



Mapas de isorresistividades elétricas aparentes do solo superficial de Manaus

Nilton de Souza Campelo¹, José Tadeu Alkmin², Fernando César Rodrigues Souza², Aurélio Calheiros de Mello Jr.², Lucas Carvalho Cordeiro², Diógenes dos Santos Paz Jr.², Aroldo Figueiredo Aragão¹, Elaine Carvalho da Paz¹ & João da Silva Carvalho¹

¹ - Núcleo de Tecnologia de Materiais - NUTEMA; ² - Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico - CDEAM. Universidade Federal do Amazonas, Av. Gen. Rodrigo Otávio Jordão, 3000 - Coroado - CEP 69.077-000, Manaus, AM. Tel./Fax (92) 647-4340. ncampelo@ufam.edu.br

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Vertical electric surveys (VES) were performed in the city of Manaus in order to allow the elaboration of maps of apparent electric resistivity of the superficial soil. Several interpolation methods of electric resistivity were studied, however, only two methods will be approached here. When the complete or total series of values of field measured resistivity was used, then the resulting curves indicated high values of interpolated resistivity, not respecting the original entrance data. To the opposite, when it proceed to the statistical analysis of the data, being despised those values whose frequencies were inferior to two, in classes intervals of 100 m, then the resulting maps became much more trustworthy to the measured values, with smoothness in the contour lines of the curves.

Introduction

No perímetro urbano da cidade de Manaus, foram realizadas 138 medições de resistividade elétrica aparente do solo, com o fito de se dimensionar conjuntos de aterramento elétrico, para proteção de sistemas de distribuição elétrica. Cada local de medição foi devidamente georreferenciado, sendo posteriormente inserido em um mapa-base da cidade (IMPLAN e CPRM, 1996), procurando-se uniformizar as distribuições espaciais dos pontos medidos. No mapa base, há 15 quadriculas, sendo que duas delas (números 3 e 15) correspondem à porção do rio Negro, e, certamente, não podem apresentar valores de medições de resistividade elétrica do solo. A partir da introdução da localização geográfica e do valor da resistividade do solo, utilizou-se o programa computacional Surfer (Surfer, 2002) para a determinação das curvas de igual valor desta variável física, intentando-se conhecer a sua distribuição quantitativa ao longo da área da zona urbana de Manaus, resultando em facilidade e rapidez de dimensionamento de sistemas de aterramento. O delineamento das curvas e as implicações resultantes serão abordados nos tópicos posteriores.

A área urbana de Manaus possui 11.458,5 km² (Informe Geo, 2002), localizando-se dentro da Bacia Sedimentar do Amazonas, que compreende uma área de 500.000 km². A Bacia Sedimentar é intracratônica, apresentando 6.000 m de preenchimento sedimentar (Cunha *et al.*, 1994). As unidades litológicas do Cretáceo, Mioceno e Holoceno formam o quadro geológico regional. De acordo com Dino *et al.* (1999), a Formação Alter do Chão representa a unidade do Cretáceo, compreendendo sedimentos continentais vermelhos (arenitos argilosos, argilitos, quartzos grauvascas, quartzos arenitos e brechas intraformacionais). Os depósitos aluvionares expostos ao longo dos rios e igarapés da região representam a unidade Holocênica. A Formação Alter do Chão apresenta ainda níveis de intensa silicificação, designada por Albuquerque (1922) como Arenito Manaus. Esta Formação predomina na região de Manaus. Os sedimentos foram depositados em ambientes continental aquoso, com significativa contribuição flúvio-lacustrina em processo de imersão não profunda (Caputo *et al.*; 1972). Tratam-se de depósitos descontínuos, apresentando brusca variação litológica vertical e distribuição espacial irregular, caracterizando variações nos ambientes de deposição dos mesmos. O estudo realizado por Fernandes Filho *et al.* (1997), nas unidades informais sobrepostas na cidade de Manaus (Formação Alter do Chão), definiu na região perfis lateríticos do tipo imaturo, observando tanto perfis autóctones (completo), como os alóctones (linhas de pedra). Ademais, a cidade está assentada sobre depósitos Neocretáceos da Formação Alter do Chão, composta por sedimentos incosolidados de arenitos, conglomerados e argilitos de origem fluvial. Tais sedimentos apresentam-se fortemente falhados, cuja característica mais marcante dá-se pelo contraste dos sedimentos arenosos e/ou argilosos de coloração esbranquiçada dessa Formação, com o solo amarelado, realçando tais estruturas. Outra ocorrência marcante é a existência de concreções lateríticas que aparecem constantemente deslocadas.

