

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Mapeamento de Aquíferos Fraturados Empregando Métodos
Geoelétricos e Emissão Natural de Radônio**

Cláudio Márcio Almeida Pereira

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

2009

**Este trabalho é dedicado a todos aqueles
que, apesar das adversidades,
continuam a trilhar os seus caminhos.**

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
LISTA DE TABELAS E FIGURAS	IV
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	01
3. TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	02
3.1. Métodos de Prospecção Regional.....	02
3.1.1. Histórico.....	02
3.1.2. Técnicas aplicadas.....	03
3.2 Métodos de Prospecção de Detalhe.....	03
3.2.1. Histórico.....	04
3.2.2. Técnicas Aplicadas.....	04
3.2.2.1. Método Eletrorresistivo.....	05
3.2.2.2. Método do Potencial Espontâneo.....	11
3.2.2.3. Métodos Eletromagnéticos.....	12
4. MÉTODO DA EMANAÇÃO NATURAL DE RADÔNIO	13
4.1. Histórico.....	13
4.2. Propriedades do Radônio.....	15
4.3. Origem e Transporte do Radônio.....	15
4.4. Fatores que Causam Anomalias de Emissão de Rn.....	19
4.5. Condições de Contorno para Aplicação do Método.....	19
4.6. Metodologia Aplicada Para Validação do Método.....	20
4.7. Equipamentos e Técnicas Utilizadas.....	21
4.7.1. Método da emissão natural de Rn.....	21
4.7.2. MétodoEletroresistivo.....	22
5. ÁREA 01 – USINA PIRATININGA	23
5.1. Justificativa.....	23
5.2. Localização.....	23
5.3. Geologia Local.....	24
5.4. Trabalhos Executados.....	24
5.5. Resultados Usina Piratininga (Área 01 Linha C).....	26
5.6. Resultados Usina (Área 02 Linhas A e B).....	26
5.7. Resultados Usina (ÁREA 03 Linha A).....	27

6. ÁREA 02 – GUARULHOS	34
6.1. Justificativa	34
6.2. Localização	34
6.3. Geologia Local	35
6.4. Trabalhos Executados	35
6.5. Resultados	36
7. ÁREA 03 – PARQUE CONTINENTAL	39
7.1. Justificativa	39
7.2. Localização	39
7.3. Geologia Local	40
7.4. Trabalhos Executados	40
7.5. Resultados	43
8. ÁREA 04 – CAMPINAS FLAMBOYANT	45
8.1. Justificativa	45
8.2. Localização	45
8.3. Geologia Local	46
8.4. Trabalhos Executados	46
8.5. Resultados	47
9. ÁREA 05 – CAMPINAS AVEIRO	53
9.1. Justificativa	53
9.2. Localização	53
9.3. Geologia Local	54
9.4. Trabalhos Executados	54
9.5. Resultados	55
10. CONCLUSÕES	58
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio, auxílio e estímulo de diversas pessoas, empresas e instituições, para as quais deixo aqui registrado os meus sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas, pela orientação, apoio, estímulo e paciência, durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco Yukio Hiodo, pelo apoio e suporte durante as diversas fases da pesquisa.

Ao técnico Paulinho e ao colega Pedro Lazaneo pela ajuda imprescindível durante os trabalhos de campo.

Ao meu amigo Jorge Eduardo, pela mão amiga sempre à disposição.

À empresa General Water pela flexibilidade nos horários de trabalho e disponibilização de dados e informações.

A empresa EMAE, na figura dos colegas Paulo Vitor e Mirandola, pela disponibilização de informações e acesso a área para pesquisa.

Ao geólogo Vilmar, pela indicação de áreas para pesquisa.

As funcionárias da Seção de Pós-Graduação do IG, sempre prestativas.

Aos professores e funcionários do Instituto de Geociências, que direta e indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Osvaldo e Natividade, que sempre me incentivaram e me apoiaram no decorrer de toda minha vida.

Aos meus irmãos Marcos e Márcia, que sempre estiveram do meu lado, auxiliando e incentivando.

À minha esposa Gisa, pelo apoio imprescindível, não somente durante à pesquisa, mas em todos esses anos que estamos juntos.

Aos meus enteados Bruno e Olivia pelo apoio nas horas de maior necessidade.

À minha filha Giovanna Maria, que nasceu durante a realização deste trabalho, e nos trouxe muitas alegrias.

E a todos aqueles não mencionados aqui, mas que de alguma forma no decorrer destes anos colaboraram de alguma maneira para este momento.

RESUMO

Diversos métodos geofísicos têm sido empregados para a identificação de zonas fraturadas em rochas cristalinas a fim de localizar pontos de perfuração de poços tubulares. Os métodos geoeletricos têm tido um papel importante na identificação destas zonas fraturadas, no entanto, em áreas urbanas sofrem com a falta de espaço e interferências diversas, o que limita suas aplicações. O presente trabalho visou correlacionar as anomalias geoeletricas típicas de zonas fraturadas em rochas cristalinas, com medidas de emissão natural de radônio a fim de estabelecer parâmetros que possam ser aplicados em áreas onde os fatores externos impeçam a execução dos métodos geoeletricos, uma vez que os fatores que interferem na aplicação desses métodos não interferem na emissão do radônio. Os resultados encontrados nas áreas investigadas mostraram uma boa correlação entre as anomalias geoeletricas e as anomalias de emissão de radônio, bem como foram boas as correlações com os resultados de vazão dos poços existentes nas áreas investigadas. A metodologia aqui proposta alcançou os objetivos podendo ser uma excelente ferramenta para prospecção de água subterrânea, tanto como método auxiliar, quanto como ferramenta principal de prospecção de aquíferos em áreas onde outros métodos não possam ser aplicados devido a interferências diversas tais como: tubulações metálicas, fiações elétricas, entre outras. Estes tipos de interferências são bastante comuns em áreas urbanas, justamente onde a perfuração de poços é mais requerida.

ABSTRACT

A several geophysical methods have been used for the identification of shear zones in crystalline rocks in order to mark points to water well drilling. The geoelectrical methods have had an important role on the identification of these shear zones. However, in urban areas they suffer with the lack from space and diverse interferences, what it limits the application of these ones. The present research aimed to correlate the typical electrical anomalies of shear zones in crystalline rocks, with measures of natural emanation of radon, in order to establish parameters that can be applied in areas where the external factors hinder the execution of the geoelectrical methods, because the factors that intervene with the application of these methods do not intervene with the emanation of the radon. The results found in the investigated areas had shown a good correlation with the electrical anomalies and the radon emanation anomalies, as well as had been good the correlations with the results of yield of water wells on the investigated areas. The methodology proposal reached the objectives being able to be an excellent tool for groundwater prospection, as a auxiliary method auxiliary, as a main tool of prospection of fractured aquifers in areas where other methods cannot be applied due several interferences, as metallic pipes, electric wirings, and others. These types of interferences are sufficiently common in urban areas, exactly where the water well drilling it's more necessary.

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Tabela 01: Resistividade dos materiais geológicos	05
Tabela 02: Série de decaimento radioativo do ^{238}U	17
Tabela 03: Concentração de U e Th	17
Figura 01: sondagem elétrica vertical (arranjo de campo)	08
Figura 02: dipolo-dipolo (arranjo de campo)	10
Figura 03: arranjo gradiente (ou retângulo)	11
Figura 04: série de decaimento radioativo do ^{238}U	16
Figura 05: decaimento radioativo com emissão de partícula α	16
Figura 06: medição de radônio no solo – Markus 10	21
Figura 07: equipamento Terrameter SAS 4000	22
Figura 08: localização área 01 – Usina Piratininga	23
Figura 09: Mapa Geológico (Usina Piratininga)	24
Figura 10: Usina Piratininga linhas levantadas	25
Figura 11: Resultados – Piratininga (Área 01 – Linha C)	29
Figura 12: Resultados – Piratininga (Área 02 – Linha A)	30
Figura 13: Resultados – Piratininga (Área 02 – Linha B)	31
Figura 14: Resultados – Piratininga (Área 02 – mapa de emanação e resistividade)	32
Figura 15: Resultados – Piratininga (Área 03 – Linha A)	33
Figura 16: localização área 02 – Guarulhos	34
Figura 17: Mapa Geológico (Guarulhos)	35
Figura 18: Guarulhos linha levantada	36
Figura 19: Guarulhos linha levantada e instalação do resistímetro	37
Figura 20: Resultados – Guarulhos (Área 02)	38
Figura 21: localização área 03 – Pq. Continental	39
Figura 22: Mapa Geológico (Pq. Continental)	40
Figura 23: Pq. Continental linhas levantadas	41
Figura 24: perfil de medidas de emanação de Rn	42
Figura 25: aquisição de dados de emanação de Rn	42
Figura 26: Resultados – Pq. Continental (Área 03 – mapa de emanação de Rn)	44
Figura 27: localização área 04 – Campinas Flamboyant	45
Figura 28: Mapa Geológico (Campinas Flamboyant)	46

Figura 29: Campinas Flamboyant linhas levantadas.....	47
Figura 30: Resultados – Campinas (Área 04 – Linha A).....	49
Figura 31: Resultados – Campinas (Área 04 – Linha B).....	50
Figura 32: Resultados – Campinas (Área 04 – mapa de resistividade nível 02)	51
Figura 33: Resultados – Campinas (Área 04 – mapa de emanção de Rn).....	52
Figura 34: localização área 05 – Campinas Aveiro	53
Figura 35: Mapa Geológico (Campinas Aveiro).....	54
Figura 36: Campinas Aveiro linha levantada.....	55
Figura 37: Resultados – Campinas (Área 05)	57

1. INTRODUÇÃO

O sucesso na construção de poços tubulares, executados com a finalidade de se captar água subterrânea de aquíferos fraturados, está relacionado à correta locação do ponto de perfuração, de forma que o poço intercepte fraturas em profundidade permitindo assim que a água subterrânea escoe para seu interior.

A geofísica tem tido um papel importante na determinação de zonas fraturadas em profundidade através da aplicação dos métodos geoeletricos. O método eletrorresistivo e eletromagnético têm sido amplamente utilizados para tal finalidade. Porém, em áreas urbanas, estes métodos sofrem com interferências diversas (edificações, tubulações, redes elétricas etc), além das limitações físicas de espaço para uma aplicação eficiente das técnicas de campo.

Devido a estas dificuldades de execução dos citados métodos, a locação de poços tubulares em áreas urbanas fica bastante prejudicada sendo, em sua maioria, implementada ao acaso, sem estudos mais detalhados, o que aumenta muito o risco de insucesso na execução do empreendimento.

Quando os estudos para prospecção de água subterrânea abrangem uma ampla área, em se tratando de estudos regionais, as técnicas de interpretação de fotografias aéreas, sensoriamento remoto e aerogeofísica também têm demonstrado muita eficiência na determinação de zonas fraturadas.

Segundo CAVALCANTE (1990), cerca de 58% do território nacional apresenta domínio hidrogeológico cristalino. Segundo PARISOT (1983), na região metropolitana do município de São Paulo, cerca de 1/3 dos poços perfurados são do tipo cristalino, 1/3 do tipo sedimentar e 1/3 do tipo misto. Assim, podemos ver a importância da prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos que representam uma fração importante da água subterrânea como um todo.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal caracterizar as correlações entre anomalias de eletrorresistividade típicas de zonas fraturadas em rochas cristalinas, com medidas de emissão natural de radônio.

Desta forma, buscou-se propor um método alternativo que possa ser usado em áreas onde os tradicionais métodos geoeletricos não podem ser utilizados devido a diversos fatores – principalmente antrópicos – que interferem e/ou impedem a aplicação dos mesmos, tais como: edificações, tubulações, redes elétricas, limitações de terreno etc., comuns em áreas urbanizadas.

Um método que pode ser utilizado nas situações e áreas de impossibilidade de emprego dos tradicionais geoeletricos é a emissão de radônio, empregada com sucesso neste trabalho.

3. TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os métodos e técnicas utilizados para prospecção de água subterrânea podem ser divididos em duas principais áreas: os métodos de “prospecção regional” e os métodos de “prospecção de detalhe”.

3.1. Métodos de Prospecção Regional

Os métodos de prospecção regional são aqueles que se aplicam a grandes áreas de investigação ou quando a área alvo para a perfuração de um ou mais poços não é restrita aos limites de uma propriedade, mas envolve grandes extensões como nos casos em que são feitas campanhas para o abastecimento de bairros ou mesmo cidades. Estes métodos são a interpretação de fotografias aéreas, sensoriamento remoto e aerogeofísica.

3.1.1. Histórico

MADRUCCI (2004) estudou o aquífero fraturado da região do município de Lindóia / SP através de dois enfoques, um estudo regional através de interpretações de fotografias aéreas e um estudo de detalhe com métodos geofísicos.

