representa um importante indicio da contaminação dos solos pelo lodo biossólido produzido pela Estação de Tratamento de Esgotos Norte, da CAESB.

#### 4.2.2 – Comparação e correlação dos resultados do cone resistivo com as análises químicas do solo

A necessidade de avaliar a relação entre os resultados do cone resistivo e os parâmetros das análises químicas dos solos motivou o desenvolvimento de diferentes correlações. Como as amostras de solo para as análises químicas foram coletadas a cada metro de profundidade, e os valores de resistividade elétrica foram medidos a cada 20 cm ou 10 cm (respectivamente, no depósito de lodo e na margem do lago), optou-se por fazer uma média entre os quatro valores subsequentes da resistividade elétrica, correspondentes à profundidade na qual a amostra de solo foi coletada.

Para exemplificar, a Figura 12 apresenta os resultados da correlação existente entre os valores da concentração de cálcio e da resistividade elétrica do solo, medidos na região da margem do lago. Adicionalmente, torna-se relevante destacar que, até a profundidade de 2,8 m, a região foi conside-

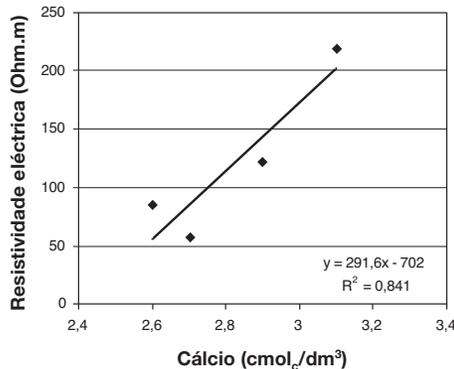


Fig. 12 – Correlação da concentração de cálcio com a resistividade elétrica.

rada não saturada, garantindo-se a saturação do solo apenas para profundidades superiores a 3 m (abaixo do nível da água). As correlações lineares foram obtidas através do método dos mínimos quadrados.

**Tabela 2** – Correlações dos parâmetros químicos do solo com a resistividade elétrica.

Parâmetro	Equação proposta	Coefficiente de correlação (R <sup>2</sup> )	Limite da equação
Cálcio (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )	$y = 291,6x - 702$	0,841	$x \geq 2,35$ (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )
Magnésio (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )	$y = 146,7x - 47$	0,592	$x \geq 0,32$ (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )
Valor S (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )	$y = 71,9x - 200$	0,568	$x \geq 2,78$ (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )
Acidez total (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )	$y = 163,4x - 201$	0,586	$x \geq 1,23$ (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )
C.T.C. (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )	$y = 54,5x - 229,5$	0,626	$x \geq 4,21$ (cmol <sub>e</sub> /dm <sup>3</sup> )
Fósforo (mg/dm <sup>3</sup> )	$y = 0,55x + 55,5$	0,591	–

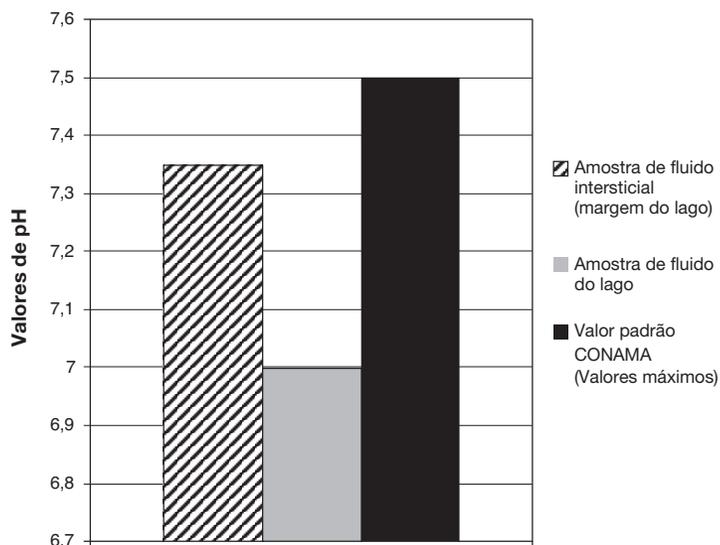
De uma maneira geral, as correlações determinadas a partir dos resultados dos ensaios da margem do lago Paranoá, apresentaram um razoável ajuste da resistividade elétrica com os parâmetros químicos dos solos. Esta tendência mostrou-se mais evidente nas correlações da resistividade com as concentrações de cálcio, de magnésio, do valor S, de fósforo, da capacidade de troca catiônica e da acidez total, confirmando a utilização destes parâmetros como bons indicadores da contaminação do solo, nesta região. Com os demais parâmetros químicos do solo, as correlações com a resistividade elétrica apresentaram-se bastante dispersas, particularmente nos pontos referentes aos metros iniciais dos furos (zona não-saturada).

