INVESTIGAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DO SOLO NA SALINIDADE DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA EXPERIMENTAL DA UFBA A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Andrea Sousa Fontes[1], *Antonio Expedito Gomes de Azevedo* [2], *Maria do Rosário Zucchi*[2], *Yvonilde Dantas Pinto Medeiros*[2]

RESUMO --- A região semi-árida vem sendo caracterizada pela presença de vários reservatórios com a presença de elevada salinização intensificando a carência no atendimento a demanda para usos mais nobres. Para determinação dos sais dissolvidos na água do solo o ideal seria investigação em amostras do solo, mas métodos práticos não estão disponíveis atualmente que permitam tal determinação, entretanto a concentração de sais totais ou a salinidade do solo pode ser feita no campo usando sinais elétricos ou eletromagnéticos de sensores apropriados. Tais determinações imediatas podem suprir a necessidade de amostras do solo e análise de laboratório, indicado também para caracterização da salinidade de áreas extensas. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a contribuição do solo no processo de salinização as águas dos açudes na região semi-árida por meio da utilização de métodos geoelétricos. Os resultados mostram que o potencial do solo é significativo como contribuinte de sais, ou seja, guarda grandes quantidades de sais disponíveis para serem carreados para as águas superficiais das bacias do semi-árido nordestino.

ABSTRACT --- The semi-arid region has been characterized by the presence of several reservoirs in the presence of high salinity increased the shortfall in service demand for more noble purposes. For determination of dissolved salts in soil water would be the ideal the investigation in soil, but are not practical methods currently available that allow such determination, however the total concentration of salts or salinity of soil can be made in the field using electrical or electromagnetic signals from sensors appropriate. Such determinations can fulfill the immediate need for soil samples and laboratory analysis, shown also to characterize the salinity of extensive areas. This study aimed to evaluate the contribution of soil salinity in the waters of the dams in semi-arid region by using geoelectrical methods. The results show that the potential of the soil is as significant contributor of salts, saves large amounts of salt available to be carried to surface waters of the basins of the semi-arid region..

Palavras-chave: métodos elétricos, salinidade do solo, semi-árido.

---

1) Escola Politécnica , UFBA, Salvador. E-mail: asfontes@ufba.br
2) Professor, UFBA. Salvador.

1 - INTRODUÇÃO

A região semi-árida vem sendo caracterizada pela presença de vários reservatórios com a presença de elevada salinização intensificando a carência no atendimento a demanda para usos mais nobres. Oliveira (2005) comenta que é natural que os elementos químicos responsáveis pela acumulação de sais nas águas superficiais estejam, de alguma forma, presentes nos solos de sua bacia hidrográfica, tratando-se, portanto, de uma poluição "natural" de origem difusa com contribuição de toda área de drenagem.

O termo salinidade se refere à presença de íons dissolvidos ($Na^{+,}$ Mg^{++}, Ca^{++}, K^{+}, Cl^{-}, $SO_4^{=}$, HCO_3^{-}, NO_3^{-} and $CO_3^{=}$) em amostras aquosas. Quando se refere ao solo, a salinidade se refere aos sais dissolvíveis no solo ou operacionalmente no extrato aquoso da amostra do solo. A salinidade é quantificada em termos da concentração total de sais solúveis, ou na pratica em termos da condutividade elétrica da solução uma vez que os dois são altamente correlacionados (US Salinity Laboratory Staff, 1954).

A condutividade elétrica é uma expressão numérica da habilidade inerente de um meio de transportar corrente elétrica. Como a condutividade elétrica e a concentração total de sais de uma solução aquosa são fortemente correlacionadas, a CE é comumente utilizada como uma expressão dos sais totais dissolvidos, levando-se em conta que ela é afetada pela temperatura da amostra, pela mobilidade, valência e concentração relativa individual de cada íon integrante da solução (a própria água é um condutor muito fraco de eletricidade).

Para determinação dos sais dissolvidos na água do solo o ideal seria in loco, mas métodos práticos não estão disponíveis atualmente que permitam tal determinação, entretanto a concentração de sais totais ou a salinidade do solo pode ser feita no campo usando sinais elétricos ou eletromagnéticos de sensores apropriados. Segundo Rhoades et al. (1999), tais determinações imediatas são muito valiosas para diagnóstico de salinidade e muitas vezes suprem a necessidade de amostras do solo e análise de laboratório, indicado também para caracterização da salinidade de áreas extensas.

A salinidade do solo pode ser definida por meio da análise em laboratório da condutividade elétrica de uma amostra saturada de solo extraída. Isso porque a condutividade é uma medida fácil e prática relativa a concentração total de íons dissolvido em uma amostra aquosa.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a contribuição do solo no processo de salinização as águas dos açudes na região semi-árida por meio da utilização de métodos geoelétricos.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Rhoades et al. (1999), existem três abordagens para determinação da salinidade do solo de um volume de solo com condutividade elétrica. Duas abordagens levam utilizam sensores portáveis para campo que são: sensores elétricos e sensores de indução eletromagnética. O terceiro tipo de sensor é baseado na tecnologia TDR (time-domain-reflectometria), que ainda não de mostrou suficientemente precisa simples ou rápida o bastante as necessidades gerais das pesquisas de salinidade no campo. Cada uma das duas primeiras abordagens tem suas limitações e vantagens.

O método da eletrorresistividade juntamente com os métodos da polarização induzida potencial espontâneo e eletromagnético forma o grupo dos principais métodos geoelétricos, que se baseiam na determinação de propriedades físicas que caracterizam os diferentes tipos de materiais que se encontram no ambiente geológico, e nos contrastes que estas propriedades podem apresentar (Telford et al., 1990).

O método da eletrorresistividade consiste basicamente no uso de medidas da diferença de potencial elétrico entre dois pontos do terreno, associadas às distribuições de correntes elétricas contınuas ou de baixa freqüência, de origem artificial, visando determinar a resistividade elétrica dos materiais geológicos em subsuperfície. A corrente elétrica artificial é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B), e mede-se o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente.

O método da eletrorresistividade se fundamenta na Lei de Ohm que define uma relação empírica entre a corrente que passa através de um condutor resultante de um determinado potencial de voltagem. A constante de proporcionalidade é chamada de resistência do material (R), que aumenta diretamente proporcional ao comprimento do condutor e inversamente proporcional ao diâmetro. Dessa forma para descrever a habilidade dos materiais em transmitir corrente elétrica independente desses fatores geométricos utiliza-se a resistividade ρ, dependente da natureza e do estado físico do condutor e resultante do produto da resistência elétrica por comprimento.