SIQUEIRA et al., (2002) utilizaram o sensoriamento remoto através de fotos aéreas e imagens de satélite Landsat 5/TM para melhorar o índice de acerto na locação de poços tubulares na região da Província Borborema no Estado do Ceará.

EVANGELISTA et al., (1998) realizaram um estudo na região de Guarapari / ES através de interpretação de fotografias aéreas e sensoriamento remoto a fim de identificar áreas mais promissoras para a captação de água subterrânea.

CAVALCANTE (1990) realizou um estudo hidrogeológico numa área de terreno cristalino com manto de intemperismo por meio da interpretação de fotografias aéreas e cadastro de poços existentes no município de Atibaia / SP.

3.1.2. Técnicas Aplicadas

A interpretação de fotografias aéreas e a utilização do sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas para a elaboração de mapas temáticos, os quais, combinados, através de programas específicos, geram um mapa final de probabilidade de sucesso na captação de água subterrânea.

São geralmente elaborados mapas de lineamentos estruturais, mapas de isofrequência de juntas, mapa litoestrutural etc., os quais integrados geram um mapa final de probabilidades. Associados a estes mapas os cadastros de poços existentes e suas respectivas vazões também são uma ferramenta importante para o resultado final.

As fotografias aéreas servem para delimitar padrões de drenagem, tais como: dendrítico, retangular, paralela, radial etc. Estes padrões de drenagem estão intimamente ligados às características estruturais de uma determinada área.

As imagens de satélite mais utilizadas são as *TM Landsat* para determinação da rugosidade do relevo, permitindo a obtenção de informações sobre a geomorfologia de uma determinada área e o mapeamento de feições estruturais e geológicas. As metodologias aplicadas para este tipo de estudo têm seguido em linhas gerais a seguinte ordem: identificação da área alvo do mapeamento; levantamento bibliográfico da área; interpretação de fotografias aéreas; interpretação de imagens de satélite; elaboração de mapas temáticos; cruzamento dos mapas temáticos; elaboração de mapas de probabilidades; correlação com cadastro de poços existentes.

3.2. Métodos de Prospecção de Detalhe

Os métodos e técnicas de prospecção de detalhe são aqueles que se aplicam a áreas restritas onde a área alvo do mapeamento é muito limitada ou a intervenção

antrópica alterou completamente as feições naturais, de forma que os métodos anteriormente descritos não mais se aplicam.

3.2.1. Histórico

HIODO et al., (2003) utilizaram as técnicas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo e GPR – *Ground Penetrating Radar* e emanometria de radônio para identificar fraturas em rochas no município de Itu / SP.

GALLAS (2003) utilizou o caminhamento elétrico dipolo-dipolo para gerar seções de resistividade aparente e identificar zonas de fratura em rochas cristalinas no município de São José do Rio Pardo / SP.

MEDEIROS & LIMA (1999) utilizaram o método do Potencial Espontâneo para identificar zonas fraturadas em rochas cristalinas no Estado da Bahia e identificaram uma forte correlação entre anomalias de potencial espontâneo e fluxo de água subterrânea.

DEMETRIO (1998) utilizou o método da termometria elaborando perfis de variação da temperatura no subsolo para determinação de zonas fraturadas com circulação de água subterrânea.

CARRASQUILLA et al., (1997) utilizou os métodos de eletrorresistividade e VLF – *Very Low Frequency* para investigar a existência de descontinuidades litológicas e/ou estruturais, com vistas à indicação de áreas mais promissoras para captação de água subterrânea.

MARQUES (1995) utilizou o método VLF na prospecção de água subterrânea em zonas de rochas cristalinas e verificou que o mesmo não é adequado para áreas urbanas devido às já citadas interferências externas.

3.2.2. Técnicas Aplicadas

Diversos métodos geofísicos têm sido aplicados para prospecção de detalhe de água subterrânea. Em alguns casos foi feita uma integração entre os métodos de prospecção regional e os métodos de prospecção de detalhe (MADRUCCI, 2004).

Os métodos geofísicos mais aplicados para a prospecção de água subterrânea são: o método eletrorresistivo e o eletromagnético. Secundariamente também tem sido utilizado o método do potencial espontâneo.

3.2.2.1. Método Eletrorresistivo

No método eletrorresistivo, as técnicas mais utilizadas para prospecção de água subterrânea são: Caminhamento Elétrico, (principalmente dipolo-dipolo); a Sondagem Elétrica Vertical – SEV (arranjo Schlumberger) e a técnica do Gradiente. Neste trabalho este método foi utilizado com a técnica de caminhamento dipolo-dipolo.

De todas as propriedades físicas dos materiais geológicos a resistividade é a que mais varia, podendo atingir valores da ordem de 10^{-5} ohm.m para minerais metálicos até valores da ordem de 10^7 ohm.m para sedimentos extremamente secos ou rochas maciças.

Tabela 01: Resistividade dos materiais geológicos

Mineral ou Rochas	Resistividade (ohm.m)
Bauxita	200 – 6000
Água superficial	10 – 100
Água do mar	0,2
Grafita	$10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$
Granito porfirítico (saturado)	$4,5 \times 10^{-3}$
Diabásio	$20 - 5 \times 10^7$
Basalto	$10 - 1,3 \times 10^7$
Xisto	$20 - 10^4$
Gnaisse (Seco)	3×10^6
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$
Argilas consolidadas	$20 - 2 \times 10^3$
Argilas inconsolidadas úmidas	20
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenitos	$1 - 6,4 \times 10^8$
Calcários	$50 - 10^7$

Telford et al., (1990)

A eletrorresistividade é um método que se utiliza da resistividade elétrica para identificar diferentes materiais em subsuperfície.

Considerando que a maior ou menor facilidade com que uma corrente elétrica flui através de um determinado material é função da natureza e do estado físico deste, a lei de Ohm mostra que para uma corrente elétrica I (em ampères) que atravessa um condutor fino linear e de secção uniforme, o valor de I pode ser obtido através da seguinte expressão simplificada:

$$I = \frac{-dV}{R}$$

Onde dV é a diferença de potencial (em volts) entre os dois extremos do condutor e R (ohms) é a resistência do condutor. R é diretamente proporcional ao comprimento dl (m) do condutor e inversamente proporcional à área de secção que atravessa s (m²) sendo expressa da seguinte forma:

$$R = \rho \frac{dl}{s}$$

Onde ρ (ohm.m) é a resistividade do material. A resistência é uma propriedade que depende das dimensões do corpo condutor enquanto que a resistividade é uma característica intrínseca dos materiais. A partir das duas equações acima temos que :

$$\frac{I}{S} = - \frac{1}{\rho} \frac{dV}{dl}$$

Onde I/S representa a densidade de corrente J , enquanto que $-dV/dl$ representa o campo elétrico E na direção do vetor densidade de corrente, logo:

$$J = \sigma E$$

Onde σ é o inverso da resistividade ($\sigma = 1/\rho$), ou seja é a condutividade do material em (S/m) ou (mho), (PARASNIS, 1986).

Considerando um eletrodo pontual em uma superfície eletricamente homogênea e isotrópica de espessura infinita e resistividade ρ teremos para um caso geral de uma camada hemisférica de raio r e espessura dr :

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r}$$

Integrando a equação acima teremos:

$$dV = -\frac{I\rho}{2\pi} \frac{dr}{r^2} \quad (\text{PARASNIS, 1986})$$

Como funções escalares podem ser adicionadas algebricamente, se tivermos duas ou mais fontes de corrente, o potencial de um ponto será a somatória da contribuição de cada fonte individual.

Considerando que para um levantamento de campo são utilizados 4 eletrodos, (dois para emissão de corrente denominados de A e B e dois para medida de potencial denominados M e N) e que as medidas físicas obtidas em campo são a corrente I emitida entre os dois eletrodos A e B e a diferença de potencial ΔV medida entre os eletrodos M e N, teremos:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Onde:

AM, BM, AN, BN, são as distâncias entre os eletrodos A, B, M, N. Logo:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K$$

Arranjo de Campo: Sondagem Elétrica Vertical – SEV

A sondagem elétrica vertical (SEV) consiste em se dispor simetricamente eletrodos ao longo de uma linha no terreno de forma a medir a variação da resistividade aparente das diversas camadas do subsolo.

Este arranjo simétrico pode ser do tipo *Schlumberger* ou *Wenner*, sendo utilizados quatro eletrodos. Os eletrodos são dispostos simetricamente a partir de um ponto central, sendo dois externos para emissão de corrente (AB) e dois internos para medida da diferença de potencial (MN).

O objetivo da SEV é determinar quantitativamente a variação vertical da resistividade elétrica de diferentes camadas horizontais ou subhorizontais do subsolo, sob o ponto central do arranjo. Um melhor resultado é obtido quando não há variação lateral dessas camadas e quando são plano-paralelas.

A SEV é adequada para determinar a profundidade do embasamento, do nível freático e espessura de camadas sedimentares.

O resultado desta investigação é um gráfico em escala bi-logarítmica, onde no eixo X são plotadas as aberturas $AB/2$ e no eixo Y as resistividades obtidas para cada abertura. A união dos pontos deste gráfico gera uma curva, que pode ser interpretada em função do perfil geológico que a originou.

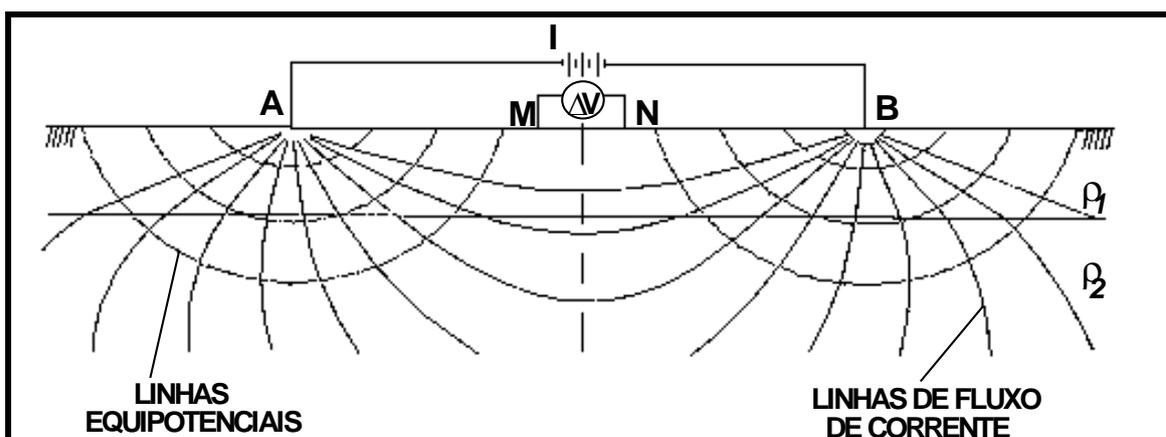


Figura 01: sondagem elétrica vertical (arranjo de campo)

Arranjo de Campo: Dipolo – Dipolo

A técnica do caminhamento elétrico dipolo-dipolo é uma das principais utilizadas para o mapeamento de zonas fraturadas com possível presença de água, devido a facilidade de execução em campo e uma razoável facilidade de uma interpretação semi-quantitativa da geologia, correlacionável às variações da resistividade elétrica em subsuperfície.

O objetivo principal do caminhamento elétrico é a detecção de anomalias ou variações, principalmente horizontais, da resistividade elétrica provocadas por estruturas verticais ou subverticais. Analogamente à técnica da SEV, é emitida uma corrente pelos eletrodos AB e lida a diferença de potencial ΔV nos eletrodos MN. O dipolo-dipolo é uma técnica que se destaca pela sua simplicidade de execução em campo.

No caminhamento dipolo-dipolo, em cada estação de leituras, os eletrodos AB ficam fixos e variam-se as distâncias dos pares de eletrodos MN em relação a AB. A profundidade do nível investigado é função da distância entre estes pares de eletrodos. A distância entre o eletrodo A e o eletrodo B e a distância entre o eletrodo M e o eletrodo N é sempre mantida fixa. Este procedimento é apresentado na Figura 2.

Deste modo, é obtida uma seção onde cada nível de investigação é função da distância entre os centros dos pares de eletrodos AB e MN. Isto permite que se faça uma investigação lateral e vertical simultaneamente. A interpretação desta técnica é qualitativa (ou semi-quantitativa), permitindo identificar principalmente estruturas verticais e subverticais em subsuperfície. Posteriormente, após o processamento dos dados por programas de inversão, pode-se quantificar as interpretações com maior precisão.