Method

Cada local de medição foi escolhido para resultar em distribuições espaciais equidistantes, contudo, isto nem sempre foi possível, uma vez que as áreas do centro da cidade e algumas da periferia são urbanizadas por calçamento, descartando-se, assim, a possibilidade de se cravar os eletrodos no interior do solo. O método utilizado em todas as medições foi o de Schlumberger, pela sua simplicidade e rapidez. O equipamento empregado foi o

resistivímetro Syscal Jr, com potência de 24 W. Ressalte-se que, quando possível, foram feitas medições com abertura de malha de até 300 m, a fim de se conhecer a profundidade do nível d'água subterrâneo e do topo rochoso (arenito Manaus). De uma maneira geral, a maior parte das medições ficou compreendida no intervalo de 30 m a 50 m de abertura de malha, uma vez que o projeto de sistemas de aterramento é, por sua própria natureza, quase sempre de profundidade rasa. Cada local de medição foi então catalogado e introduzido no mapa-base da cidade de Manaus (IMPLAN e CPRM, 1996). Devido ao fato de que as dimensões do mapa não permitem sua apresentação neste trabalho, criou-se então um mapa georreferenciado, composto de quadrículas com numeração e coordenadas (utm) das mesmas do mapa-base original. Neste trabalho, são apresentados os mapas produzidos cuja variação de profundidade de abertura de malha está na faixa de um a três metros. A Figura 1 ilustra o mapa, conforme a numeração das quadrículas do mapa-base.

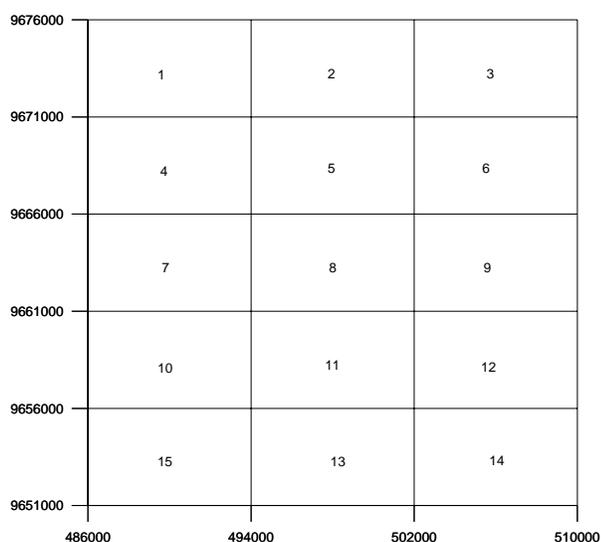


Figura 1 – Mapa-base da cidade de Manaus, dividido em quadrículas.

Deve-se atentar, ademais, para o problema que as quadrículas 3 e 15 não possuem dados de entrada originais, por indicarem porção do rio Negro. É relevante também relatar que as medições nas áreas do centro da cidade ficaram bastante dispersas (quadrículas 1, 2 e 4), pelas razões já relatadas, fruto da completa urbanização de passeios e vias. Como os pontos de medição eram isolados e dado que a área era reduzida para a realização das medições, não se empregou o método de caminhamento nas leituras das resistividades elétricas do solo. As análises das estratificações das camadas de resistividade foram feitas a partir do programa computacional Resix (Resix, 2000). Com os valores definidos das resistividades elétricas, para várias profundidades, foi possível então utilizar os métodos de interpolação, com o fito de se obter a distribuição estatística das resistividades, em função dos seus