A Lei de Archie (1942), formulada através de uma série de experimentos realizados em amostras de arenitos, revela que a resistividade de uma rocha (ρr) depende não somente da quantidade de água (Sw) presente nos poros da mesma, mas também da própria resistividade desta água (ρw), da porosidade efetiva do meio (φ) e dos índices de cimentação m e de saturação n (Santos, 2003).

$$\rho_r = \rho_w \varphi^{-m} S_w^{-n}$$

A resistividade e seu inverso, a condutividade, de solos e rochas é influenciada pelos minerais que formam a parte sólida da rocha, pelo liquido e gases que preenchem seus vazios, porosidade; teor em água; quantidade e natureza dos sais dissolvidos. Dentre esses fatores, os mais importantes são a quantidade de água contida e a salinidade dessa água, uma vez que o aumento do valor desses

fatores leva a uma diminuição dos valores de resistividade, permitindo que haja deslocamento dos íons existentes na águas contidas nos poros de uma massa de solo (Telford et al., 1990).

Segundo Ward (1990) e Simandoux (1963) apud Nowroozi et al. (1999), para rochas contendo água e argila, a condutividade é dada por:

$$1/\rho_r = (S_w V_{arg}) / \rho_{arg} + S_w^n \varphi^m / a\rho_w$$

onde ρ_r é a resistividade da rocha; ρ_w é a resisteividade da água dos poros; a, m e n são coeficientes da equação de Archie no qual o valor numerioco de a é entre 0,6 e 1, o valor numérico de m é entre 1,4 e 2,2 e o de n é 2; φ é a porosidade; S_w é o índice de saturação ; V_{arg} é a fração de argila e ρ_{arg} é resistividade da fração de argila.

Os parâmetros que controlam a resistividade nessa equação podem variar com a profundidade e não são medidas de fácil realização. Resistividade da água e sedimentos sem argila pode variar de 1 a 100 Ωm, enquanto que a resistividade de argilas saturadas sozinhas pode variar de 1 a 120 Ωm (Parasnis, 1986 apud Nowroozi et al.,1999).

Essas condições permitem a imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos.

O mesmo tipo litológico pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade. Assim, na interpretação dos dados de resistividade dos materiais no subsolo obtidas a partir da superfície do terreno é fundamental o conhecimento geológico da área de estudo.

Para a análise da resistividade deve-se ainda levar em conta que os solos saturados permitem a identificação e caracterização dos diferentes tipos de materiais geológicos, entretanto, quando os solos se encontram secos, porção acima do nível freático seus valores são considerados atípicos apresentando uma ampla faixa de variação não identificando os materiais litológicos (Telford et al., 1990).

A resistividade determinada por esse método refere-se a um meio homogêneo, o que não ocorre na prática. Dessa forma o valor resultado das medições na maioria dos métodos elétricos representa uma média de todas as resistividades verdadeiras de um volume de material em subsuperficie relativamente grande, denominada de resistividade aparente (ρ_a).

Segundo Rhoades et al. (1999), um volume do solo com condutividade elétrica pode ser medido usando quatro eletrodos cravados no solo, uma combinação corrente elétrica gerador/resistividade ou condutância, e um cabo conector. Neste tipo de equipamento a profundidade e volume de medidas podem ser variáveis pela mudança de espaçamento entre os eletrodos. Quando a distância entre os pares externos de eletrodos (eletrodos de corrente) é pequena o fluxo de eletricidade é mais raso do que se a distancia for grande. A profundidade efetiva de medida é em torno de um terço da distância entre eletrodos de corrente.

As propriedades elétricas podem ser examinadas por três técnicas: sondagem elétrica vertical (SEV), e caminhamento elétrico (CE) e perfilagem elétrica(PERF). A primeira consiste de uma sucessão de medidas de condutividade aparente obtidas com a separação dos eletrodos sempre crescente, permanecendo fixo o centro da configuração e sua orientação para investigação pontual da variação de um parâmetro físico com a profundidade. No caso do caminhamento, o arranjo, mantido com separação pré-fixada, é deslocado sobre a superfície do terreno para investigações laterais das variações de um parâmetro físico, a uma ou várias profundidades determinadas (Telford et al., 1990).

Uma grande variedade de arranjos geométricos tem sido utilizada para medir resistividade, sendo os mais comuns os arranjos colineares simétricos de Schlumberger e de Wenner para a sondagem elétrica vertical e arranjo dipolo-dipolo para o caminhamento elétrico.

O arranjo Schlumberger é muito utilizado no Brasil, sendo considerado superior em praticidade e qualidade de resultados por haver deslocamento apenas de dois eletrodos, ser menos sujeito a interferências por ruídos indesejáveis e menos sujeito a erros interpretativos devido a heterogeneidade lateral. A idéia básica desse arranjo é fazer com que a distancia que separa os eletrodos M e N tenda a zero em relação a distância crescente entre A e B. Visando minimizar os erros de medição adota-se a relação MN menor ou igual a AB/5. A cargabilidade aparente é obtida diretamente no equipamento geofísico.

A interpretação dos dados de resistividade, para modelos de camadas horizontalmente estratificadas, é feita predominantemente por um procedimento interativo de inversão. A primeira etapa consiste em obter um modelo inicial. Estes parâmetros iniciais são fornecidos ao processo de inversão automática. Após a inversão, os parâmetros finais resultantes são usados para computar a curva teórica do modelo de melhor ajuste aos dados experimentais. Qualquer que seja o método de interpretação utilizado para obtenção do modelo geoelétricos a partir da curva de resistividade aparente observada, ele terá não somente de oferecer um bom ajuste entre a curva de campo e a curva teórica derivada, mas também de fornecer um modelo geoelétricos que concorde com as informações geológicas que se tenha da área. Isto porque, na maioria dos casos, as curvas de campo admitem muitas soluções, de modo que se deve escolher dentro das margens de variações possíveis para a interpretação das sondagens, o conjunto de soluções individuais que tenha maior probabilidade de representar a verdadeira estrutura da zona estudada.

Diante deste fato, os métodos de interpretação estão sujeitos a fornecerem interpretações formalmente corretas para as curvas de campo, mas que necessitam ser ajustadas através de informações da geologia local para que represente efetivamente a estrutura investigada (Monteiro, 1999).

.