#### 4.2.3 – Comparação dos resultados do cone resistivo com análises químicas do fluido

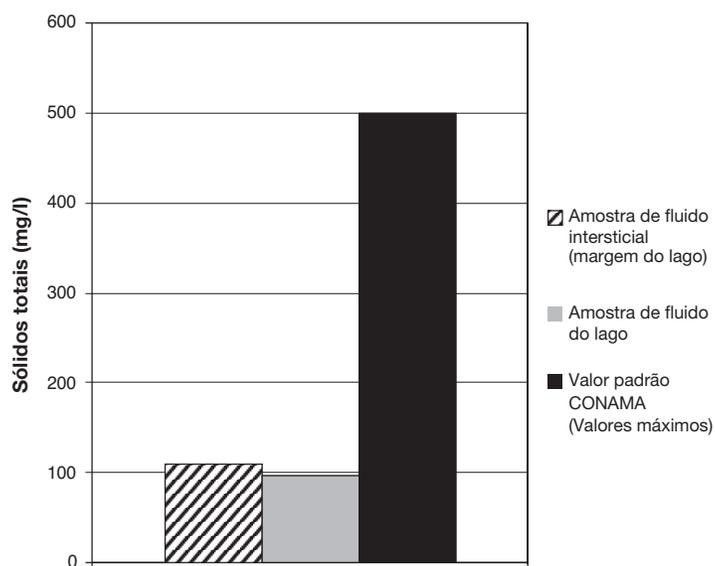
A coleta de líquidos intersticiais representa um dado experimental valioso, para potencializar a interpretação dos resultados medidos. Diversos autores (Brandl & Robertson, 1997; Watabe et al., 2002; Lunne et al., 1997; Pacheco, 2004) enfatizam a necessidade de se obter amostras dos fluidos intersticiais, e reportam a existência de diferentes equipamentos com essa finalidade. A principal vantagem deste procedimento está associada à obtenção da condutividade elétrica do fluido.

Nesta campanha de investigação, as amostras de fluido foram coletadas diretamente no lago Paranoá e na margem próxima à ETE Norte, da CAESB, a uma profundidade de 3 m por meio de uma sondagem vertical, associada a um amostrador do tipo BAT. As Figuras 13 a 15 apresentam uma comparação dos valores dos parâmetros obtidos nas análises químicas dos fluidos, com os valores máximos admitidos pela resolução n.º 20 do CONAMA, 1986 (Conselho Nacional do Meio Ambiente – Ministério do Meio Ambiente do Brasil).

Os valores dos parâmetros obtidos nas análises químicas das amostras de fluido coletadas em profundidade, e diretamente do lago Paranoá, encontram-se dentro dos valores definidos pela resolução n.º 20 do CONAMA, com exceção do valor de fósforo total, da amostra da sondagem vertical. Este valor mostrou-se significativamente superior ao limite máximo permitido pela resolução ambiental, atestando que o lençol freático, nesta região, pode ter sofrido uma alteração, devido à deposição do lodo biossólido da ETE Norte, da CAESB.



**Fig. 13** – Valores de pH das amostras de fluidos.



**Fig. 14** – Concentração de sólidos totais das amostras de fluidos.

Na Figura 16, é apresentada uma comparação entre a condutividade elétrica da amostra de fluido coletada na sondagem vertical (profundidade de 3 m), a condutividade elétrica da amostra de fluido coletada diretamente na superfície do lago Paranoá (medida com um condutivímetro), a condutividade elétrica citada por Lunne et al. (1997), como valor característico para água doce, e a condutividade elétrica do solo medida por meio do cone resistivo na margem do lago à profundidade de 3 m.