valores (pesos) e das suas posições (localizações) nos mapas. Ao todo, foram utilizados onze métodos de interpolação, contudo, por brevidade, aqui far-se-á menção apenas a dois deles, a saber: polinômio local e regressão polinomial. Dois outros métodos foram apresentados anteriormente (Campelo *et al.*, 2004). Os métodos de cálculo procuram fazer as interpolações entre os nós das grades ou malhas, que dependem, por sua vez, dos valores das próprias resistividades e da distância dos pontos aos nós. Cada método pode resultar em representações diferentes dos dados. É vantajoso testar cada método, para determinar qual o que conduz a resultados mais satisfatórios. De uma forma geral, adotou-se uma grade com 2.000 linhas x 2.000 colunas. Em adição, não obstante o fato de que a série completa de dados emprega *todos* os valores de resistividade, mesmo aqueles excepcionalmente elevados (como o caso de algumas medições de 28.000 Ωm), procurou-se mostrar nas figuras apenas os valores interpolados até 5.000 Ωm , com o objetivo de não sobrecarregar o mapa com valores tão dispersos, em relação ao universo representativo da série de dados de entrada original. Ademais, pelo fato de que a série completa sobrelevou demasiadamente os valores interpolados, procedeu-se ao estudo estatístico dos dados, separando-os por classes de valores, em intervalos de 100 Ωm , isto é, pela frequência com que os dados aparecem em cada classe. Assim, eliminaram-se aqueles intervalos que porventura apresentassem frequência menor que dois. Deste modo, as séries de dados alcançaram até o valor limite de 3.000 Ωm . Este procedimento melhorou sobremaneira a forma e os valores das curvas de isorresistividades elétricas, como poderá ser visto adiante.

Results

As Figuras 2 a 4 mostram as interpolações obtidas a partir do emprego do método de polinômio local, para as aberturas de malha de um a três metros, utilizando-se a série de dados completa, ou seja, sem exclusão de qualquer valor de resistividade elétrica. Percebe-se as duas áreas hachuradas (porções do rio Negro), que o programa Surfer desenha em locais informados como “área em branco”, ou seja, criam-se duas “barreiras”, por onde não devem passar as isolinhas. Deve-se ter em mente, contudo, que o programa não altera os valores das resistividades interpoladas, explicitados pelas distintas linhas de contorno, quando se introduzem as áreas em branco. Assim, as únicas formas do programa recalculer a malha original de dados, quando é informado da existência de zonas onde não são encontrados valores de resistividade, são através de um critério de busca mais refinado ou então pela utilização de filtro de exclusão de dados de entrada. Ressalve-se o fato de que a área hachurada no canto esquerdo inferior das figuras extrapola as coordenadas reais fornecidas ao programa, referente à quadrícula número 15, da Figura 1, por razões de configuração da malha, sem, contudo, afetar os cálculos das interpolações. O critério de interpolação de resistividade elétrica foi apoiado em polinômios de segunda ordem (superfície quadrática), com círculos de busca de valores com raio de 50.000 unidades. Pode-se

observar a existência de áreas mais densamente concentradas de faixa de valores de resistividade, nas aberturas de um e três metros. Ao contrário, para a abertura de dois metros, houve uma dispersão de faixa de valores, deixando as linhas de contorno mais suaves. A explicação destes fatos quiçá resida nos próprios valores medidos de resistividade, pois nas aberturas de malha de um e três metros, as quadriculas 5, 8 e 9 apresentaram valores elevados, muitos deles acima de 1.000 Ωm , enquanto nas quadriculas 11, 12, 13 e 14 as resistividades medidas situavam-se, em sua maioria, abaixo de 500 Ωm . Verificou-se também que este método não extrapolou, em demasia, valores de resistividade além da faixa de dados de entrada. Em linhas gerais, a concentração de faixa de valores de resistividade aparente está situada até 2000 Ωm , com poucos valores acima deste limite. Ademais, na interpolação, fora respeitada as áreas de pouca ou nenhuma medição de resistividade (principalmente as áreas do centro da cidade), áreas estas que aparecem em branco nas figuras. As Figuras 5 a 7 indicam as interpolações determinadas pelo método de regressão polinomial, levando-se em conta a série total de dados. Neste método, empregou-se polinômio de terceira ordem (superfície cúbica) para o cômputo da interpolação. Verificou-se, semelhantemente ao método anterior, um relativo respeito de não interpolação de valores naquelas áreas com poucas realizações de medições de resistividade, à exceção do ocorrido na abertura de três metros. Houve uma extrapolação de valores dos dados originais, na abertura de um metro, com áreas de resistividades acima de 5.000 Ωm , inclusive em zonas com poucos dados de entrada. Nas aberturas de um e dois metros, as superfícies cúbicas aparecem com duas origens de sistemas de coordenadas virtuais, em que agrupam-se, em torno de cada uma, quatro famílias de curvas interpoladas.