3 – ÁREA DE ESTUDO

A BHEC estudada, com área de 20,53 km², está localizada aproximadamente no centro do quadrilátero compreendido entre as coordenadas 11º e 12º (Latitude Sul) e 39º e 40º (Longitude Oeste). A área pertence ao município de São Domingos, distante cerca de 250 km de Salvador. Esta bacia coincide com a área de drenagem do barramento de terra no riacho do Cedro, conhecido como Açude São Domingos. Os cursos d'água estudados estão situados no trecho médio da bacia hidrográfica do Rio Jacuípe, afluente do rio Paraguaçu. A área de estudo engloba ainda dois açudes de pequeno porte (açude Nenenzinho e açude de Flori), onde foram concentradas as sondagens geoelétricas.

A descrição da geologia aqui apresentada tem como base as informações obtidas na Folha Gavião (SC.24-Y-D-II) de escala 1:100.000, elaborada pela CPRM (1990). De acordo com este trabalho, a área em estudo está situada sobre o Complexo Caraíba (unidade Riachão do Jacuípe) e Ipirá (unidade Pintadas e Juazeirinho), com idade geológica do proterozóico inferior, conforme apresentado na Figura 1.

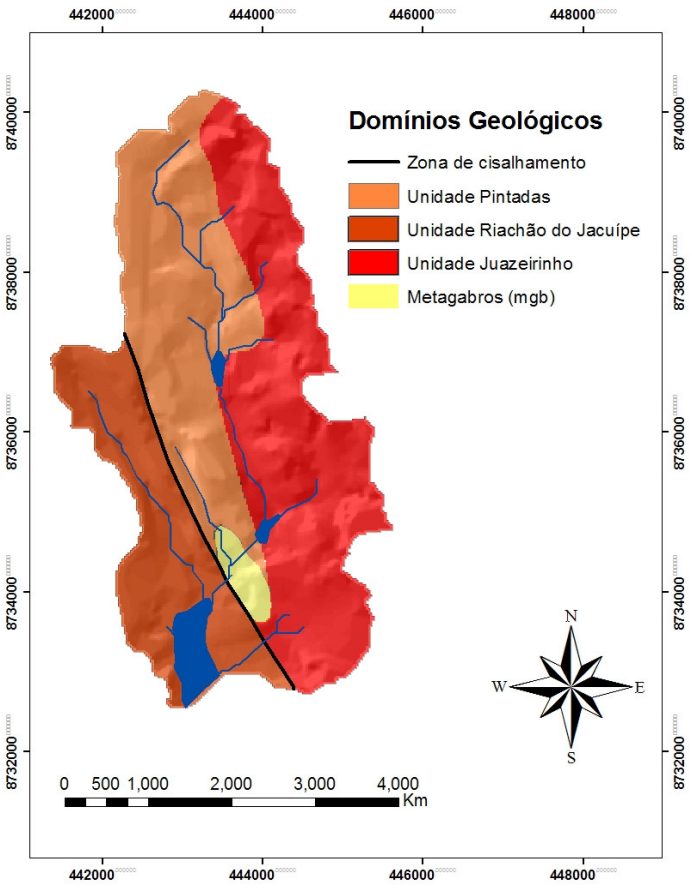

Figura 1: Geologia

Do Complexo Caraíba está presente a unidades geológica Riachão do Jacuípe com suíte bimodal localmente migmatizada constituída por uma parte felsica de composição tonalitica-trondhjemítica-granodiorítica, e outra máfica, de composição diorítica a gabronorítica. Apresentam paragêneses minerais indicativas de reequilíbrio na fácies granulito – hiperstênio, clinopiroxênio, hornblenda (oliva), biotita (titanífera), plagioclásio (antipertita), quartzo – onde o hiperstênio exibe feições de equilíbrio com a hornblenda e a biotita, segundo Melo et al. (1992).

Do complexo Ipirá estão presentes as unidades geológicas Pintadas e Juazeirinho. A unidade Pintadas apresenta rochas de associação de gnaisses bandados, gnaisses kinzigíticos, formação ferrífera, rochas calcissilicáticas, mármore, xistos grafitosos, metabasitos, metavulcânicas e chert vulcânico. Apresenta ainda seqüência vulcano-quimica-sedimentar de fundo oceânico e talude continental. A unidade Juazeirinho apresenta gnaisses bandados e rochas calcissilicáticas subordinadas. Foi diferenciado na área a ocorrência de metagabro (mgb), correspondentes a domos que lhe são intrusivos. O complexo Ipirá, segundo Melo et al. (1992), são rochas plutônicas de composição geralmente monzogranítica, de coloração rósea e cinzenta, constituídas por quartzo, K-feldspato, plagioclásio, biotita e muscovita, além de sillimanita, granada e cordierita, onde os dois últimos minerais nem sempre estão presentes.

Os principais tipos de solo encontrados na área de estudo com as suas respectivas áreas de ocorrência estão apresentados na Figura 2.