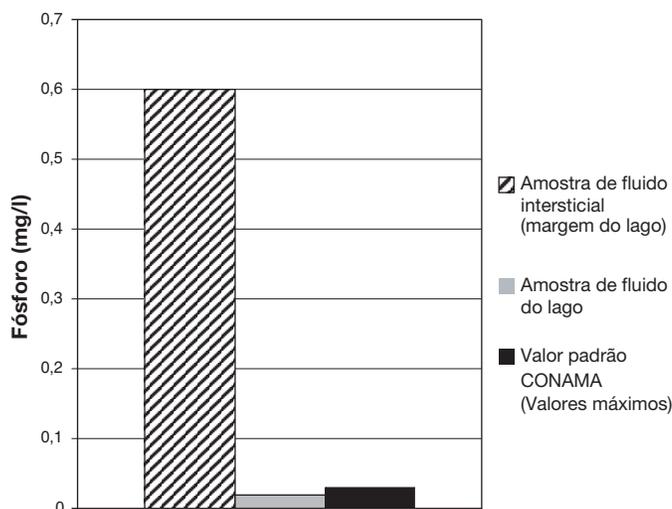


Fig. 15 – Concentração de fósforo total das amostras de fluidos.

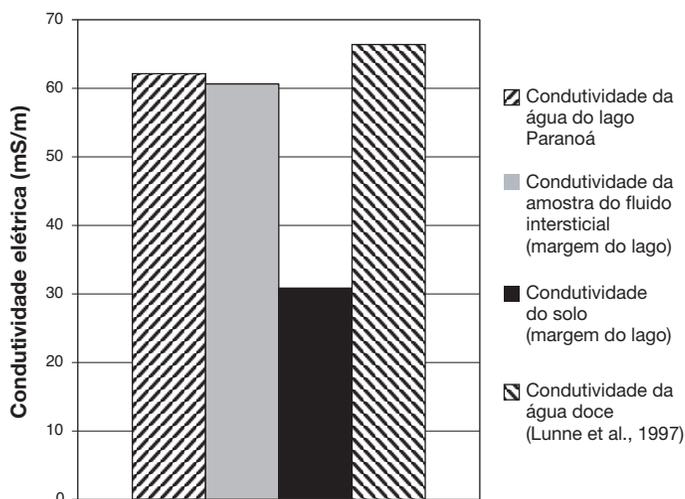


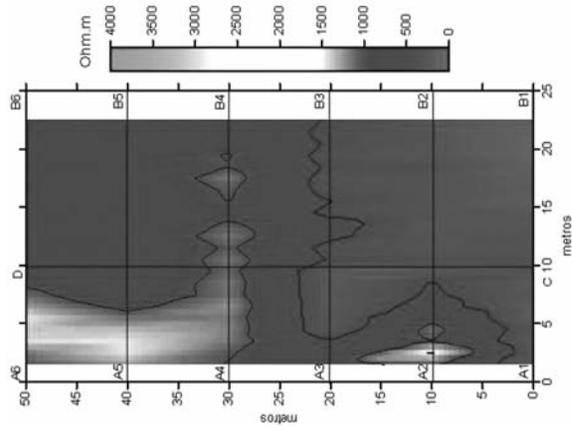
Fig. 16 – Condutividade elétrica das amostras de fluido e de solo.

Os valores da condutividade elétrica obtidos nos ensaios realizados nas amostras de fluido coletadas em profundidade e no lago Paranoá mostraram-se muito próximos do valor típico, proposto por Lunne et al. (1997) para a condutividade da água doce pura. Apesar do valor de fósforo total encontrado na amostra do fluido intersticial, ter sido considerado bastante elevado (Figura 15), e o solo da região apresentar indícios de contaminação, os resultados indicam que a pluma de contaminação chega até o curso de água do lago em níveis aceitáveis.