O resultado deste tipo de análise é uma pseudo-seção de resistividade aparente, onde são traçadas isolinhas de valores de resistividade aparente. A profundidade real de cada nível varia de acordo com os valores de resistividade aparente. A análise da distribuição das isolinhas é que permite inferir a presença de estruturas em subsuperfície (GALLAS, 2000).

As profundidades efetivas (ou reais) de investigação são tema bastante controverso e abordado por diversos autores (EDWARDS, 1977, APPARAO et al.,

1997, BARKER, 1989). Segundo estes autores as profundidades reais de investigação podem ser até metade da profundidade aparente.

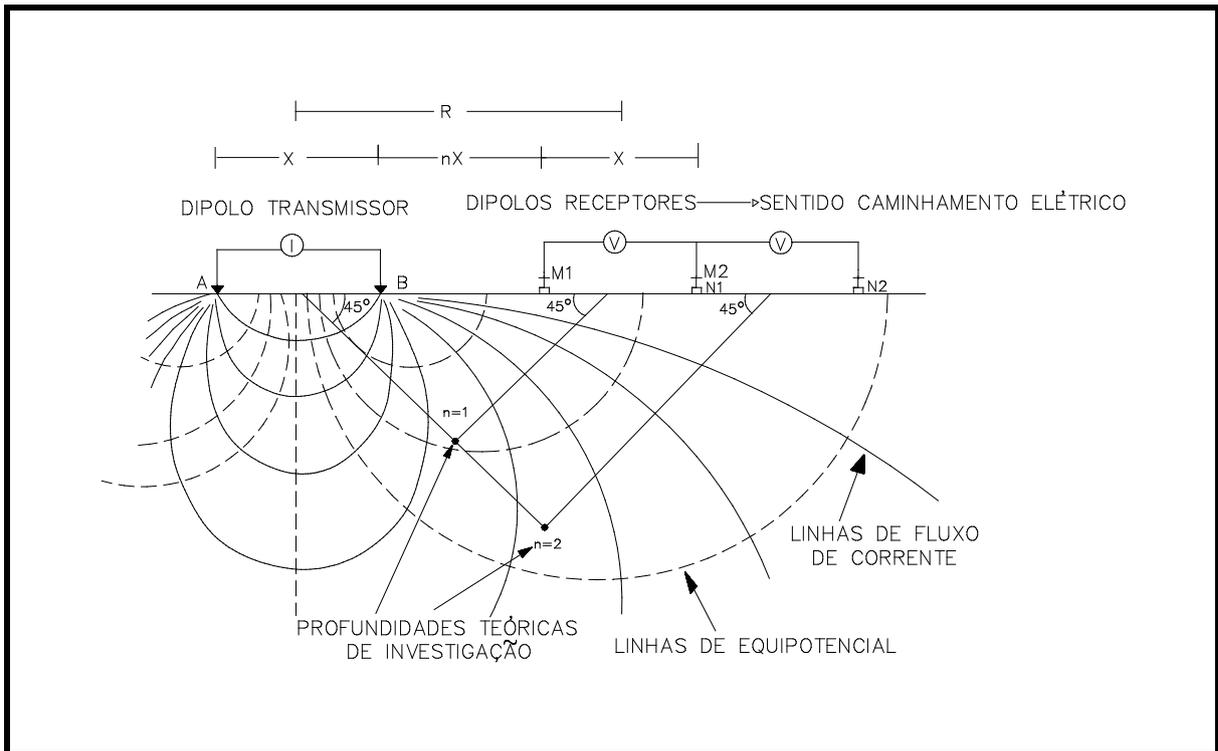


Figura 02: dipolo-dipolo (arranjo de campo)

Arranjo de Campo Gradiente (ou Retângulo)

Analogamente às técnicas da SEV e dipolo-dipolo, são dispostos 4 eletrodos, sendo dois de corrente AB e dois de potencial MN. O levantamento é desenvolvido mantendo-se fixos os eletrodos de corrente AB com uma abertura igual a L e realizando-se as leituras através dos eletrodos de potencial M e N que são deslocados de x em linhas paralelas ao **alinhamento** formado pelos eletrodos A e B. O levantamento recobrirá o retângulo formado pelas linhas levantadas ou, se a área for muito limitada, pode-se levantar apenas a linha central.

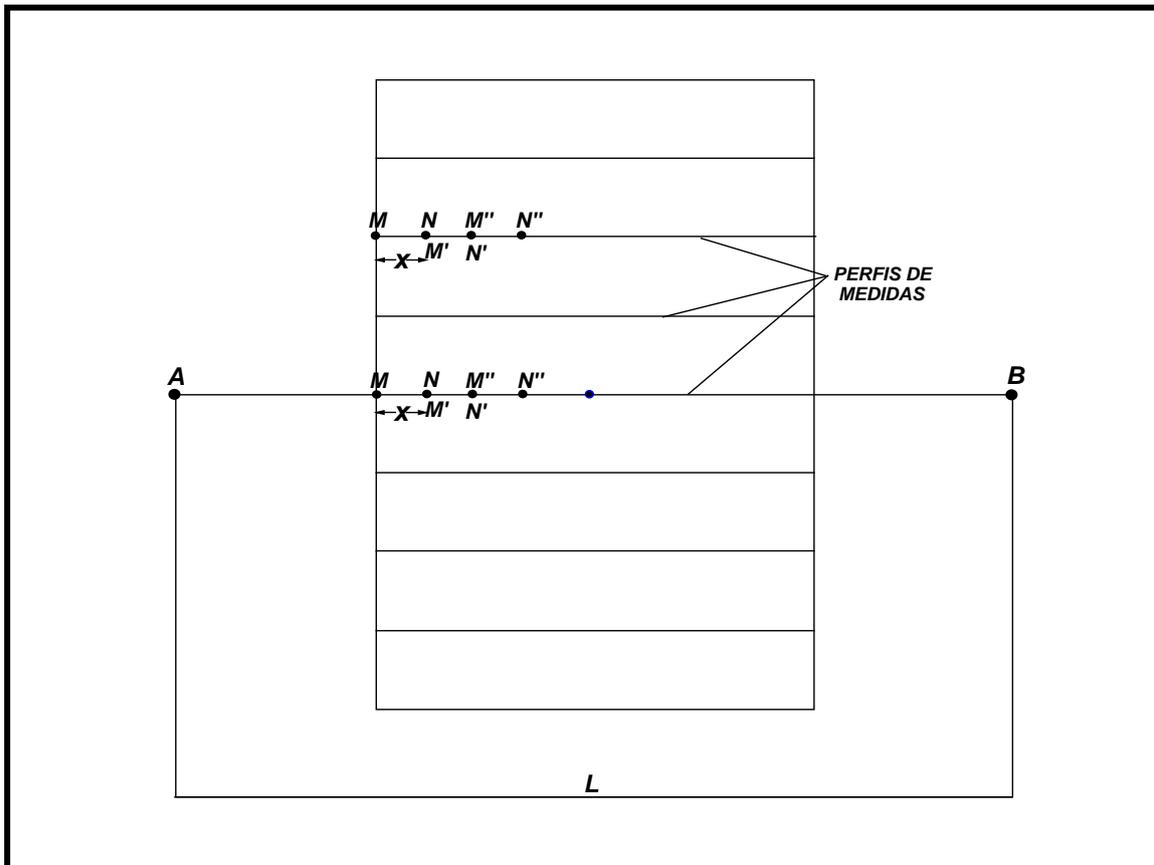


Figura 03: arranjo gradiente (ou retângulo)

3.2.2.2. Método do Potencial Espontâneo

O método do potencial espontâneo consiste em medir a diferença de potencial elétrico entre dois pontos distintos do terreno. Para tanto, utilizam-se dois eletrodos (eletrodos porosos) que são recipientes com o fundo poroso (permeável). O eletrodo consiste de um metal imerso em uma solução de seu próprio sal. O mais comum é uma solução saturada sulfato de cobre e um fio de cobre.

Para as medidas é utilizado um milivoltímetro conectado aos dois eletrodos. Um dos eletrodos é mantido fixo em uma estação-base enquanto o outro é itinerante e vai percorrendo o terreno nos pontos de medida pré-determinados.

A convenção é de que o pólo negativo seja conectado à base e o positivo ao eletrodo móvel. As variações nos valores indicam o sentido de fluxo das águas subterrâneas que é do potencial negativo para o positivo. Isto deve-se ao fato que na natureza os íons com maior mobilidade são os de carga positiva.

3.2.2.3. Métodos eletromagnéticos

Os métodos eletromagnéticos são utilizados para prospecção de água subterrânea realizando-se perfis de caminhamento e executando medidas a espaços regulares. As profundidades de investigação dependem da frequência empregada pelo equipamento e da resistividade (ou condutividade) do substrato investigado.

Estes equipamentos geralmente operam com duas bobinas, uma transmissora e uma receptora de sinais eletromagnéticos. A bobina transmissora gera um campo eletromagnético primário que ao passar pelo material do subsolo induz um campo secundário. Grande parte dos equipamentos usa um cabo de referência entre as bobinas e a profundidade de investigação também dependerá da separação entre as mesmas. Quanto maior esta distância, maior a profundidade.

A bobina receptora lê parâmetros relativos a estes campos ou medidas relacionadas a eles, dependendo do equipamento empregado. Ao passar por zonas fraturadas com presença de água os parâmetros serão alterados em função dos contrastes de condutividade – maior condutividade na presença de água. Os resultados deste tipo de investigação poderão ser gráficos de condutividade ou do parâmetro que estiver sendo medido pelo equipamento, sempre buscando associa-los a zonas fraturadas.

Alguns equipamentos utilizados, em ordem crescente de profundidade de investigação, podem ser citados: EM-31; EM-34; SMARTem. Os resultados obtidos pelo EM-31 não passam de poucos metros (cerca de 6m) de profundidade máxima de investigação, sendo, portanto, pouco utilizado para prospecção de água subterrânea. O EM-34 pode atingir até 60 metros de profundidade de investigação e o SMARTem até 1000 metros.

O método VLF (*Very Low Frequency*) é similar aos anteriores, porém a fonte primária de geração de ondas eletromagnéticas não está no próprio aparelho, mas vem de fonte externa fixa, uma fonte transmissora de rádio de baixa frequência (15 a 30 KHz). É mais indicado para alvos a pouca profundidade, podendo chegar a até 60 metros de profundidade em situações ideais. Estruturas condutivas causam distorções locais na direção e intensidade no campo gerado pelo sinal transmitido. O equipamento mede diretamente esta distorção, expressa em % do campo horizontal.

O grande problema dos métodos eletromagnéticos, por sua natureza indutiva e não galvânica, é que eles são mais afetados pelos ruídos elétricos/eletromagnéticos, comuns em áreas urbanas, que a eletrorresistividade.

4. MÉTODO DA EMANAÇÃO NATURAL DE RADÔNIO

O presente trabalho visa estabelecer mais um método de prospecção de detalhe para mapeamento de zonas fraturadas que armazenem água subterrânea, com a finalidade de reduzir as incertezas na locação de poços tubulares. Este método seria passível de utilização em pequenos espaços e em áreas urbanizadas, onde os diversos já citados “ruídos” e interferências externas impedem a utilização de outros métodos tradicionais.

A aplicação do método da emanção natural de radônio, aqui proposto e enquadrado nos métodos de prospecção de detalhe, deve seguir determinados critérios (condições de contorno) para a efetiva validade das correlações com estruturas que armazenam e escoam água subterrânea.

A pesquisa em questão seguiu uma metodologia para validar a correlação entre aumento na emanção natural de radônio com a presença de zonas fraturadas em subsuperfície. Foi utilizado o método da eletrorresistividade, empregando-se a técnica de caminhamento elétrico dipolo-dipolo. Foram levantados também perfis de emanção natural de radônio para correlação das anomalias. Em algumas áreas foram aproveitados os dados de caminhamento dipolo-dipolo executados anteriormente e informações sobre levantamentos tipo gradiente elétrico, igualmente pré-executados, que também serviram para selecionar as áreas de investigação.

4.1. Histórico

INCEÖZ et al., (2006) realizaram estudo de emanção de Rn em zona de falha na Turquia, obtendo resultados que indicam que a emanção próxima à zona é bastante elevada.

HIODO et al., (2003) utilizaram diversos métodos geofísicos tais como espectrometria gama, GPR, caminhamento eletromagnético, caminhamento elétrico e emanção natural de radônio para estudar a circulação de água subterrânea em

fraturas, no município de Itu / SP. Os resultados indicam que a emissão de Radônio aumentou significativamente próximo à zona de fratura.

ONE (1998) trabalhou no desenvolvimento de instrumentação e metodologia para mapeamento de zonas fraturadas em rochas graníticas através da emissão natural de radônio. Neste trabalho foi desenvolvida uma instrumentação de aquisição de dados de emissão de gás radônio presente nos espaços porosos do solo de alteração de rochas graníticas e foi elaborada uma metodologia para mapeamento de zonas fraturadas.