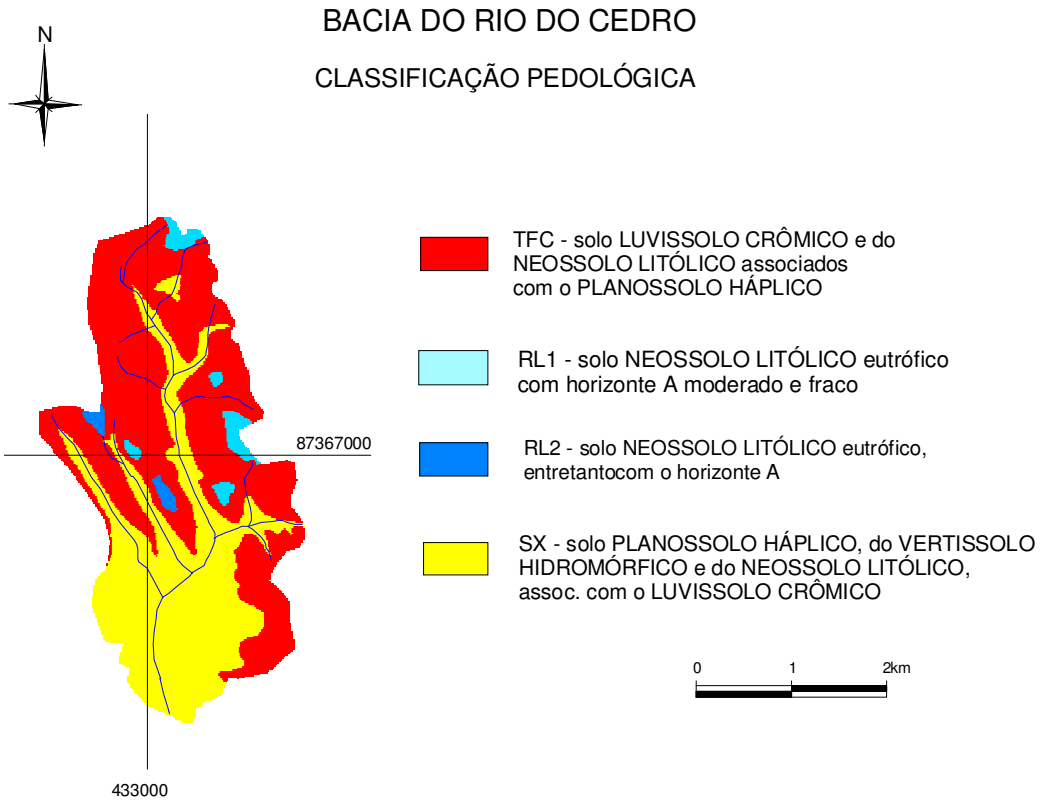

Figura 2: Solo

Segundo estudo dos solos da bacia experimental realizado por Oliveira (2005), a classificação textural apresentada dos solos foi franco-argilo-arenosa, indicando teores de argila entre 16 e 35%, constituindo-se em solos de textura média. No entanto, houve amostras de texturas mais arenosas (3 amostras) com teores de argila próximos a 12% que ocorreu principalmente nas camadas superficiais dos solos, e também texturas mais argilosas (4 amostras) com teores de argila próximos a 40%, observados em camadas subsuperficiais.

O cálcio é o cátion trocável mais abundante nos solos analisados, sendo observada uma tendência de aumento nos teores médios de cálcio no sentido montante-jusante. O segundo cátion que apresentou maior abundância foi o magnésio e o potássio foi o cátion que apresentou os menores teores, com exceção do alumínio que foi nulo em todas as amostras analisadas. A localização das amostras está apresentada na Figura 3 (OLIVEIRA, 2005).

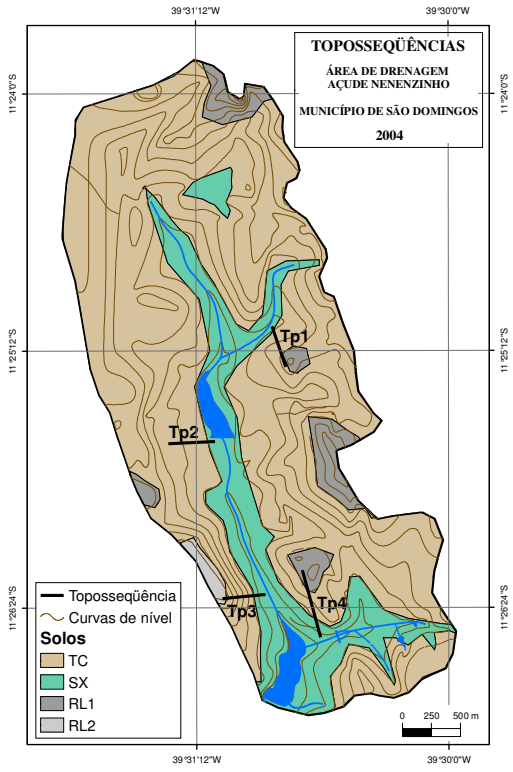

Figura 3: Mapa de localização das amostras (Oliveira, 2005)

O sódio apresentou maiores teores no solo nas proximidades do açude de Nenenzinho, na parte oeste da bacia experimental (Tp2).

Oliveira (2005) realizou ainda ensaios referentes aos sais solúveis, sendo determinadas as concentrações dos íons cálcio, magnésio, potássio, sódio, bicarbonato e cloreto, bem como a condutividade elétrica no extrato de saturação a 25°C. As concentrações médias de cálcio apresentaram uma tendência de aumento no sentido montante-jusante da área de drenagem, sendo o menor valor igual a 2,67mE.L-1 obtido na Tp2 e o maior 4,93mE.L-1 na Tp4. Os valores das

concentrações médias do magnésio indicaram uniformidade deste elemento na área de estudo, sendo sua concentração média igual a 1,46mE.L-1.

As concentrações de potássio foram as menores observadas, sendo a sua média igual a 0,45mE.L-1, Comparando-se as concentrações dos solos amostrados, observou-se uma tendência de redução no sentido montante-jusante, a Tp1 apresentou o maior valor 0,74mE.L-1, na Tp2 obteve-se 0,37mE.L-1, na Tp3 0,46mE.L-1 e na Tp4 média de 0,21mE.L-1.

Dentre os cátions solúveis, o sódio foi o elemento que apresentou a maior média de concentração igual a 4,17mE.L-1. Ao comparar os valores médios de concentração de sódio entre as toposseqüências estudadas, Oliveira (2005) verificou-se uma tendência de aumento no sentido montante-jusante da área de drenagem, apresentando as seguintes médias de concentração: Tp1 igual a 1,67mE.L-1, Tp2 igual a 4,54mE.L-1, Tp3 3,57 mE.L-1 e Tp4 igual a 6,99mE.L-1.

O cloreto foi o ânion que apresentou as maiores concentrações médias na área em estudo. Sua concentração média foi de 7,14mE.L-1, a camada superficial apresentou média de 5,22mE.L-1 e a camada subsuperficial de 12,78mE.L-1. A concentração de cloreto aumentou por volta de 240% da toposseqüência Tp1 (4,64mE.L-1) para a Tp4 (11,05mE.L-1), indicando um aumento efetivo à medida que se aproxima das partes mais baixas da área de drenagem na Tp2 a concentração média foi de 6,65mE.L-1 e na Tp3 de 6,36mE.L-1.

As concentrações médias observadas no bicarbonato não apresentaram diferenças tão relevantes quanto às do cloreto, com concentração média de 2,42mE.L-1.

Individualmente merece destaque a camada subsuperficial da amostra Tp4, por ter apresentado o maior valor de CEe (4,815dS.m-1), resultado da concentração elevada de sais solúveis (52,61mE.L-1), classificando o solo como salino.

Com relação à área de drenagem, observou-se que há um aumento de concentração de sais no sentido montante-jusante, principalmente com relação aos sais solúveis; isto ocorre devido à associação dos transportes laterais e superficiais que vão reduzindo à medida que alcançam as partes baixas da área de drenagem, dadas às condições topográficas e as propriedades físicas dos solos.