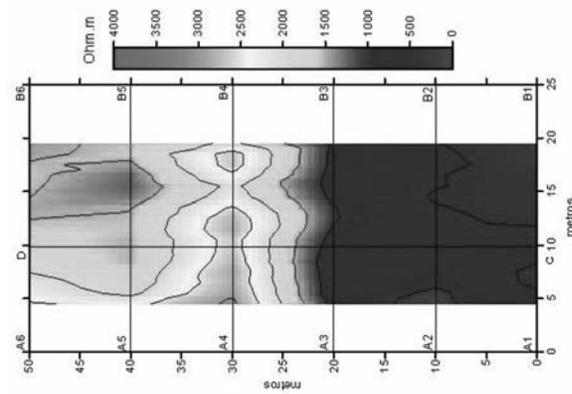
#### 4.3 – Comparação dos Resultados do Cone Resistivo com a Perfilagem Eletroresistiva

Os dados de resistividade obtidos pela técnica de perfilagem foram devidamente processados, resultando em seis mapas de resistividade elétrica, correspondentes aos diferentes níveis de profun-

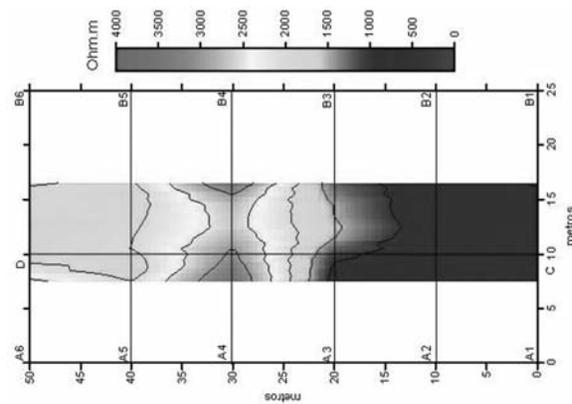
didade (linhas de resistividade conforme a Figura 3). As Figuras 17 a 19 apresentam os mapas de resistividade dos níveis 1, 3 e 5, correspondentes, respectivamente, às profundidades de 0,5 m, 1,5 m e 2,5 m.



**Fig. 17** – Mapa de resistividade, correspondente a 0,5 m de profundidade.



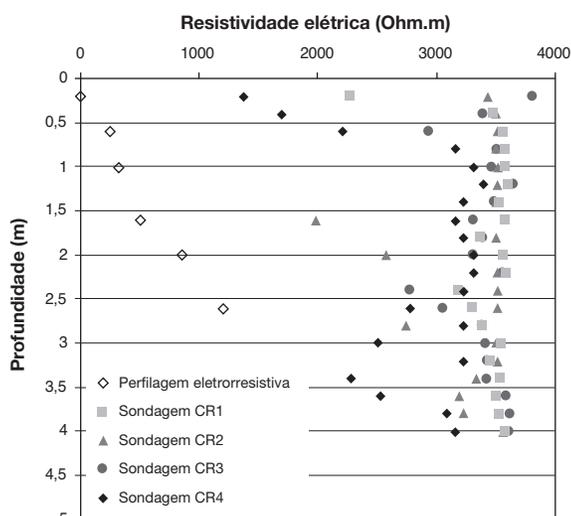
**Fig. 18** – Mapa de resistividade, correspondente a 1,5 m de profundidade.



**Fig. 19** – Mapa de resistividade, correspondente a 2,5 m de profundidade.

A análise dos mapas de resistividade dos níveis 1, 3 e 5 permite identificar baixos valores de resistividade elétrica (0 a 1.500 Ohm.m), na porção espacial compreendida entre as linhas A1-B1 e A3-B3 (vide Figura 3). Em contraste, na outra porção, compreendida entre as linhas A4-B4 e A6-B6, são registrados valores mais elevados de resistividade (1.500 a 4.000 Ohm.m), notadamente para as profundidades superiores a 1,5 m. A ocorrência das regiões menos resistivas, na área do depósito de lodo, constitui um importante indício da contaminação do solo pelo lodo biossólido, resultante da Estação de Tratamento de Esgotos Norte, da CAESB.

A Figura 20 apresenta os valores de resistividade elétrica do solo do depósito de lodo, em função da profundidade, medidos por meio das sondagens verticais de cone resistivo (CR1, CR2, CR3 e CR4), realizadas na área. Os dados da sondagem CR5 foram desprezados, por apresentarem relevantes incoerências nos seus resultados. Adicionalmente, deve-se destacar que as sondagens verticais de cone resistivo foram realizadas na região contida entre as linhas A3-B3 e A1-B1, como está ilustrado na Figura 3.