Os dados obtidos neste trabalho indicam uma forte anomalia com cerca de 06 vezes o valor do *background* da área. Esta anomalia foi associada a uma zona fraturada. As medidas foram feitas com equipamento montado no IAG-USP, um alfacintilômetro com Célula de Lucas. O espaçamento entre as medidas no perfil foi de 05 metros e o tempo de contagem de emissões foi de 05 min para cada ponto.

Alguns trabalhos com emissão de radônio têm sido feitos principalmente nos Estados Unidos, onde a EPA – *Environment Protection Agency* estabelece valores para concentrações de radônio em ambiente fechados, por se tratar de um gás cancerígeno, se inalado em altas concentrações por longo tempo.

Alguns trabalhos de mapeamento de risco de emissão de radônio indicam que zonas de cisalhamento são áreas de alto risco por apresentarem altos valores de emissão de gás radônio. GUNDERSEN (1995) realizou várias medidas da emissão natural de Rn em uma área que apresenta rochas milonitizadas na região dos Apalaches no Leste dos Estados Unidos. Os dados indicaram que nas áreas de exposição de rochas milonitizadas a emissão de Rn é muito superior às das rochas adjacentes.

CHI-YU KING et al., (1995) monitoraram a emissão de radônio ao longo de 380 Km da falha de San Andreas na Califórnia e identificaram que a emissão apresenta variação sazonal e que as variações não sazonais estão provavelmente ligadas a eventos sísmicos locais.

Segundo HENRY et al., (1995) uma alta atividade gama e de emissão natural de radônio parece estar associada a mineralizações que ocorrem em zonas de cisalhamento na área de Mulligan Quarry, New Jersey.

Segundo SCHOLZ (1973), *apud* BRENHA (1981), o surgimento de anomalias de Rn precedentes a terremotos é devido ao aumento da superfície de emanação devido ao fraturamento das rochas.

A relação escape / produção de gás Rn foi estabelecida por BARRETO (1973), *apud* BRENHA (1981). Segundo o autor, as rochas apresentam em geral relação escape / produção inferior a 10%, exceto gnaisses e granitos e granodioritos que por vezes chegam entre 10 e 20%. Os mais fracos emanadores seriam os gabros, basaltos, ortoquartzitos e calcários.

4.2. Propriedades do Radônio

O Radônio Rn é um elemento gasoso, radioativo, incolor, pertencente ao grupo dos gases nobres da Tabela Periódica. Possui número atômico $Z = 86$ e número de massa $MA = 222$. As demais propriedades físicas do radônio são:

Densidade $d = 973\text{g.L}^{-1}$

Ponto de Fusão $PF = -71^{\circ}\text{C}$

Ponto de Ebulição $PE = -61,8^{\circ}\text{C}$.

São conhecidos pelo menos 20 isótopos, sendo o mais estável o ^{222}Rn . Ele foi descoberto por Ernest Rutherford em 1900. O radônio ^{222}Rn é produto do decaimento radioativo do elemento rádio ^{226}Ra , pertencente à série radioativa do urânio ^{238}U . O radônio possui uma meia vida de 3,825 dias e decai para polônio ^{218}Po através da emissão de uma partícula α .

4.3. Origem e Transporte do Radônio

Origem do Radônio

De todos os radionuclídeos provenientes da série de decaimento do ^{238}U o Rn é o único que se encontra na forma gasosa tendo assim uma dinâmica diferente dos demais radionuclídeos, passando a ocupar o ar presente nas fraturas das rochas e poros do solo.

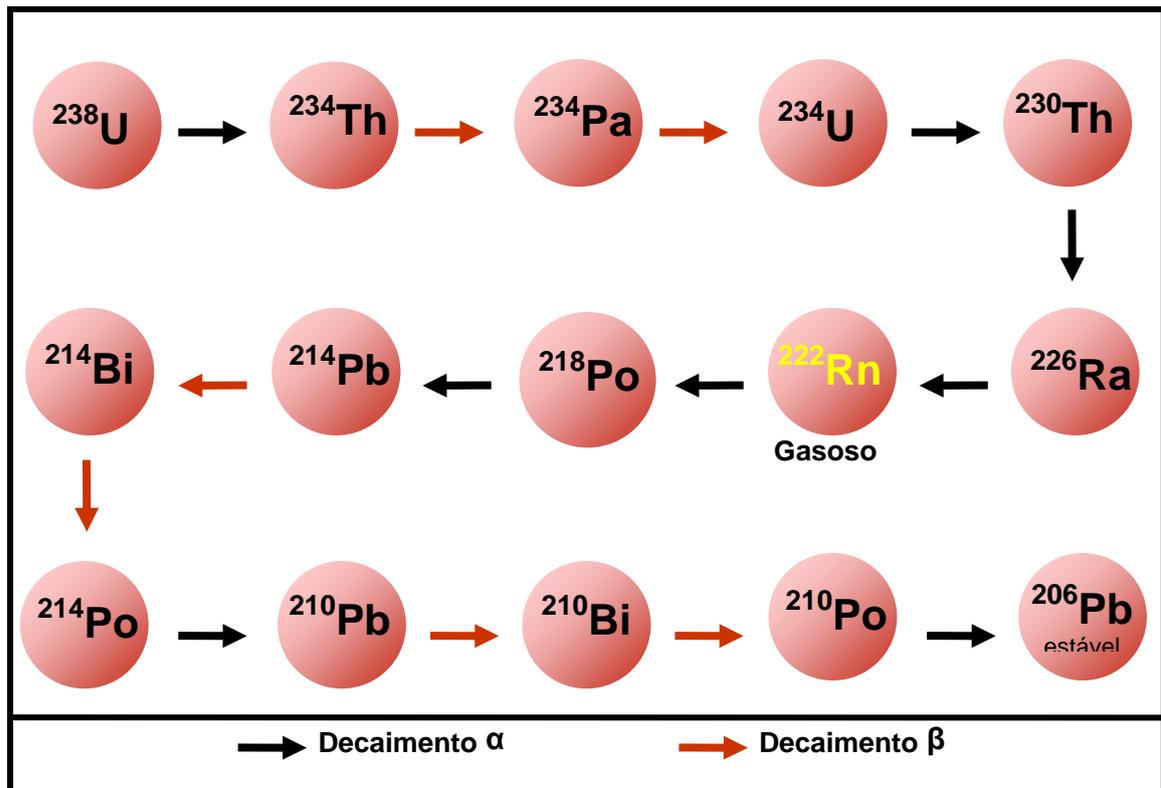


Figura 04: série de decaimento radioativo do ^{238}U

Quando um átomo de Ra decai para formar o Rn, ele perde dois prótons e dois nêutrons. Estes dois prótons e dois nêutrons são chamados de partícula α . O próprio radônio decai pela emissão de uma partícula α produzindo assim o polônio. A meia-vida do Ra é de 1,620 anos e do Rn 3,825 dias. O Polônio, produto de decaimento do Rn possui meia-vida de 03 minutos (ver tabela 02).

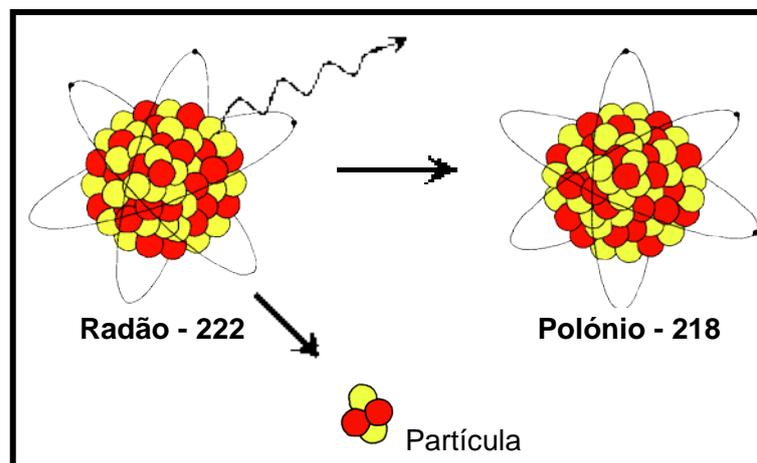


Figura 05: decaimento radioativo com emissão de partícula α

Tabela 02: Série de decaimento do ^{238}U

Série de Decaimento do ^{238}U			
Elementos	Número Atômico Z	Emissão	Meia Vida
Urânio - 238	92	α	$4,5 \times 10^9$ anos
Tório - 234	90	β	24 dias
Protactínio - 234	91	β	1,2 minutos
Urânio - 234	92	α	$2,5 \times 10^5$ anos
Tório - 230	90	α	8×10^4 anos
Rádio - 226	88	α	1,620 anos
Radônio - 222	86	α	3,825 dias
Polônio - 218	84	α	3 minutos
Chumbo - 214	82	β	9 minutos
Bismuto - 214	83	β	27 minutos
Polônio - 214	84	α	$1,6 \times 10^{-4}$ segundos
Chumbo - 210	82	β	22 anos
Bismuto - 210	83	β	5 dias
Polônio - 210	84	α	138 dias
Chumbo - 206	82		Estável

(PARASNIS, 1997)

Para melhor entender a geologia associada ao radônio e, conseqüentemente, como e onde ele se forma e como se move, é necessário irmos a primeira fonte de geração, o urânio. O ^{238}U , que corresponde a 99,27% de todo o urânio natural existente sendo, portanto, o elemento que encabeça a série radioativa de maior interesse, de onde o ^{222}Rn se forma em um dado momento, na série de decaimento.

Todas as rochas contêm certa quantidade de urânio em sua composição. Muitas rochas contêm cerca de 1 a 3 ppm (partículas por milhão). Algumas rochas, entretanto, contêm até 100 ppm, como o caso de algumas rochas ígneas de composição granítica, rochas sedimentares que contêm fosfato e seus respectivos correspondentes metamórficos.

Tabela 03: Concentração de U e Th

Concentração de U e Th		
	U ppm	Th ppm
Crosta Oceânica	0,4	1,7
Crosta Continental	1,0	4,0
Rochas Ígneas Ácidas	4,0	18,0
Rochas Ígneas Básicas	0,5	3,0

Folhelhos	4,0	11,0
Arenitos	2,0	10,0
Calcários	1,4	1,5

(SHERIFF, 1989)

Transporte do Radônio no Subsolo

O Rn formado no subsolo tem uma mobilidade muito maior do que a dos demais elementos formados na série radioativa, por se tratar de um gás. O radônio pode escapar através de fraturas nas rochas e através dos poros do solo onde se forma.

Quando um átomo de Ra decai pela emissão de uma partícula alfa para formar um novo átomo de Rn, este novo átomo formado é lançado em direção oposta àquela em que foi lançada a partícula alfa (*alpha recoil*), (TANNER, 1980, *apud* GUNDERSEN, 1992). Este é o principal fator que faz com que o novo átomo de Rn formado escape do grão mineral em que o elemento Radio estava.

A localização do elemento Rádio, no grão mineral (se perto da superfície do grão ou em seu interior) e a direção de lançamento do Rn formado (se para fora do grão ou para dentro), determina se o novo átomo de Rn será lançado para o espaço entre os grãos ou não.

Se o átomo de Ra estiver no interior do grão mineral e/ou se a direção de lançamento do Rn não for para a superfície do grão, o novo átomo de Rn formado não escapará para o espaço entre os grãos.

Se o lançamento do Rn for em direção à superfície do grão o mesmo poderá escapar para o espaço poroso, porém, como o lançamento do Rn é muito forte, o Rn assim formado sai do grão inicial onde se formou, atravessa o espaço poroso entre os grãos e se aloja em outro grão mineral, (USGS, 1995).

Isto é o que geralmente ocorre, a menos que haja a presença de água preenchendo o espaço poroso intergranular (no caso de solos) ou água preenchendo fraturas (quando a formação se dá em rochas sãs). Nestes casos o Rn fica nestes espaços, uma vez que a água absorve a energia cinética do novo átomo formado (TANNER, 1980, *apud* SIGRID et al., 1991).

O escape do Rn para a superfície pode ser afetado por vários fatores como variações de pressão barométrica e umidade do solo, temperatura do ar e do solo (SIGRID et al., 1995), mas, principalmente, pelas características de porosidade e

permeabilidade e umidade do solo (REIMER, 1995). Em terrenos de rochas cristalinas os principais fatores que favorecem o escape do Rn são: pequena espessura e alta permeabilidade do solo de alteração e zonas fraturadas em subsuperfície (OTTON et al., 1995).