Com os resultados obtidos Oliveira (2005) conclui que, para a bacia experimental, pode-se esperar que os primeiros escoamentos superficiais que chegam ao açude no momento das cheias apresentem melhor qualidade de suas águas. Ao contrário, os escoamentos que chegam posteriormente, depois das cheias incorporarem águas infiltradas em camadas mais profundas, apresentam pior qualidade de suas águas.

É interessante observar que os teores obtidos nos sedimentos do fundo dos açudes apresentam proporcionalidade aos teores médios dos solos compreendidos em suas respectivas áreas de drenagem. Ou seja, os íons que apresentaram maiores teores e concentrações nos solos analisados,

também apresentaram nos solos do fundo dos açudes, havendo uma relativa elevação quanto às concentrações de sódio e cloreto, devido ao poder conservativo que estes apresentam.

A vegetação natural predominante na área do município de São Domingos é a caatinga, composta por espécies xerófilas, algumas das quais são cactáceas. O solo apresenta alto grau de degradação, devido ao desmatamento para utilização da vegetação como alimento dos animais e para plantação de palma e sisal.

O período da amostragem (junho de 2007) foi caracterizado por chuvas de baixa intensidade, após períodos das chuvas intensas ocorridas em fevereiro de 2007 que geraram escoamentos suficientes para renovar completamente as águas dos dois açudes e lavar os solos da área de drenagem. Dessa forma os solos próximos às margens dos açudes encontravam saturados.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a contribuição do solo no processo de salinização as águas dos açudes na região semi-árida por meio da utilização de métodos geoelétricos foi utilizada a técnica de sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger e identificação da variação da condutividade com a profundidade em 9 pontos localizados as margens do açude Nenenzinho e 3 pontos nas margens do Flori. Foi definido mais pontos no primeiro açude devido às altas taxas de salinidade encontrada na água, o que não ocorre no açude de Flori (Figura 4).

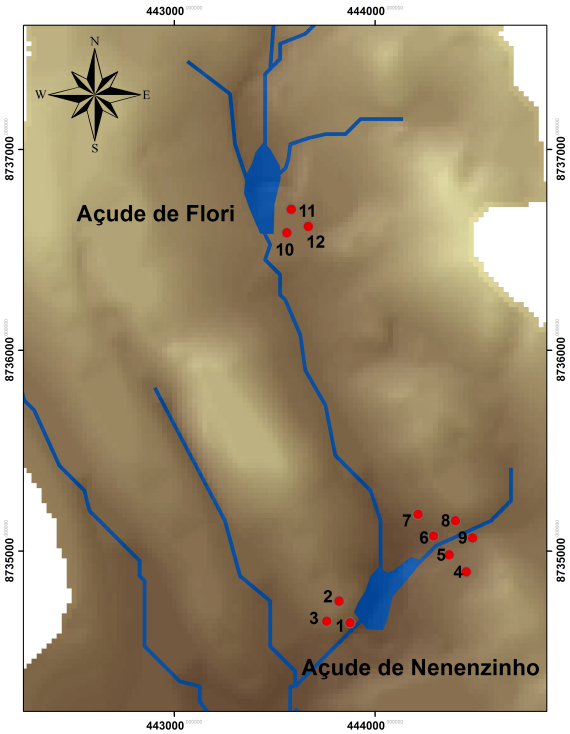

Figura 4: Pontos de sondagem

Os pontos foram selecionados o mais próximo possível dos açudes para garantir um nível de saturação do solo necessária para a adequada aplicação da metodologia. Para estudo da salinidade presente no solo foi definido um espaçamento máximo de 100 metros, uma vez que o interesse do presente trabalho é em profundidades rasas. Esses espaçamentos (AB) variaram de 40 a 100 a depender do acesso para esticar os fios. Esse valor garante uma sondagem adequada para profundidades na ordem de AB/4, definida como profundidade teórica investigada. Na tabela abaixo é apresentada a localização das sondagens e parâmetros do arranjo.

Tabela 1: Espaçamentos das sondagens elétricas verticais

Sondagem	Açude	AB/2 máximo (m)
1	Nenenzinho	20
2	Nenenzinho	40
3	Nenenzinho	30
4	Nenenzinho	25
5	Nenenzinho	50
6	Nenenzinho	50
7	Nenenzinho	50
8	Nenenzinho	30
9	Nenenzinho	30
10	Flori	50
11	Flori	50
12	Flori	50

O instrumento utilizado para a execução das Sondagens Elétricas Verticais (SEV) e aquisição dos dados de resistividade (ρa) e polarizibilidade aparente (ma) foi o sistema Syscal R-2 fabricado pela Iris Instruments, o qual apresenta potência máxima de 250 W. O Syscal é alimentado por uma bateria de 12 V, acoplada a um conversor de voltagem DC-DC e opera em corrente contínua medindo, simultaneamente, a resistividade, o potencial espontâneo e o efeito de polarização induzida no domínio do tempo. No Syscal a compensação do potencial espontâneo e a redução dos ruídos naturais ou artificiais é realizada por meio de reversões na polaridade da corrente.

Figura 5: Sistema Syscal R-2

Foi realizada uma sucessão de medidas de resistividade aparente obtidas com a separação dos eletrodos sempre crescente, permanecendo fixo o centro da configuração num arranjo Schlumberger. Os eletrodos A e B foram afastados até ser atingido o limite de precisão instrumental do sistema utilizado com a diminuição do sinal recebido (medida de campo) e conseqüente perda de precisão da leitura. Quando esse limite é atingido utiliza-se repetir a medida da resistividade em alguns pontos com dois valores de MN (leituras de recobrimento), para um mesmo valor de AB/2. Este procedimento permite descobrir e às vezes corrigir efeitos de heterogeneidades superficiais que ocorrem quando há troca na posição de MN, conhecido como embreagem.

Os valores de resistividade aparente foram plotados num papel log-log para acompanhamento das leituras realizadas e sua consistência.