**Fig. 20** – Perfis de resistividade elétrica, no depósito de lodo.

Os resultados da resistividade elétrica medidos na área do depósito de lodo, por meio do cone resistivo, mostraram-se muito superiores aos valores obtidos utilizando a perfilagem eletrorresistiva, em todas as profundidades.

Na Figura 21, são apresentados os valores da resistividade elétrica medidos por meio das sondagens verticais de cone resistivo (CR6, CR7 e CR8) e da perfilagem eletrorresistiva, realizadas na margem do lago, na área contida entre 0 e 12 m da seção resistiva. A análise dos perfis permite identificar que os valores de resistividade obtidos, utilizando os dois equipamentos, foram da mesma ordem de grandeza em todas as profundidades. Esta observação representa um indicativo de que as medidas do cone resistivo são mais representativas em regiões com teor de umidade mais elevado. No caso específico desta pesquisa, o valor de umidade utilizado como referência, foi de aproximadamente 30%.

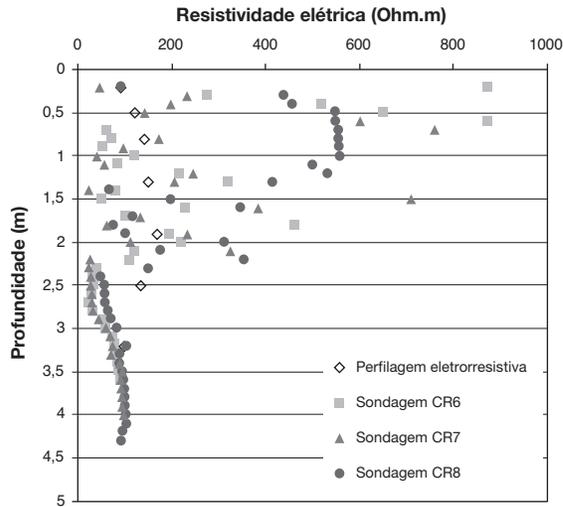


Fig. 21 – Perfis de resistividade elétrica, na margem do lago.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interpretação dos resultados das sondagens verticais de cone resistivo deve ser realizada em conjunto com a amostragem do solo e do fluido, utilizando amostradores da tecnologia *direct push*. A adoção deste procedimento, particularmente na investigação geoambiental de áreas contaminadas, relaciona-se com a influência do teor de umidade e da composição química destes solos na magnitude dos valores da resistividade elétrica.

Dessa forma, a coleta de amostras de solo e fluido nas regiões passíveis de contaminação pelo lodo biossólido, representou, no presente trabalho, um elemento fundamental para a determinação da concentração de diferentes compostos químicos. A utilização de uma área de referência, não contaminada, com características geotécnicas e mineralógicas similares àquelas sujeitas à contaminação, permitiu uma avaliação das possíveis variações na composição dos solos, em virtude da presença do lodo biossólido. Adicionalmente, os resultados das análises químicas ampliaram a possibilidade de se correlacionar a resistividade elétrica com diferentes parâmetros químicos dos solos e dos fluidos.

De uma maneira geral, pode-se afirmar que os resultados dos ensaios com o cone resistivo, nas diferentes áreas de estudo, indicaram a significativa influência do teor de umidade do solo na magnitude da resistividade elétrica. Este comportamento mostrou-se mais evidente na dificuldade encontrada para avaliar os resultados das sondagens verticais de cone resistivo na região do depósito de lodo, onde o solo apresentava umidade muito baixa, abaixo dos 30 %.

Adicionalmente, a avaliação integrada dos resultados do cone resistivo com as análises químicas dos solos, indicou haver uma relação direta da resistividade elétrica com diferentes parâmetros químicos. Entre todos os parâmetros analisados, as correlações da resistividade com a concentração de cálcio, magnésio e fósforo, com o valor S, com a capacidade de troca catiônica, e com a acidez total do solo, foram as que apresentaram o melhor ajuste. Entretanto, as correlações com a saturação de bases, o pH na água e no KCl, a concentração de sódio e potássio e as concentrações de carbono orgânico e de matéria orgânica não se mostraram razoáveis (de uso prático).