Segundo REBELO et al., (2003), em meio saturado o fluxo de radônio é preferencialmente lateral e ocorre de acordo com o fluxo de água subterrânea. Em meio não saturado, predominam os processos de difusão gasosa associados a processos de difusão de vapor e capilaridade.

4.4. Fatores que Causam Anomalias na Emissão de Rn

Diversos fatores podem ser responsáveis pelo aumento da intensidade de emissão do Rn através da superfície terrestre, dentre os quais podemos citar:

- Presença de rochas ricas em urânio;
- Solos altamente permeáveis;
- Menor espessura do manto de alteração;
- Presença de cavernas em calcários;
- Presença de zonas fraturadas.

Assim, a prospecção de zonas fraturadas através da emissão natural de Rn deve ser tratada como uma prospecção de detalhe procurando, sempre que possível, ter o máximo controle a cerca dos diversos fatores que podem causar o aumento da emissão do Rn.

4.5. Condições de Contorno para Aplicação do Método

Para aplicação desta técnica, algumas condições de contorno devem ser observadas: A área alvo do mapeamento deve estar geologicamente inserida no embasamento cristalino, sem presença de coberturas sedimentares, ou estas coberturas não devem ser muito espessas, uma vez que podem mascarar as medidas de Rn em função da variação na permeabilidade dos sedimentos.

Os perfis de emanção devem, na medida do possível, estar sobre um mesmo tipo de rocha, ou a presença de contatos geológicos deve estar bem marcada, para evitar erros induzidos por diferença na concentração de urânio da rocha fonte.

Devem ser priorizadas áreas onde a espessura média do manto de alteração não seja muito grande, pois quanto maior a espessura do manto maior a chance de ocorrer alguma variação na emanção em função de variações na porosidade e permeabilidade do material de cobertura.

4.6. Metodologia Aplicada para Validação do Método

Com o objetivo de correlacionar a presença de fraturas contendo água no subsolo com as emanções de radônio na superfície terrestre, foi proposta a seguinte metodologia:

- 1- Selecionar áreas onde já existiam poços tubulares perfurados;
- 2- Levantar dados de resistividade e/ou aproveitar dados existentes;
- 3- Levantar perfis de emanção natural de radônio;
- 4- Cruzar todas as informações disponíveis para avaliar as correlações.

Foram escolhidas 05 áreas que, por suas características, eram adequadas para avaliação das correlações entre as anomalias. Possuíam poços perfurados, havia indicação prévia da existência de zonas fraturadas e satisfaziam as condições de contorno estabelecidas. As áreas escolhidas foram assim denominadas: Área 01 – Usina Piratininga; Área 02 – Guarulhos; Área 03 – Parque Continental, Área 04 – Campinas Flamboyant; Área 05 – Campinas Aveiro.

4.7. Equipamentos e técnicas utilizadas

4.7.1. Método da emanção natural de Rn

Equipamento: Detector de Radônio - Markus 10, da Gammadata.

Técnica Utilizada: Perfis de medidas com espaçamento regular entre os pontos.

Aquisição de Dados: A aquisição dos dados foi feita através da introdução no solo de uma haste de aço oca e perfurada na extremidade, à qual se conecta o equipamento Markus 10. O ar do solo é bombeado pelo equipamento e passa através de uma célula sensível ao decaimento do Rn. Após cerca de 15 minutos o *display* digital fornece o valor da concentração de radônio em KBq/m^3 – Kilo Bequerel / metro cúbico.

Processamento dos Dados: Os dados foram lançados em gráficos de Concentração de Rn VS. Distância Percorrida. Também foram lançados em planta, para determinação de possíveis estruturas. A interpolação dos dados foi feita utilizando-se o software Surfer 8.



Figura 06: medição de radônio no solo – Markus 10

4.7.2. Método Eletroresistivo

Equipamento: Terrameter - SAS 4000, fabricação sueca, ABEM.

Técnica Utilizada: Caminhamento elétrico dipolo-dipolo.

Aquisição de Dados: A aquisição de dados foi feita na área **02**, onde também foi aproveitado um levantamento tipo gradiente elétrico executado pela companhia perfuradora do poço, assim como nas áreas **04** e **05**. Na área **01**, os dados já existiam e foram levantados pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas e constam da tese de doutoramento do Prof. Dr. José Domingo Faraco Gallas (GALLAS, 2000). Na área **03**, não foi possível realizar o trabalho devido à falta de espaço e interferências diversas para realização de um caminhamento dipolo-dipolo, tendo sido aproveitado um levantamento antigo, tipo gradiente, executado pela companhia perfuradora dos poços.



Figura 07: equipamento Terrameter SAS 4000.

Processamento dos Dados: Para o processamento dos dados de resistividade foram elaboradas pseudo-seções de resistividade aparente e interpolação dos resultados com o software Surfer 8. As pseudo-seções de resistividade aparente foram modeladas com o software RES2DINV.

5. Área 01 – Usinas Piratininga

5.1. Justificativa

A área foi escolhida em virtude de possuir três poços tubulares profundos, sendo um poço com vazão de 6.400 l/h, um com vazão de 6.200 l/h e um terceiro poço improdutivo, além de possuir perfis de caminhamento elétrico dipolo-dipolo que foram utilizados para locação desses poços e estar geologicamente inserida em área de embasamento cristalino com manto de alteração pouco espesso.

5.2. Localização

A Usina Piratininga, localiza-se na zona sul de do município de São Paulo, no bairro de Santo Amaro, junto à Av. Nossa Senhora do Sabará.

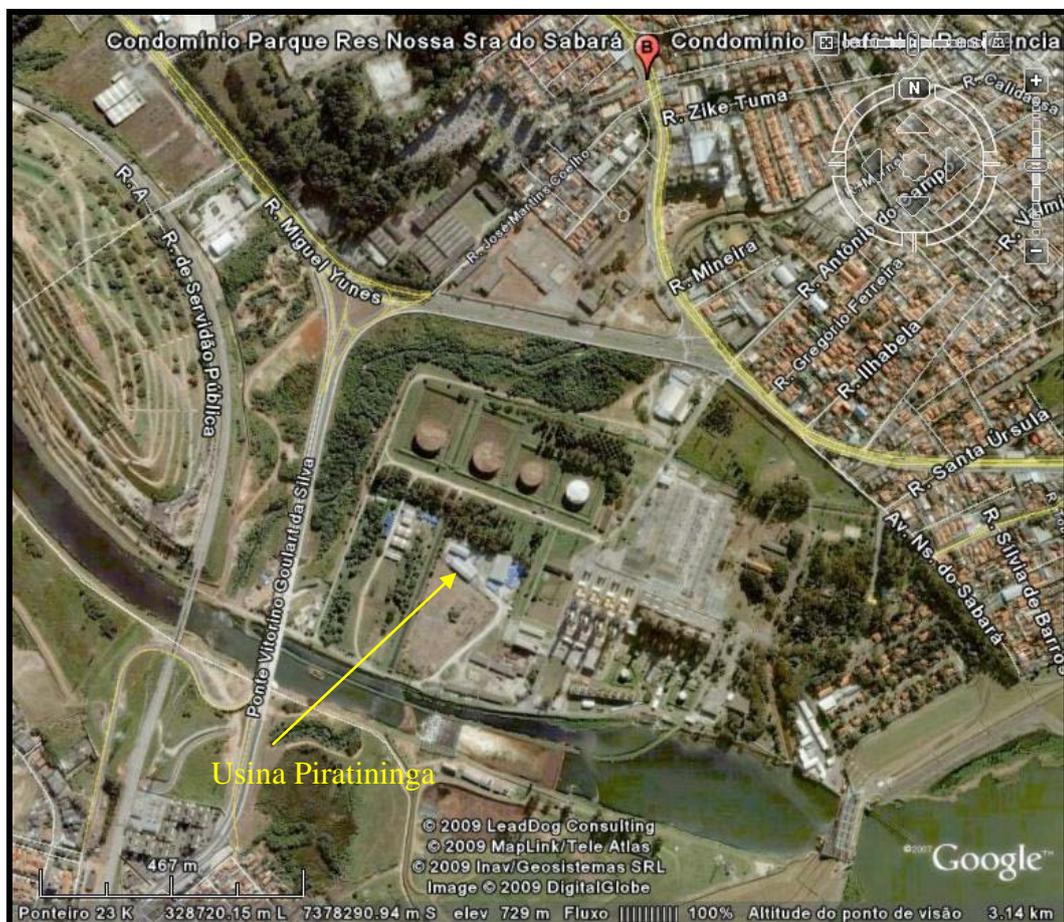


Figura 08: localização área 01 - Usina Piratininga.

5.3. Geologia Local

A geologia da área é caracterizada pelas suítes graníticas sintectônicas da Fácies Cantareira PSyC, composta por corpos foliados de textura fina – média, textura porfírica freqüente, contatos parcialmente concordantes e composição granodiorítica a granítica, conforme Mapa Geológico do Estado de São Paulo – Esc. 1:500.000.

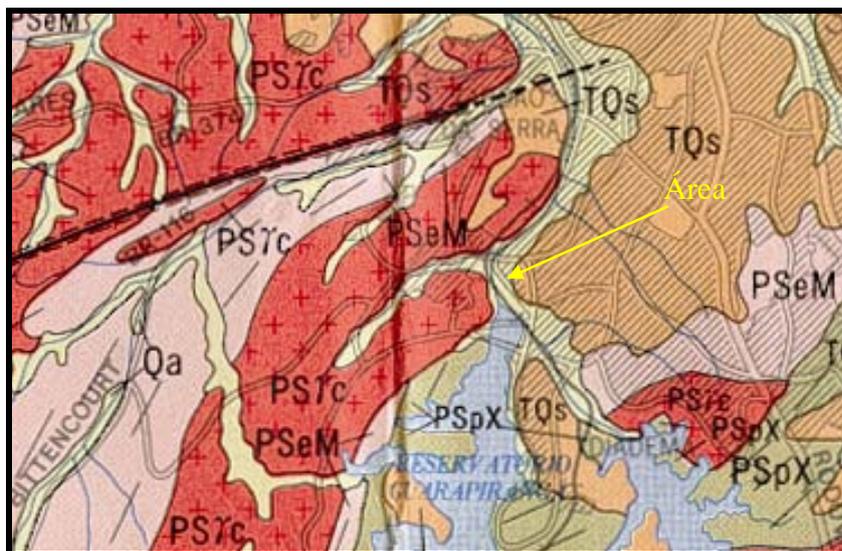


Figura 09: Mapa Geológico (Usina Piratininga).

5.4. Trabalhos Executados

Foram levantados perfis de emissão natural de Rn sobre as linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo executadas para locação dos poços. Estas linhas de caminhamento elétrico foram levantadas pelo IPT em 1997 e os dados de resistividade foram obtidos através da Tese de Doutorado do Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas.

De acordo com a nomenclatura utilizada por GALLAS (2000), a Usina Piratininga foi dividida em três áreas denominadas de Área 01, Área 02 e Área 03, sendo que em todas essas áreas foram levantados perfis de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento entre medidas igual a 20 m e 05 níveis de investigação. Ainda de acordo com o autor foram identificadas anomalias de resistividade associadas a fraturas nos seguintes locais:

Área 01 – Linha C: Poço perfurado com vazão de 6.200 l/h

Área 02 – Linha A: Poço perfurado com vazão de 6.400 l/h

Área 02 – Linha B: Sem perfuração de poço

Área 03 – Linha A: Poço improdutivo

Sobre todas estas linhas foram levantados perfis de emissão natural de radônio, com espaçamento entre medidas igual a 20 metros. Os dados foram plotados sobre as seções de resistividade, a fim de correlacionar as anomalias.



Figura 10: Usina Piratininga linhas levantadas (Rn).

5.5. Resultados – Usina Piratininga (Área 01 Linha C)

Os resultados obtidos na área da Usina Piratininga (Área 01 – Linha C), mostram uma boa correlação entre a anomalia de resistividade e o pico de emanção de radônio. O pico de emanção de (158 KBq/m^3) é coincidente com a anomalia de resistividade encontrada na posição -20 m da seção de resistividade. As anomalias de resistividade são identificadas tanto na pseudo-seção de resistividade aparente, quanto na seção modelada de resistividade.

O poço tubular perfurado neste local apresentou uma vazão de 6.200 l/h. Seu perfil litológico / construtivo apresenta 16 m de solo de alteração, revestidos com tubo de aço e cimentação sanitária e perfuração em rocha sã de composição granítica até 122 m.

O perfil de emanção natural de radônio não cobriu toda a seção de resistividade devido às atuais dificuldades de acesso no local, porém os dados cobriram a parte principal da seção onde estava a anomalia de resistividade na qual foi locado o poço.

O valor médio do *background* nesta linha é relativamente alto, cerca de 76 KBq/m^3 e a anomalia é cerca de duas vezes este valor.