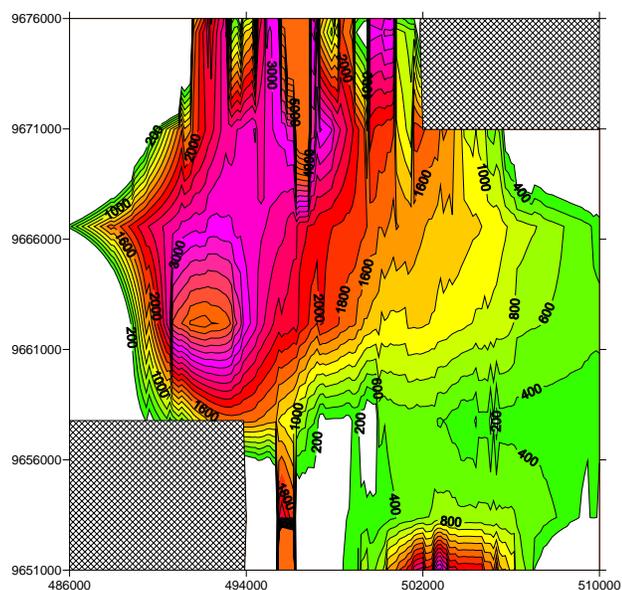


Figura 2 – Método de polinômio local, para a série completa de dados, com abertura de malha de 1 m.

A razão para esta ocorrência relaciona-se com pontos de convergência de valores de resistividade naqueles locais, enquanto que na abertura de três metros, as linhas de contorno aparecem muito suavizadas, praticamente paralelas, interpretadas como resultantes da distribuição geográfica dos valores medidos de resistividade, em forma mais harmônica. Outro ponto característico comum entre os dois métodos reside na ocorrência de isolinhas nas quadriculas 1, 2 e 4, áreas centrais da cidade, em que praticamente não foram tomadas medidas das resistividades. Desta forma, há uma distribuição de linhas de contorno que apenas medições de campo podem confirmá-las.

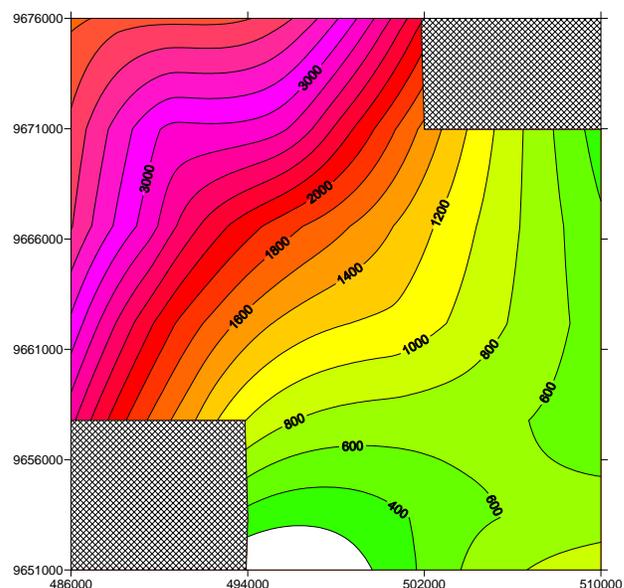


Figura 3 – Método de polinômio local, para a série completa de dados, com abertura de malha de 2 m.

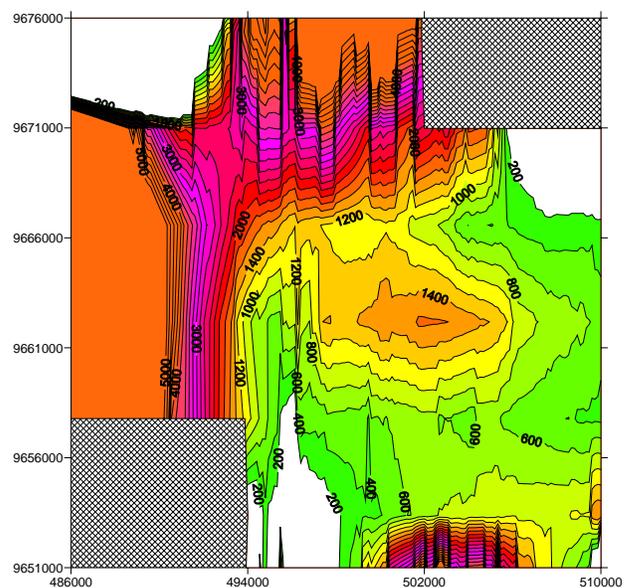


Figura 4 – Método de polinômio local, para a série completa de dados, com abertura de malha de 3 m.