Os resultados das análises químicas realizadas nas amostras de água coletadas do lençol freático e da superfície do lago indicaram que, apesar da alta concentração de contaminantes e dos elevados valores de condutividade elétrica no solo, o curso de água do lago não sofreu danos relevantes, ou seja, ainda não está contaminado. Além disso, os resultados das análises químicas do solo, no depósito de lodo, puderam comprovar a contaminação do solo e fluido locais. Assim, de posse de todos os resultados dos ensaios, pôde-se concluir que a deposição regular de lodo biossólido, proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos Norte, da CAESB, na cidade de Brasília, realmente afetou a composição original do solo na região. Além disso, os valores obtidos permitiram atestar que o lençol freático na região estudada foi de fato comprometido, reforçando-se a importância da adoção de medidas mitigadoras na área para redução dos efeitos destes contaminantes no interior do solo.

O presente trabalho expõe, ainda que de forma preliminar, resultados de uma pesquisa de viés geoambiental, com esta versátil e promissora ferramenta de campo que é o cone resistivo. Os resultados obtidos evidenciaram a potencialidade que este ensaio pode ter em estudos para ambientes contaminados em que o solo e o fluido possam ser amostrados.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho gostariam de agradecer à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), a Empresa WRJ Engenharia Ltda. e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio recebido durante a realização desta pesquisa.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archie, G.E. (1942). *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, v. 146, pp 54-62.
- Brandl, H. & Robertson, P.K. (1997). *Geoenvironmental site investigation, specification and characterization*. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Congress on Environmental Geotechnics, v. 3, pp 1345-1374, Osaka, Japão.
- Campanella, R.G. & Weemees, I. (1990). *Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies*. Canadian Geotechnical Journal, n° 27, pp 557-567.
- Campanella, R.G., Davies, M.P., Boyd, T.J. & Everard, J.L. (1994). *In-Situ Testing Methods for Groundwater Contamination Studies*, Symposium on Developments in Geotechnical Engineering, From Harvard to New Delhi, pp 1936-1994, Balkema.
- Campanella, D.R.G.; Kristiansen, H.; Daniel, C.R. & Davies, M.P. (1998). *Site characterization of soils deposits using advances in piezocone technology*. In Proceedings of the 1<sup>st</sup> Conference on Geotechnical Site Characterization, pp 995-1000, Georgia, Estados Unidos.
- CONAMA (1986). Resolução n° 20, de 20/07/86. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente, Governo Federal, Brasília, 76 p.
- Daniel, C.R. (1997). *An investigation of the factors affecting bulk soil electrical resistivity*. University of British Columbia, Vancouver, BC, Canadá, 62 p.
- Daniel, C.R.; Campanella, R.G.; Howie, J.A. & Giacheti, H.L. (2000). *Specific depth cone resistivity measurements to determine soil engineering properties*, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, vol. 8, n° 1, pp 15-22.

- Lunne, T.; Robertson, P.K. & Powell, J.J.M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. 1ª ed., Blackie Academic & Professional, London, Reino Unido, 312 p.
- Nascimento, C.T.C. (1998). *Comparação de dados de levantamentos geofísicos e de campanhas de amostragem, em estudos de contaminação do subsolo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, 149 p.
- Oliveira, F.S. (2004). *Estudo experimental de uma área contaminada por lodo biosólido no DF via ensaios de cone eletro-resistivo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 108 p.
- Pacheco, A.O. (2004). *Ensaaios com cone resistivo em solos saturados*. Dissertação de Mestrado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 168.
- Robertson, P.K.; Lunne, T. & Powell, J.J.M. (1998). *Geoenvironmental applications of penetration testing*. Robertson and Mayne (ed.), *Geotechnical Site Characterization*, pp 35-47, Balkema, Rotterdam, Países Baixos.
- Watabe, T., Tsuchida, T., Tanaka, M., Oda, Y. & Sakai, Y., (2002). *Geoenvironmental cone penetrometer with efficient groundwater sampling*. In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Conference on Environmental Geotechnics*, v. 1, pp 71-76, Rio de Janeiro.