A interpretação final é de que há uma zona de rocha fraturada no início da seção de resistividade, coincidente com a anomalia de emanção de radônio. Considerando um levantamento apenas com dados de emanção de radônio, o poço teria sido perfurado no mesmo local que o atual e assim o método foi considerado eficiente nesta área.

5.6. Resultados – Usina Piratininga (Área 02 Linhas A e B)

Os resultados obtidos na área da Usina Piratininga (Área 02 – Linha A e Linha B), mostram uma boa correlação entre as anomalias de resistividade e os picos de emanção de radônio.

Os dois picos de emanção de radônio (64 KBq/m^3) obtidos na linha A não são totalmente coincidentes com as anomalias de resistividade encontradas nas posições 120 – 140 m e 200 – 220 m, da seção de resistividade. Os picos ocorreram nas posições 180 m e 260 m.

Os dois maiores picos de emissão de radônio, respectivamente de (35 KBq/m³) e (42 KBq/m³) obtidos na linha B também não são totalmente coincidentes com as anomalias de resistividade encontradas nas posições 120 – 140 m e 200 – 220 m, da seção de resistividade. Os picos ocorreram nas posições 140 m e 240 m.

O poço tubular perfurado na anomalia de resistividade 120-140 m da linha A e entre os dois picos de emissão de radônio, apresentou uma vazão de 6.400 l/h. Seu perfil litológico / construtivo apresenta 08 m de solo de alteração, revestidos com tubo de aço e cimentação sanitária e perfuração em rocha sã de composição granítica até 140 m.

Apesar das anomalias não serem totalmente coincidentes, é possível observar tanto na pseudo-seção de resistividade aparentes quanto na seção de resistividade modelada que há uma clara diferença entre a porção inicial e final. No início da linha aparecem resistividades mais altas e na parte final do caminhamento aparecem resistividades mais baixas. Nesta escala de avaliação o perfil de emissão de radônio se mostrou coerente com os dados uma vez que, no início da linha os valores de emissão são baixos e aumentam na porção final.

O valor médio do *background* nestas linhas é relativamente baixo cerca de 04 a 06 KBq/m³ e a anomalia é cerca de dez vezes maior que este valor. Numa locação, apenas com os dados de emissão de radônio o poço teria sido locado em uma posição ligeiramente diferente da atual, porém dentro da zona de baixa resistividade.

Quando são lançados em planta os dados de resistividade do nível 02 de caminhamento das linhas A e B e os dados de emissão natural de radônio também obtidos nas linhas A e B, fica clara a separação em zonas de baixa resistividade e alta emissão de radônio e zona de alta resistividade e baixa emissão de radônio.

5.7. Resultados – Usina Piratininga (Área 03 Linha A)

Os resultados obtidos na Usina Piratininga – (Área 03 – Linha A), mostram uma excelente correlação entre a anomalia de resistividade e o pico de emissão de radônio. O pico de emissão (105 KBq/m³) é coincidente com a anomalia de resistividade encontrada na posição 240 m - 260 m da seção de resistividade.

Porém, o poço tubular perfurado neste local apresentou-se improdutivo. Seu perfil litológico / construtivo apresenta 12 m de solo de alteração, revestidos com tubo de aço e cimentação sanitária e perfuração em rocha sã de composição granítica até 200 m.

O valor médio do *background* nesta linha é relativamente baixo, cerca de 10 KBq/m³ e a anomalia é cerca de dez vezes maior que este valor. Numa locação, apenas com os dados de emanção de radônio o poço teria sido locado na mesma posição atual.

A anomalia encontrada na pseudo-seção de resistividade aparente não se apresenta na mesma posição que a anomalia obtida na seção modelada. Este fato ocorre porque nem sempre a seção modelada fornece os melhores resultados para interpretação.

É preciso sempre considerar a seção de dados originais, uma vez que os processos matemáticos de inversão nem sempre conduzem a um modelo correto. Os resultados de radônio comprovam, neste caso, que a interpretação da pseudo-seção de resistividade aparente é a que realmente reflete a posição da estrutura e a seção modelada desloca a mesma para um outro local.

A interpretação final é de que há uma zona de rocha fraturada, entre as posições 240 m e 260 m da seção de resistividade. O fato do poço ter se mostrado improdutivo indica que tanto o método elétrico quanto o método da emanção de radônio são capazes de identificar fraturas em subsuperfície, mas não é possível prever se estas fraturas irão conter água em quantidades passíveis de serem captadas por poços tubulares.

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO
ÁREA PIRATININGA - ÁREA 1 LINHA C

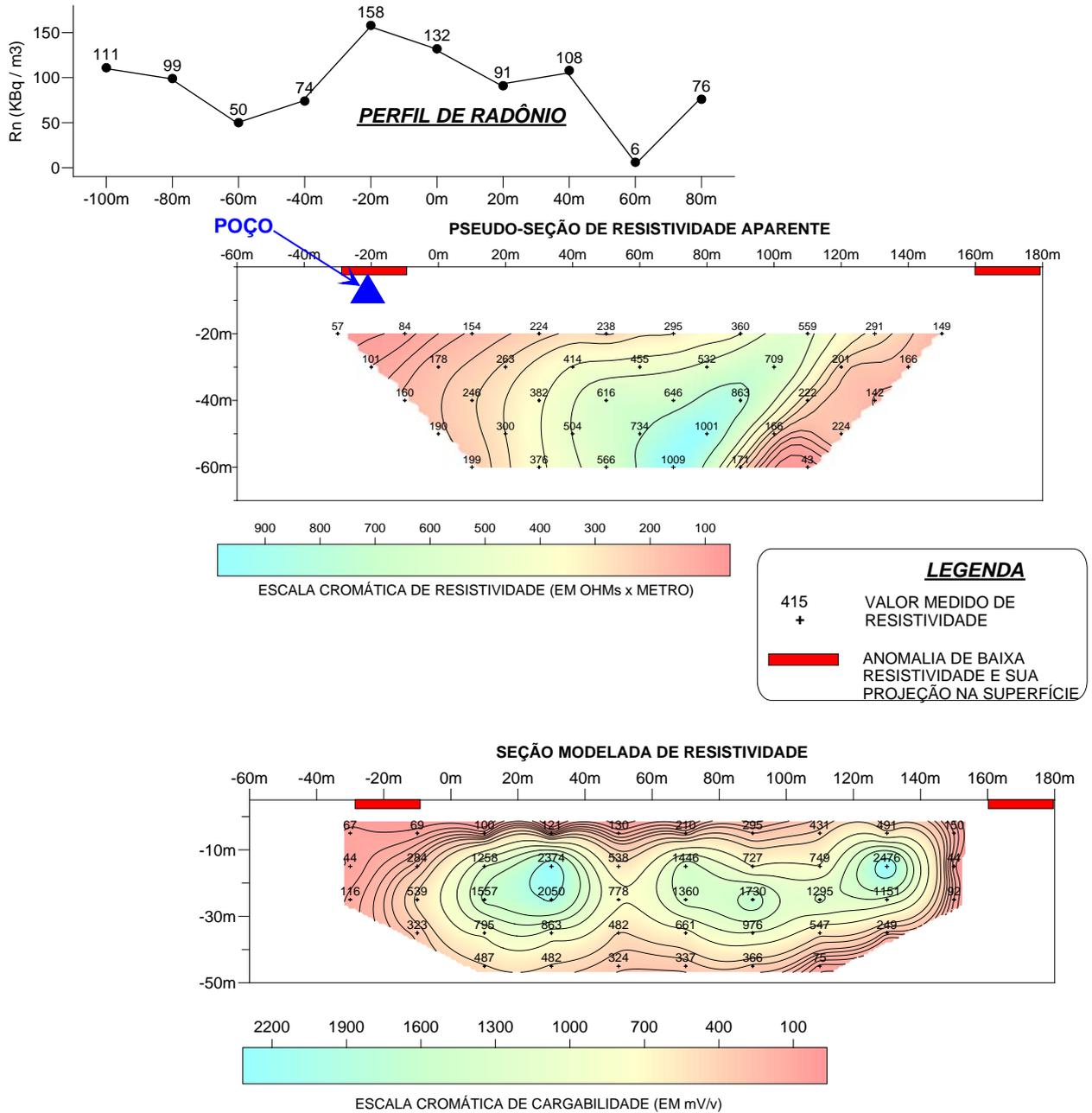


Figura 11: Resultados - Piratininga (Área 01 – Linha C)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO

ÁREA PIRATININGA - ÁREA 2 LINHA A

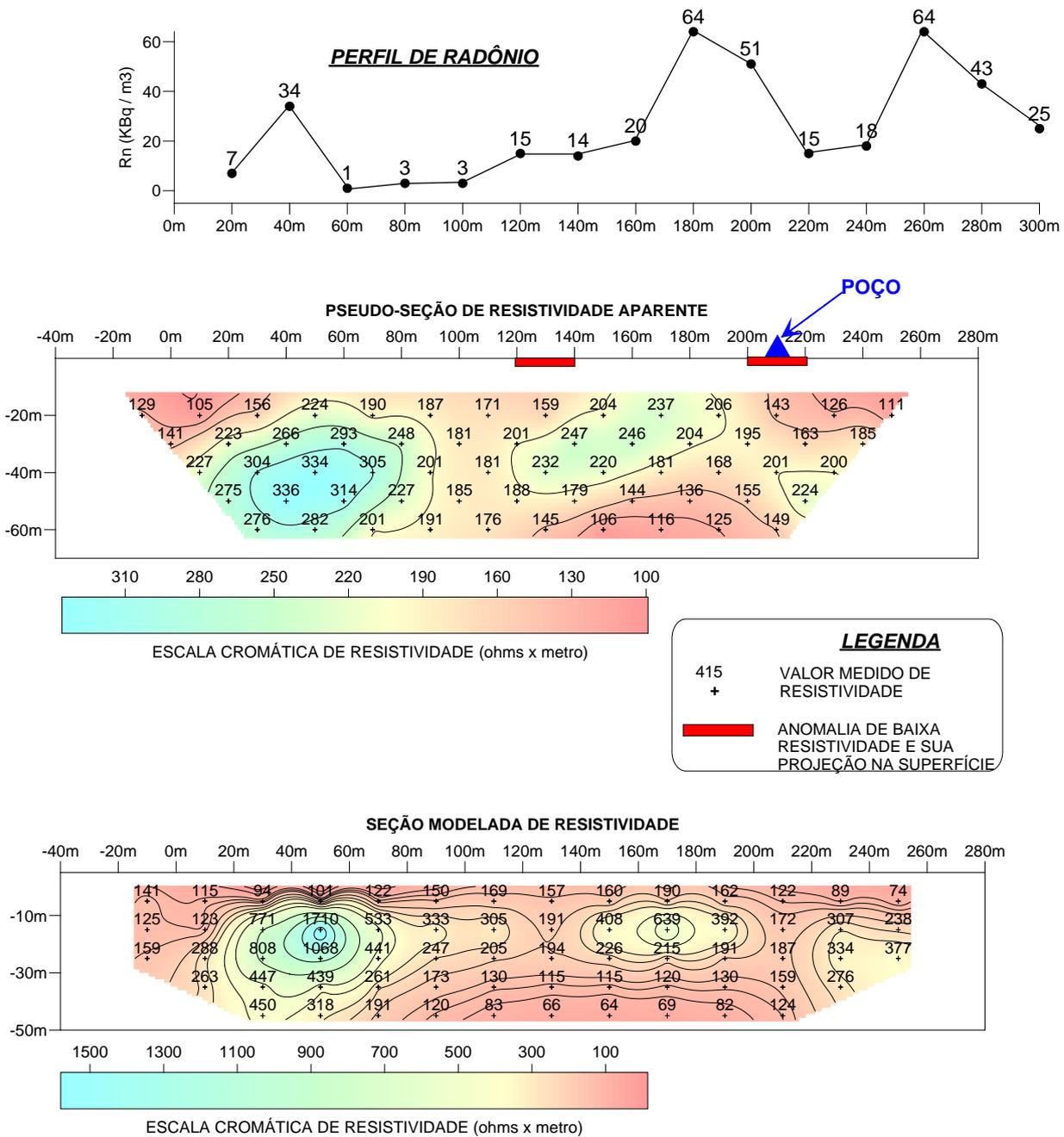


Figura 12: Resultados - Piratininga (Área 02 – Linha A)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO