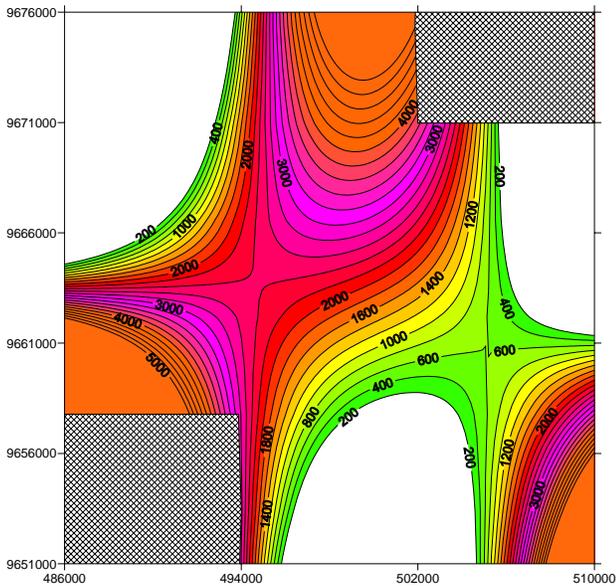


Figura 5 – Método de regressão polinomial, para a série completa de dados, com abertura de malha de 1 m.

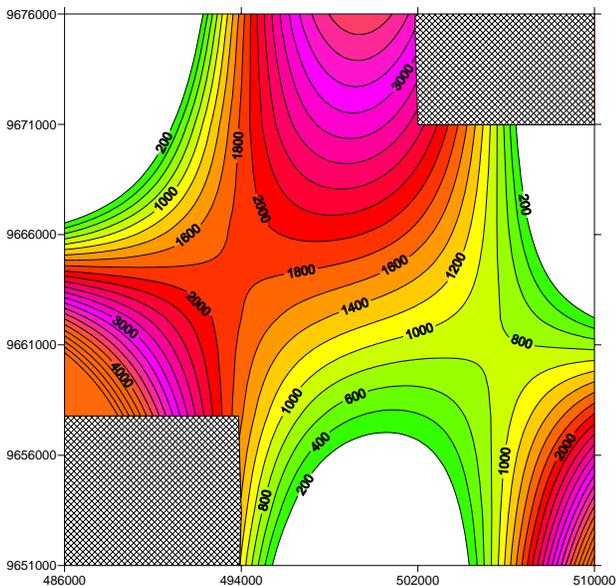


Figura 6 – Método de regressão polinomial, para a série completa de dados, com abertura de malha de 2 m.

As Figuras 8 a 10 mostram as curvas de contorno obtidas pela interpolação do método de polinômio local, nas condições de exclusão dos valores de resistividade elétrica aparente do solo superiores a $3.000 \Omega m$, para as aberturas de eletrodos de um a três metros. Já as Figuras 11 a 13 indicam a mesma variação, no entanto, para o método de regressão polinomial. Observa-se nestas figuras a grande mudança na forma das curvas, doravante muito mais suaves. Ademais, é perfeitamente nítido o aperfeiçoamento nos valores interpolados, mantendo-os mais compatíveis com aqueles efetivamente medidos durante a realização das

sondagens elétricas verticais (SEVs). Em adição, verifica-se também que o emprego da série estatística, com exclusão dos valores com baixa frequência de dados, leva à confecção de mapas que possuem características semelhantes, mesmo variando-se a profundidade de medição das resistividades. Essas figuras confirmam a necessidade de se fazer uso de vários métodos de interpolação, com o fito de se adotar um ou outro método que conduza a melhores interpretações das medições efetuadas. O método de polinômio local, na profundidade de um metro, avançou a interpolação além das áreas com poucas medições de campo.

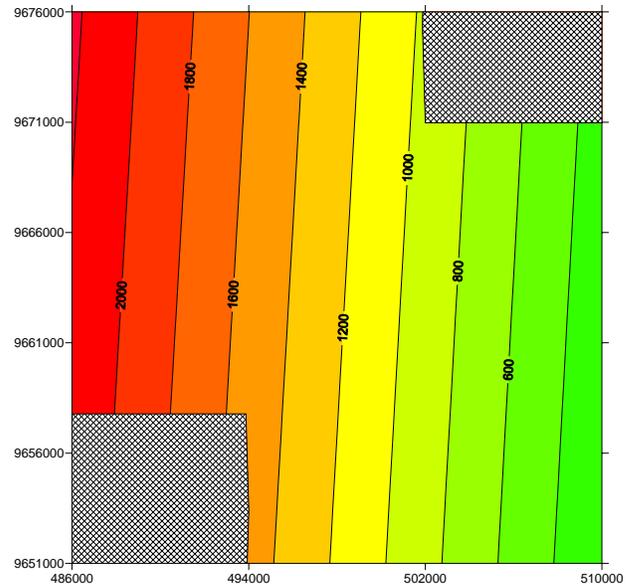


Figura 7 – Método de regressão polinomial, para a série completa de dados, com abertura de malha de 3 m.