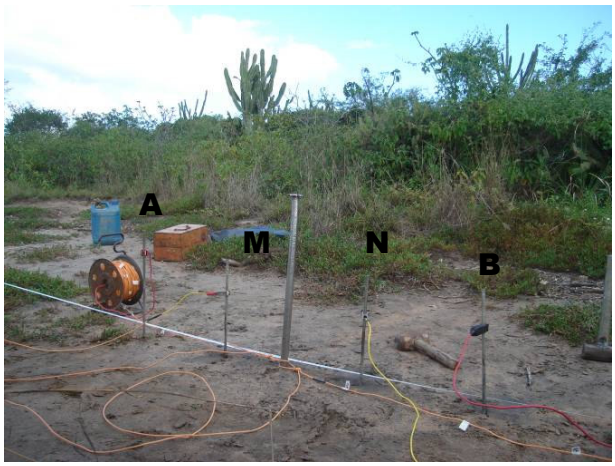

Figura 6: Sistema Syscal R-2

A interpretação dos dados de resistividade, para modelos de camadas horizontais, é feita predominantemente por um procedimento interativo de inversão, sendo a primeira etapa a obtenção de um modelo inicial. Após a inversão, os parâmetros resultantes são usados para definir a curva teórica do modelo de melhor ajuste aos dados experimentais. O método de interpretação utilizado para obtenção do modelo geoelétricos a partir da curva de resistividade aparente obtida com as observações terá que oferecer um bom ajuste entre a curva de campo e a curva teórica derivada e, também, fornecer um modelo geoelétricos que concorde com as características geológicas da área. Isto deve ser observado uma vez que as curvas de campo admitem muitas soluções, devendo ser escolhido o conjunto de soluções individuais que apresente consistência ao representar a estrutura da zona estudada dentro das margens de variações aceitáveis para a interpretação das sondagens.

Os métodos de interpretação estão sujeitos a fornecerem interpretações teoricamente corretas para as curvas de campo, mas que necessitam ser ajustadas através de informações da geologia local para que represente a estrutura investigada.

Para a inversão dos dados e interpretação dos resultados obtidos com as sondagens elétricas foi utilizado o programa computacional Modelo Res1D (M.H.Loke, 2001).

As etapas para inversão do conjunto de dados compreendem na entrada de dados relativo aos valores da resistividade aparente, na modificação dos parâmetros da inversão se necessário e obtenção da inversão. Os valores da resistividade aparente são plotados num gráfico log-log. O objetivo da inversão é determinar a espessura e resistividade das camadas de um modelo unidirecional que represente o subsolo local. O método usado nesse programa é o método dos mínimos quadrados, onde um modelo inicial é fornecido e uma subrotina de otimização modifica a espessura e resistividade das camadas até reduzir a diferença entre o calculado e os valores de resistividade aparente. Para o presente trabalho não foi fornecido modelo inicial, sendo utilizada a inversão automática com modelo sugerido pelo programa.

Para comparação e avaliação dos resultados da sondagem geoelétrica foram medidas as condutividades das águas armazenadas nos dois açudes no mesmo período.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o estudo da salinidade do solo na bacia experimental do rio do Cedro foram realizadas doze sondagens com os resultados apresentados a seguir. Cabe ressaltar que o objetivo não é definir o modelo geoelétrico da área de estudo, e sim identificar a salinidade presente no solo que indique a contribuição desse elemento no processo de salinização das águas armazenadas nos açudes.

Dessa forma a interpretação dos resultados limitou-se a identificação da resistividade nas camadas mais superficiais (até 0,5m) e comparação com a condutividade das águas armazenadas no mesmo período.

Os resultados da análise da água armazenada nos reservatórios estão apresentados na Tabela abaixo.

Código	LOCALIDADE	3/6/2007	
		T (°C)	cond (µS/cm)
BE_2	Açude Nenenzinho	26,0	1.594,0
BE_1	Açude Flori	26,0	180,0

Os resultados das sondagens feitas no açude da bacia experimental estão apresentados nas figuras a seguir. Para a análise do comportamento do solo nas margens do açude serão avaliados os valores de condutividade para as camadas mais rasas, as quais interferem na salinização dos açudes na ocorrência de eventos chuvosos que carreiam os sais. Na margem esquerda do açude de Nenenzinho, as sondagens 1 e 2, realizadas em solo saturado apresentaram resistividades baixas, próximas a 1 Ωm, sendo a camada até 0,5 m a mais salgada. Camadas mais profundas apresentam

resistividades maiores que 10 Ωm, indicando a presença de rochas. Na sondagem 3, ralizada em solo menos saturado e a um nível mais alto, a resistividade apresentou-se maiores que 100 Ωm.