ÁREA PIRATININGA - ÁREA 2 LINHA B

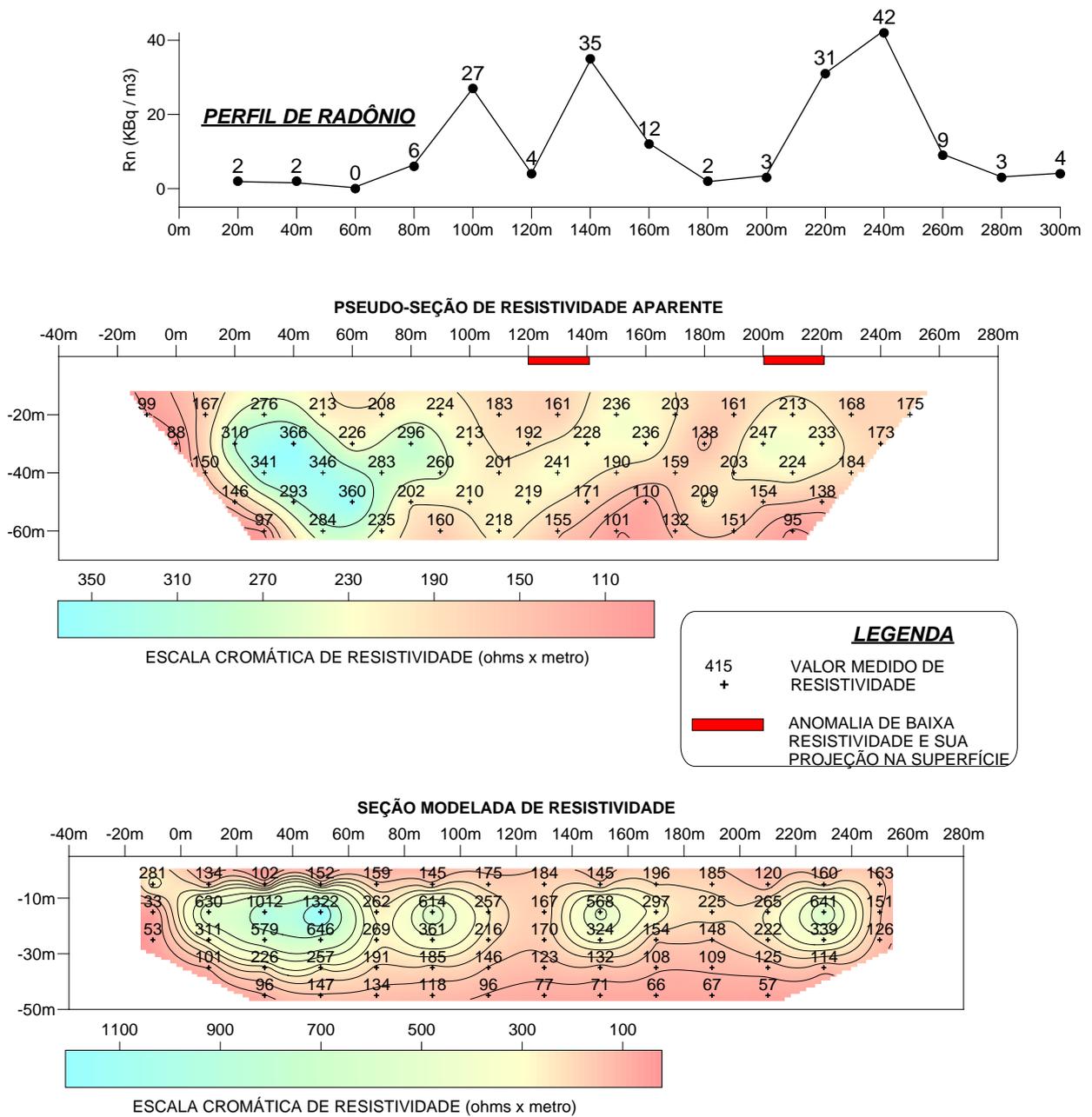
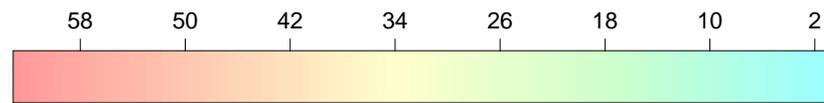
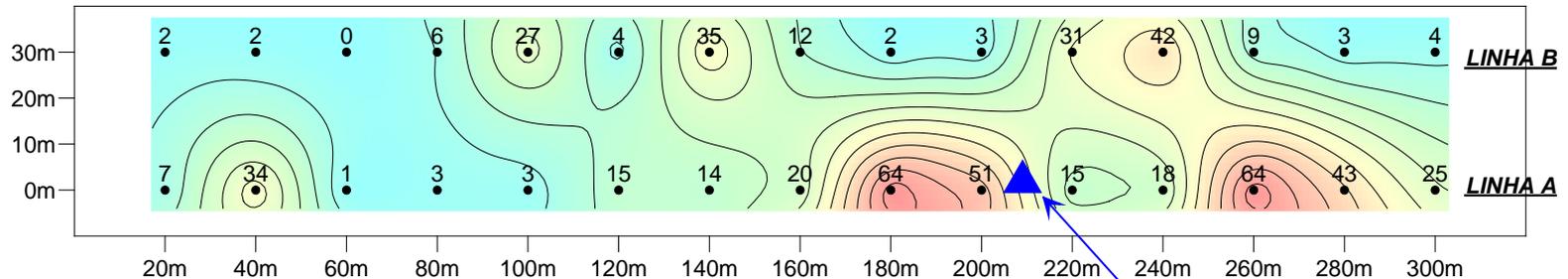


Figura 13: Resultados - Piratininga (Área 02 – Linha B)

MAPA DE RESISTIVIDADE - NÍVEL 2 DO DIPOLO-DIPOLO
 MAPA DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO

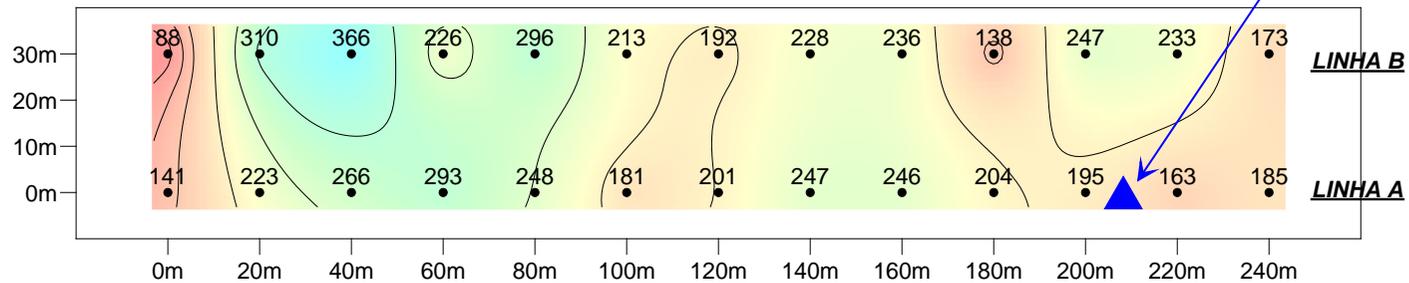
ÁREA 2 - USINA PIRATININGA

MAPA DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO



ESCALA CROMÁTICA DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO (KBq/m³)

MAPA DE RESISTIVIDADE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE (ohm x m)

Figura 14: Resultados - Piratininga (Área 02 – mapa de emanção e resistividade).

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO

ÁREA PIRATININGA - ÁREA 3 LINHA A

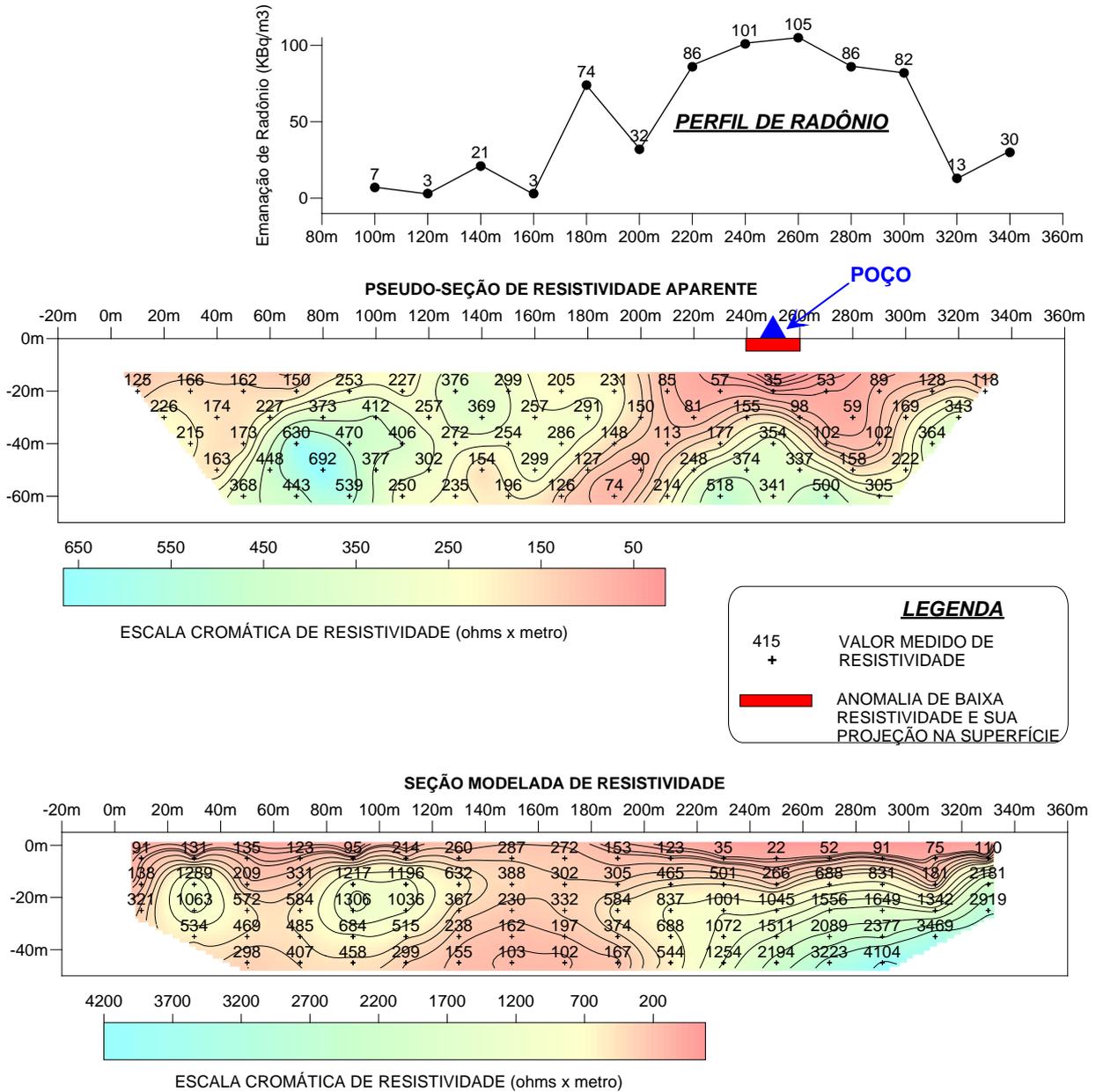


Figura 15: Resultados - Piratininga (Área 03 – Linha A)

6.3. Geologia Local

A geologia da área é caracterizada pelo Grupo Açungui – Complexo Embu, onde ocorrem migmatitos homogêneos variados, predominando os de natureza homofânica, oftalmítica e facoidal (PSeM). Conforme Mapa Geológico do Estado de São Paulo – Esc. 1:500.000.

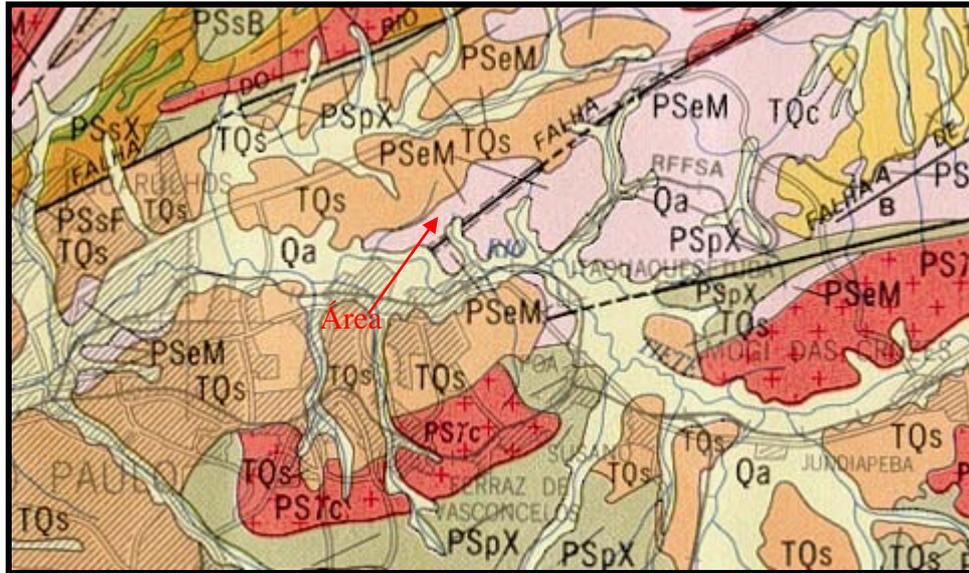


Figura 17: Mapa Geológico (Guarulhos).