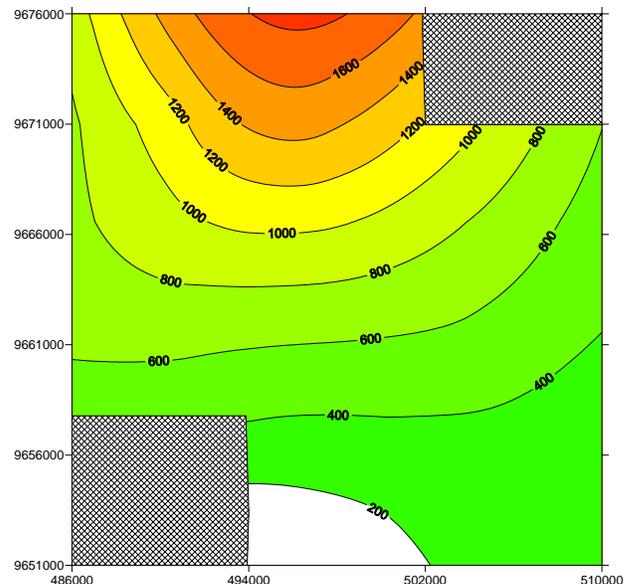


Figura 8 – Método de polinômio local, para a série com resistividades inferiores a $3000 \Omega m$, com abertura de malha de 1 m.

Para as outras profundidades, houve uma boa relação entre as áreas em branco e aquelas com realização de poucas medições de campo. Quanto ao método de regressão polinomial, o primeiro metro apresentou uma conveniente relação entre os dados de entrada e interpolados, no entanto, para os segundo e terceiro metros, os mapas resultantes indicaram apenas duas regiões, com valores de resistividade baixos, em torno de 600 Ωm .

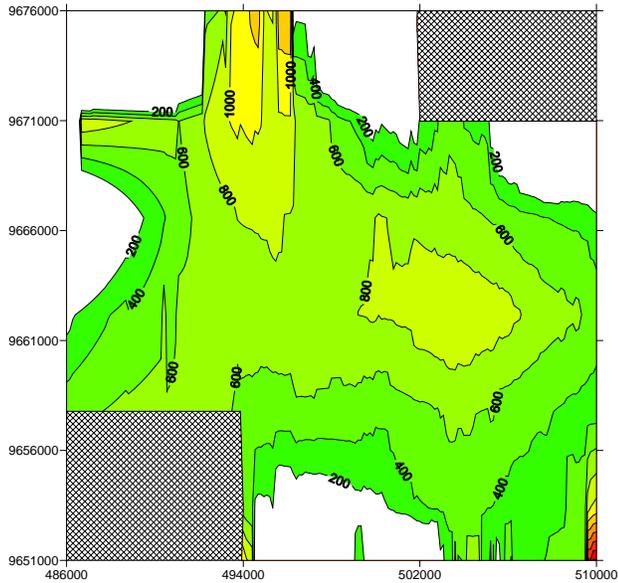


Figura 9 – Método de polinômio local, para a série com resistividades inferiores a 3000 Ωm , com abertura de malha de 2 m.