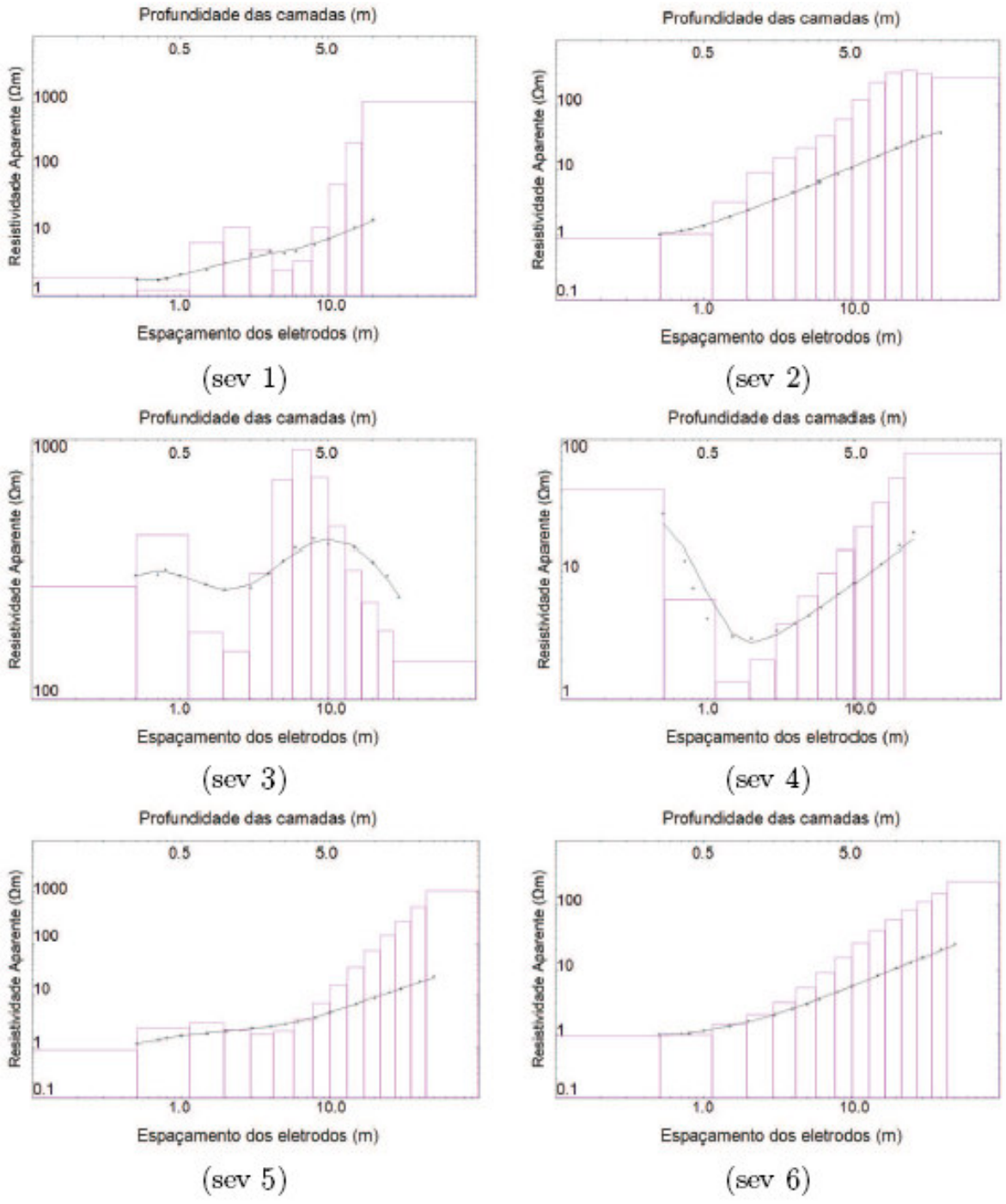

Figura 7: Resultados das sondagens elétricas feitas nos açudes da bacia experimental - SEV 1 a SEV 6

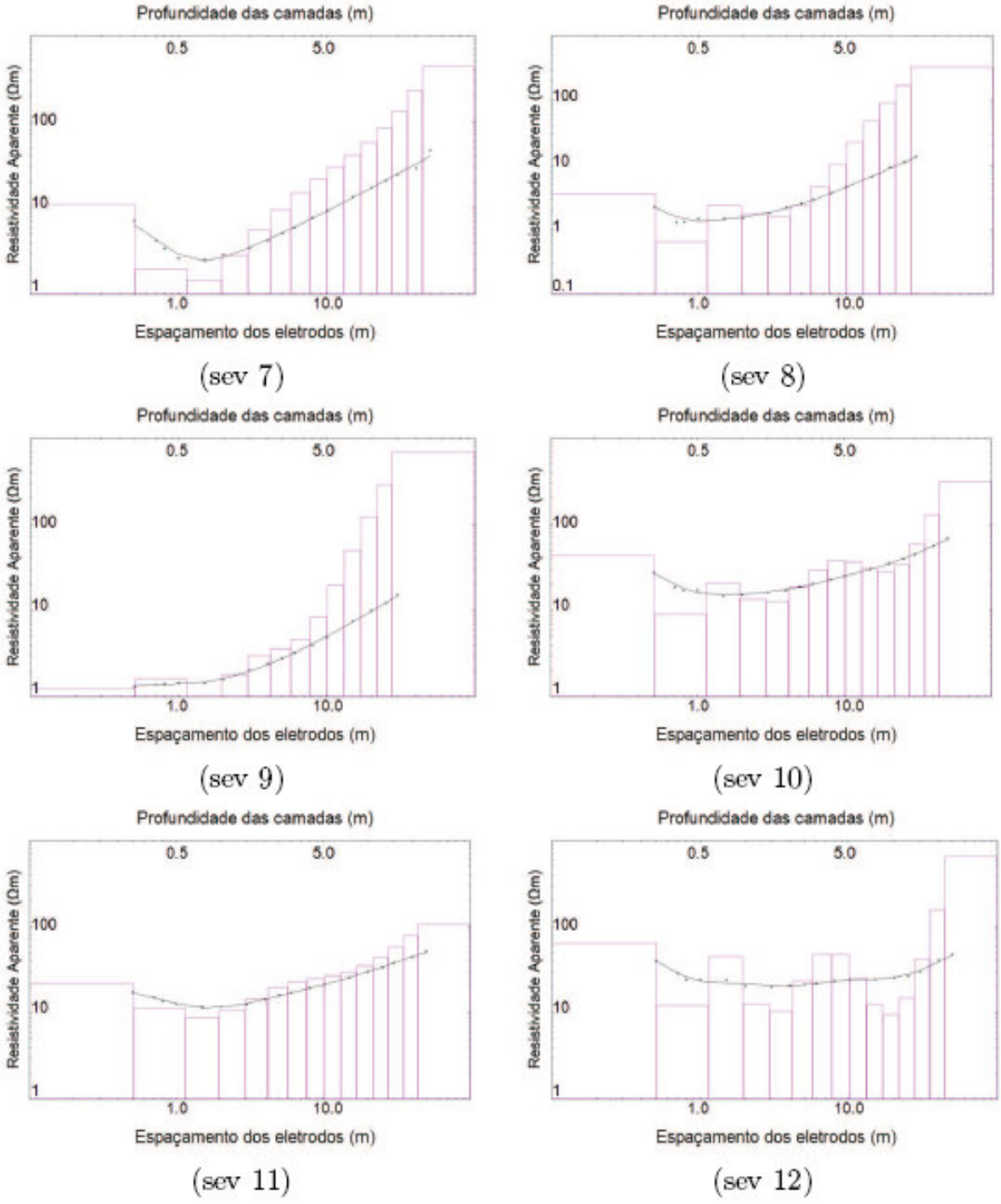

Figura 8: Resultados das sondagens elétricas feitas nos açudes da bacia experimental - SEV 7 a SEV 12

Na margem direita do açude de Nenenzinho, onde este recebe a contribuição de um afluente efêmero do rio do Cedro, as sondagens que foram realizadas transversalmente ao leito seco desse riacho apresentaram as resistividades aumentando a medida que as sondagens foram sendo realizadas mais próximas ao leito do afluente. Na sondagem 4, percebe-se que camadas mais

profundas, em torno de 0,5 a 1 m apresentam concentrações mais altas de sais (resistividades próximas a 1 Ωm). Na sondagem 5, localizada em cota mais baixa, a camada identificada como mais salgada se encontra a já na superfície, permanecendo com valores próximos a 1 Ωm até profundidades na ordem de 3 m. Comportamento semelhante é encontrado para a sondagem 6 que está localizada próxima a margem direita do leito do afluente. Essas duas últimas sondagens possuíam solos totalmente saturados. A sondagem 7 assume o comportamento da sondagem 4, coerente com sua localização em cotas mais altas, se afastando do leito do afluente.