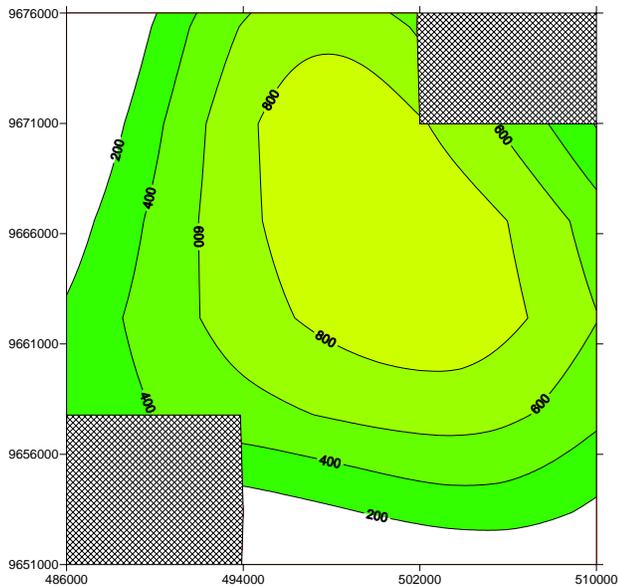


Figura 10 – Método de polinômio local, para a série com resistividades inferiores a 3000 Ωm , com abertura de malha de 3 m.

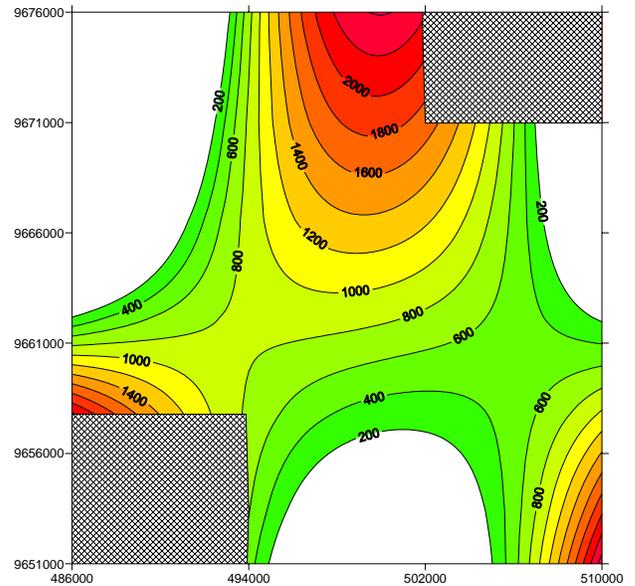


Figura 11 – Método de regressão polinomial, para a série com resistividades inferiores a 3000 Ωm , com abertura de malha de 1 m.

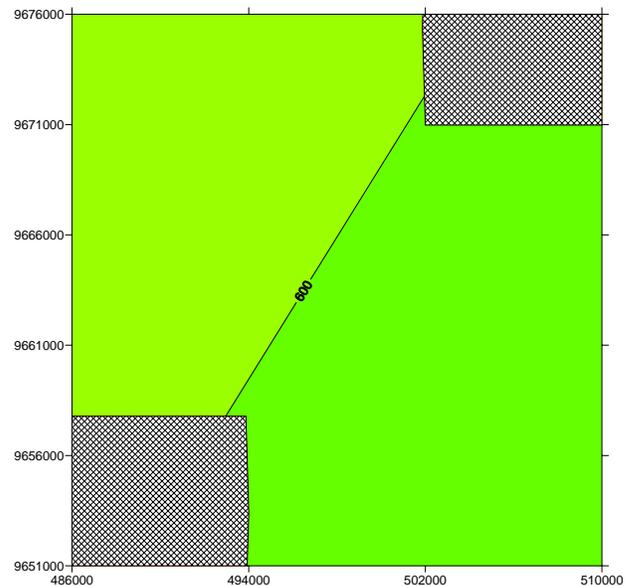


Figura 12 – Método de regressão polinomial, para a série com resistividades inferiores a 3000 Ωm , com abertura de malha de 2 m.

Esses dois últimos mapas parecem refletir que a eliminação dos valores extremamente altos (e.g., acima de 3.000 Ωm e, excepcionalmente, até mesmo de 28.000 Ωm) de resistividade elétrica medidas em locais muito pontuais, tornou mais equilibrada a distribuição geográfica dos valores de resistividade. Contudo, percebe-se claramente que outros métodos deveriam ser analisados, para essas duas aberturas de malha específicas, que conduzissem a resultados mais satisfatórios.

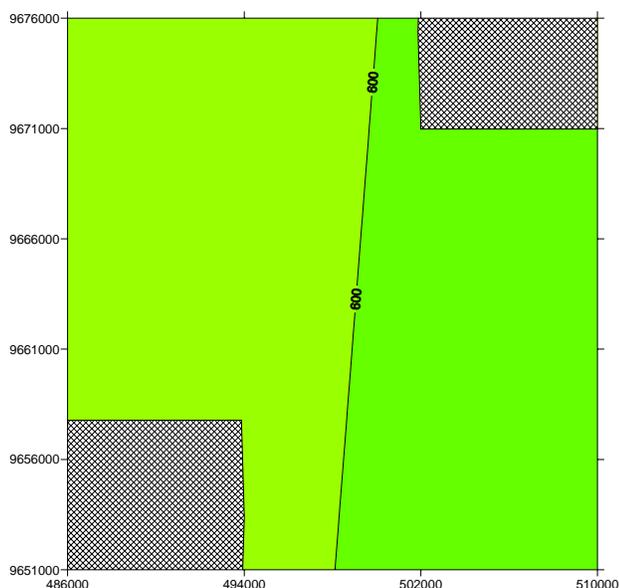


Figura 13 – Método de regressão polinomial, para a série com resistividades inferiores a 3000 Ωm , com abertura de malha de 3 m.

Conclusions

A realização de 138 sondagens elétricas verticais (SEVs) na cidade de Manaus permitiu a elaboração de mapas de isorresistividades elétricas aparentes do solo superficial. Onze métodos de interpolação de valores de resistividade elétrica foram estudados, entretanto, por brevidade, apenas dois métodos foram aqui abordados. Quando se utilizou a série completa ou total de valores de resistividade medidos no campo, as curvas resultantes indicaram valores de resistividade bastante sobrelevados, não respeitando os dados originais de entrada. Houve também a formação de curvas de interpolação concentradas em algumas áreas, inclusive em zonas do mapa onde não foram efetuadas medições no campo. Ao contrário, quando se procede à análise estatística dos dados, desprezando-se aqueles valores cujas frequências foram inferiores a dois, em intervalos de classes de 100 Ωm , então os mapas resultantes tornaram-se muito mais fidedignos aos valores medidos, com suavização nas linhas de contorno e características semelhantes de forma das curvas, mesmo variando-se a profundidade de medição. É sempre conveniente o estudo de vários métodos de interpolação, para que se proceda, então, à escolha daquele(s) que porventura melhor se adequa(m) às condições peculiares do problema. Realizações de SEVs futuramente são imprescindíveis, a fim de se ter maiores dados de entrada, para melhor distribuição de pontos medidos, inclusive na zona central da cidade.

References

- Albuquerque, O. R., 1922. Reconhecimento Geológico do Vale do Amazonas. Serv. Geol. Mineral do Brasil, no. 3.
- Campelo, N.S., Alkmin, J.T., Souza, F.C.R., Mello Jr., A.C., Cordeiro, L.C., Paz Jr., D.S., Aragão, A.F., Paz, E.C. e Carvalho, J.S., 2004. Comparação entre mapas de isorresistividades elétricas aparentes do solo superficial de Manaus, a partir de séries de dados completos e estatísticos. I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, SP, 2004, trabalho el 14, 6 pág.
- Caputo, M. V., Rodrigues, R. e Vasconcelos, D.N.N., 1972. Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas: Histórico e Atualização. Anais 26º Congresso Brasileiro de Geologia, S.B.G., Belém (PA), vol. 3.
- Cunha, P.R.C., Gonzaga, F.G., Coutinho, L.F.C. e Feijó, F.J., 1994. Bacia do Amazonas. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, vol. 8(1): 47-55.
- Dino, R.; Silva, O.B. e Abrahão, D., 1999. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. Boletim do 5º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, p. 557-565.
- Fernandes Filho, L.A, Costa, M.L. e Costa, J.B.S., 1997. Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus – AM. Geociências, São Paulo, vol. 16(1).
- IMPLAN e CPRM, 1996. Base cartográfica da área urbana de Manaus. Instituto Municipal de Planejamento Urbano e Informática/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Manaus, AM (em CD-ROM).
- Informe Geo, 2002. Projeto Geo Cidades. Relatório Urbano Ambiental Integrado: Manaus, AM. Consórcio IBAM/ISER/REDEH. Rio de Janeiro.
- Resix, 2000. User's manual. RESIX 2DI v4, Interpex Ltd., Golden, Colorado, USA.
- Surfer, 2002. User's guide. SURFER 8, Golden Software, Inc., Golden, Colorado, USA.

Acknowledgments

Os autores desejam expressar seus agradecimentos à concessionária de energia elétrica Manaus Energia S.A. e à agência reguladora do setor elétrico ANEEL, patrocinadores do projeto de pesquisa no âmbito P&D, que resultou na elaboração deste trabalho.