A sondagens 8 e 9 realizadas também próximas ao leito do afluente em uma seção transversao mais a montante revelam os mesmo comportamento salgado a profundidades próximas a 0,5 m.

Com esses valores pode-se estimar, pela equação abaixo, a resistividade da água de saturação e seu inverso, a condutividade, embasando a análise do potencial do solo, em suas camadas mais com profundidades em torno de 0,5 m, como contribuinte da salinização das águas superficiais da região.

$$1/\rho_r = (S_w V_{arg}) / \rho_{arg} + S_w^n \varphi^{m/a} \rho_w$$

onde é considerado como valor médio para ρ_r 1 Ωm, para S_w 100%, para φ 0,37 (OLIVEIRA, 2005), para V_{arg} 0,40 (OLIVEIRA, 2005) e para ρ_{arg} é considerado valor próximo a do solo (1 Ωm), uma vez que segundo Oliveira (2005) nessa área foram encontradas solos salinos. Para os coeficientes n e m é considerado respectivamente os valores de 2 e 1,8 e para a o valor 1.

Aplicando esses valores na equação tem-se uma condutividade da água de saturação na ordem de 35.900 μS/cm, indicando uma alta fonte de salinização do açude Nenenzinho.

Esse valor está coerente com valores encontrados para as águas desse açude no ano de 2003, ano mais seco depois da implantação da bacia experimental, quando os açudes secaram completamente (32.300 μS/cm em 10/07/2003; 35.400 μS/cm em 23/08/2003 e 55.000 μS/cm em 07/10/2003 (OLIVEIRA, 2005)).

Para o açude de Flori, as sondagens 10 e 11, mais próximas ao lago e com o solo totalmente saturado, apresentaram resistividades na camada próxima a 0,5 m de 10 Ωm, indicando solos de baixo teor de sais. Para a sondagem 12, localizada em cota maior o comportamento foi semelhante, sem o acréscimo gradativo da resistividade com a profundidade, observada nas duas outras sondagens.

Com esses valores estimou-se a resistividade da água de saturação e seu inverso, a condutividade, utilizando como valor médio para ρ_r 10 Ωm, para S_w 100%, para φ 0,35 (OLIVEIRA, 2005), para V_{arg} 0,47 (OLIVEIRA, 2005) e para ρ_{arg} é considerado valor próximo a do solo (10 Ωm), uma vez que segundo Oliveira (2005) nessa área foram encontradas solos com as

mais baixas concentrações do sais entre as amostras analisadas. Para os coeficientes n e m é considerado respectivamente os valores de 2 e 1,8 e para ***a*** o valor 1.

Aplicando esses valores na equação tem-se uma condutividade da água de saturação na ordem de 3.500 μS/cm, indicando uma fonte de salinização 10 vezes menor que o encontrado próximo ao açude Nenenzinho.

Esses valores estão compatíveis com a análise da água na região que apresentava uma condutividade na ordem de 10 vezes maior para as águas do açude de Nenenzinho (1594 μS/cm) em relação as águas do açude de Flori (180 μS/cm).

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados mostram que há uma salinidade elevada no solo próximo ao açude de Nenenzinho, indicando um aporte significativo de sais para as águas armazenadas. Esse fato não ocorre para o açude de Flori, onde o solo de sua margem é na ordem de 10 vezes menos condutivo do que os solos das margens do açude de Nenenzinho.

Os valores de Oliveira (2005) estão abaixo do encontrado nas sondagens isso ocorre devido à localização dos pontos analisados. O presente trabalho investigou pontos mais próximos dos açudes e as profundidades avaliadas são mais profundas, identificando as camadas próximas a 0,5 m de profundidade como as mais salgadas. Os métodos elétricos permitem uma avaliação de camadas subsuperficiais, confirmando a conclusão de Oliveira (2005) que na camada mais baixa a salinização é mais intensa e as primeiras chuvas a qualidade é melhor e depois as que infiltram trás mais aporte de sais.

Conclui-se que o potencial do solo é significativo como contribuinte de sais, ou seja, guarda grandes quantidades de sais disponíveis para serem carreados para as águas superficiais das bacias do semi-árido nordestino.

BIBLIOGRAFIA

LOKE, M. (2001) Res1d ver. 1.0 for windows. inversion and forward modeling. Wenner and Schlumberger Arrays, Rel. Téc.

MELO, R.; LOUREIRO, H. E PEREIRA, L. (1995) Programa levantamento geológicos básicos do Brasil, Serrinha. Folha sc. 24-y-d. Estado da Bahia., Rel. Téc., DNPM/CPRM.

Monteiro, A. C. (1999) Eletrorresistividade Aplicada na Avaliação do Potencial Aquífero da Região de Porto Seguro, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

OLIVEIRA, J. (2005) Estudo da contribuição potencial do solo no processo de salinização de águas superficiais em uma pequena bacia hidrográfica do semi-árido baiano, Dissertação de mestrado. Mestrado em engenharia ambiental urbana, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

PARASNIS, D. S. (1997) Principles of Applied Geophysics, Chapman e Hall, London.

RHOADES, J.; CHANDUVI, L. E LESCH, F. (1999) Soil salinity assessment. methods and interpretation of electrical conductivity measurements. Irrigation and drainage paper 57, Rel. Téc., FAO.

SANTOS, C.P.L. DOS (2003) Analise Geofísica das Características Hidráulicas da Falha de Salvador na Região de Arembepe-Ba. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia,.Salvador, Brasil.

SILVEIRA, J. J. (1991) Dinâmica de Sedimentação em um Mar Raso Antigo-Formações Caboclo e Morro do Chapéu-(Proterozóico Médio)-Grupo Chapada Diamantina-Estado da Bahia, Dissertação de mestrado. mestrado em geologia, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

TEIXEIRA, L. (1991) Programa de levantamento básico do Brasil. Pintadas. folha sc. 24-y-d-v. Estado da Bahia. 2 mapas. capítulo 5-geoquímica, Rel. Téc., DNPM/CPRM.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. E KEYS, D. A. (1990) Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.

WARD, S. H. (1967) The electromagnetic method, In: *Mining Geophysics*, vol. II, cap. 2, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

WARD, S. H. (1990) Resistivity and induced polarization methods, In: S. H. Ward, ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. II, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa-Oklahoma, 2a edic.