6.4. Trabalhos Executados

Foi levantado um perfil de emanção de Rn, com 160 metros de extensão e pontos de medida espaçados de 20 metros.

Na mesma posição do perfil de Rn, foi levantada uma linha de caminhamento elétrico, usando-se a técnica do dipolo-dipolo com 05 níveis de investigação e espaçamento entre eletrodos de 20 metros. Os perfis foram locados na mesma posição onde, segundo a companhia perfuradora foi feito um levantamento tipo gradiente, o qual indicou uma anomalia que serviu para locação do poço.

O perfil de emanção natural de radônio foi plotado sobre a pseudo-seção de resistividade aparente e seção de resistividade modelada, a fim de correlacionar as anomalias.



Figura 18: Guarulhos – linha levantada.

6.5. Resultados

Os resultados obtidos em Guarulhos – (Área 02), mostram uma excelente correlação entre as anomalias de resistividade e os picos de emissão de radônio. Foram detectados dois picos de emissão (145 KBq/m^3) e (84 KBq/m^3), que são coincidentes com as anomalias de resistividade encontrada na posição 40 m - 60 m e na posição 100 m da pseudo-seção de resistividade.

O poço tubular perfurado nesta área apresentou uma vazão de 7.000 l/h. Seu perfil litológico / construtivo apresenta 30 m de solo de alteração, revestidos com tubo de aço e cimentação sanitária e perfuração em rocha sã de composição granítica até 150 m. Durante a perfuração observou-se que a rocha era muito fraturada gerando problemas de “caimento” de material da parede do furo para dentro do poço.

O valor médio do *background* nesta linha é relativamente baixo, cerca de 10 KBq/m³ e as anomalias são cerca de dez a quinze vezes maiores. Numa locação, apenas com os dados de emissão de radônio o poço teria sido locado na mesma posição atual.

As anomalias encontradas na pseudo-seção de resistividade aparente não se apresentam na seção modelada. Este fato ocorre quando a fonte geradora da anomalia (fratura) é próxima da superfície e relativamente estreita e/ou também devido à pequena extensão da linha de caminhamento elétrico que dados insuficientes para uma modelagem mais precisa. Não foi possível executar uma linha de caminhamento maior devido à impossibilidade de se cruzar uma via expressa de veículos, o que limitou o tamanho da seção.

A interpretação final é de que há zonas de rocha fraturada, entre as posições 40 m e 60 m e na posição 100 m da seção de resistividade. Se o poço tivesse sido perfurado em outra posição, talvez os resultados não tivessem sido tão bons para a captação de água. Considerando um levantamento apenas com dados de emissão de radônio, o poço teria sido perfurado no mesmo local que o atual.



Figura 19: Guarulhos linha levantada e instalação do resistímetro.

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO - ÁREA GUARULHOS

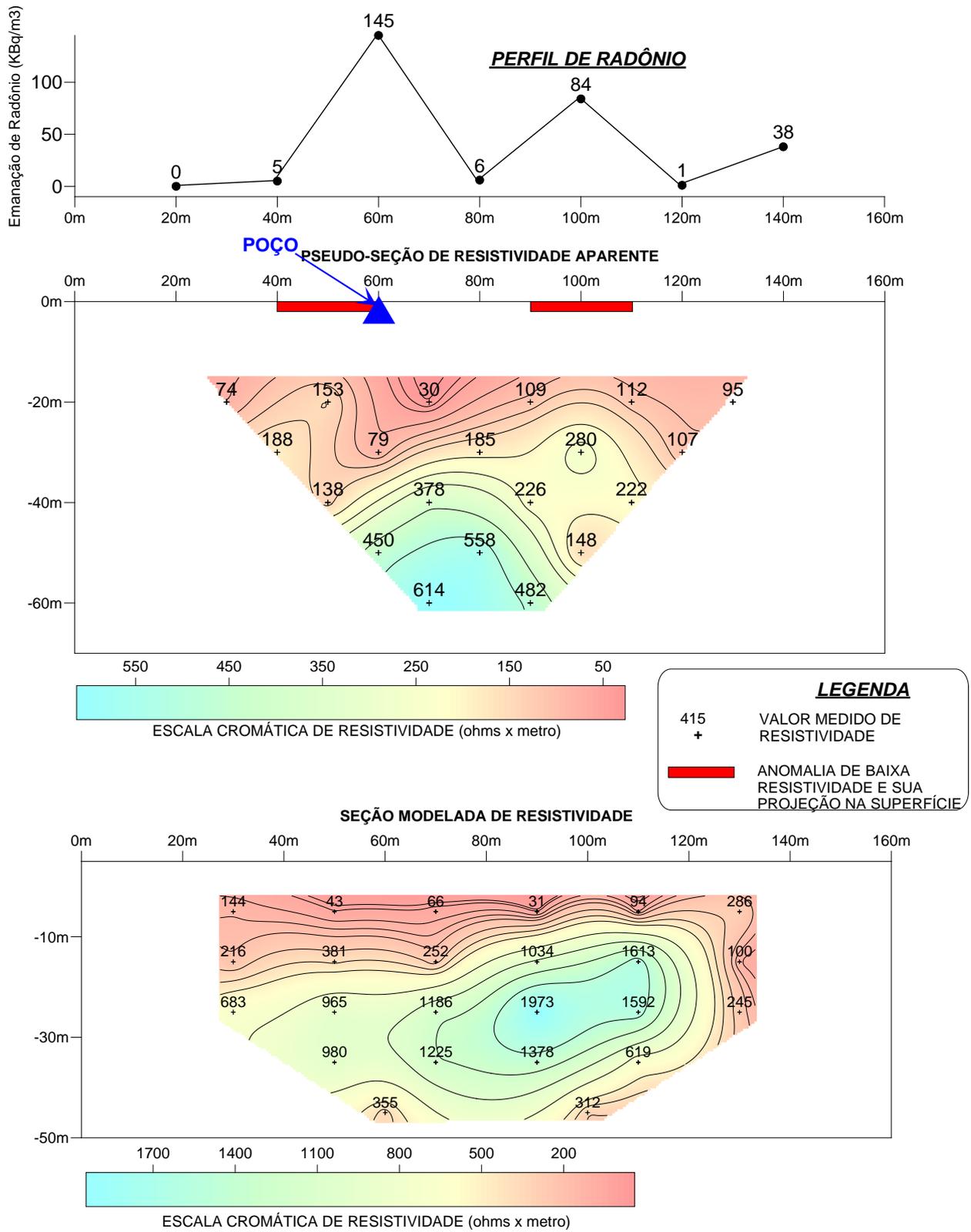


Figura 20: Resultados – Guarulhos (Área 02) .

7. ÁREA 03 – PARQUE CONTINENTAL

7.1. Justificativa

A área foi escolhida em virtude de possuir três poços tubulares profundos, com vazões de 6500 l/h, 12000 l/h e 13000 l/h – respectivamente poços P01, P02 e P03. Segundo informado pela companhia perfuradora, os poços haviam sido locados em anomalias de resistividade elétrica indicativas de zonas fraturadas, obtidas através de um levantamento eletrorresistivo tipo gradiente elétrico executado pela mesma.

7.2. Localização

O Parque Continental localiza-se na zona oeste de do município de São Paulo, divisa com o município de Osasco, próximo à Av. dos Autonomistas. Os poços estão dentro da área do Shopping Continental.



Figura 21: localização área 03 – Parque Continental.

7.3. Geologia Local

A geologia da área é caracterizada pela ocorrência de rochas de composição granítica, Fácies Cantareira (PSyC), cobertas por sedimentos fluviais (TQs) – Formação São Paulo, incluindo argilitos, siltitos, arenitos argilosos finos, e subordinadamente arenitos grossos, cascalhos, conglomerados e restritos leitos de argila orgânica.

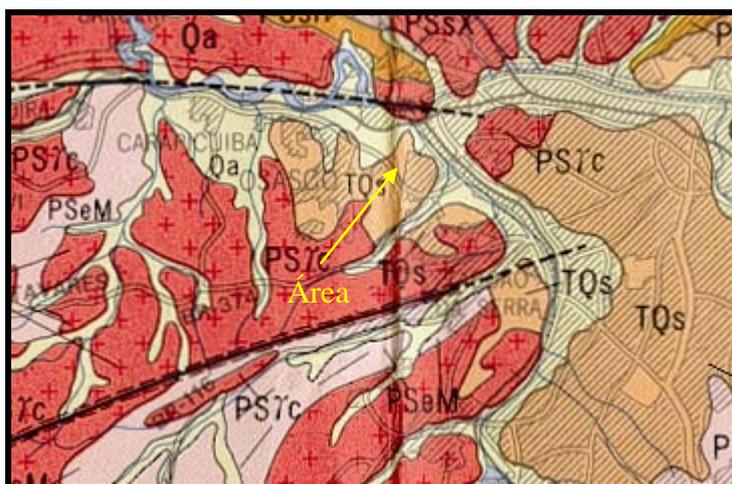


Figura 22: Mapa Geológico (Parque Continental).

A geologia da área e o perfil dos poços indicam que existe uma camada de sedimentos, Formação São Paulo, predominantemente arenosa, com espessura média da ordem de 80 metros, sobre as rochas do embasamento. A avaliação desta área ajudaria a determinar a possibilidade de aplicação do método quando há camadas mais espessas de sedimentos / solo de alteração sobre o embasamento.

7.4. Trabalhos Executados

Foram levantadas cinco linhas de emissão de Rn, com extensões variáveis em função da possibilidade de introdução da haste no solo. Os pontos de medida, em todas as linhas foram espaçados de 20 metros entre si.

Os dados de emissão natural de radônio foram plotados em planta visando a identificação de possíveis estruturas. Também foi feita uma interpolação dos dados através do software – Surfer 8, para uma melhor visualização dos resultados.

As anomalias de emissão de radônio encontradas foram correlacionadas com a posição dos poços e suas respectivas vazões, uma vez que, segundo a companhia perfuradora haviam dados de levantamento geofísico prévio que indicavam a existência de zonas fraturadas nos locais onde os poços foram perfurados.

Não foi possível obter os dados desse levantamento geofísico antigo, nem tampouco realizar um novo estudo devido às condições atuais da área que impossibilitam a realização de um novo levantamento eletrorresistivo devido à presença de diversos interferentes, aterramentos, linha de transmissão de energia, cercas, postes, entre outros.



Figura 23: Parque Continental – linhas levantadas.



Figura 24: perfil de medidas de emissão de Rn.



Figura 25: aquisição de dados de emissão de Rn com equipamento Markus 10

7.5. Resultados

Os resultados obtidos na área do Parque Continental apresentaram uma ótima correlação entre as vazões dos poços e os picos de emanção natural de Rn. Na linha 01 foi encontrado um pico de emanção de (17 KBq/m^3), na linha 02 foi encontrado um pico de emanção de (15 KBq/m^3), na linha 03 também foi encontrado um pico de (15 KBq/m^3), no perfil 04 não houve pico, mas todos os pontos obtidos foram altos e no perfil 05 foi encontrado um pico de (35 KBq/m^3).

O valor de *background* médio da área está em torno de 05 KBq/m^3 . As anomalias são fracas, cerca de três vezes o valor médio de *background*, à exceção feita para a anomalia encontrada na linha 03 que é cerca de sete vezes o valor do *background*. A menor relação entre *background* e anomalia provavelmente está relacionada com a presença uma espessa camada de sedimentos sobre o embasamento o que mascara na superfície a anomalia gerada pelo fraturamento da rocha.

Os poços P01, P02 e P03, respectivamente com vazões de 6500 l/h, 12000 l/h e 13000 l/h apresentam um perfil litológico construtivo com espessura média de 80 metros de sedimentos revestidos com filtro e pré-filtro e perfuração em rocha granítica de 80 m até 350 m.

Todos os três poços estão locados muito próximos dos picos de emanção de radônio. Os dados de emanção natural de radônio podem estar refletindo a existência de zonas fraturadas no embasamento, que apesar de mascaradas pela presença de sedimentos ainda são passíveis de serem detectadas na superfície.

**ÁREA - PARQUE CONTINENTAL
SÃO PAULO**

MAPA DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO

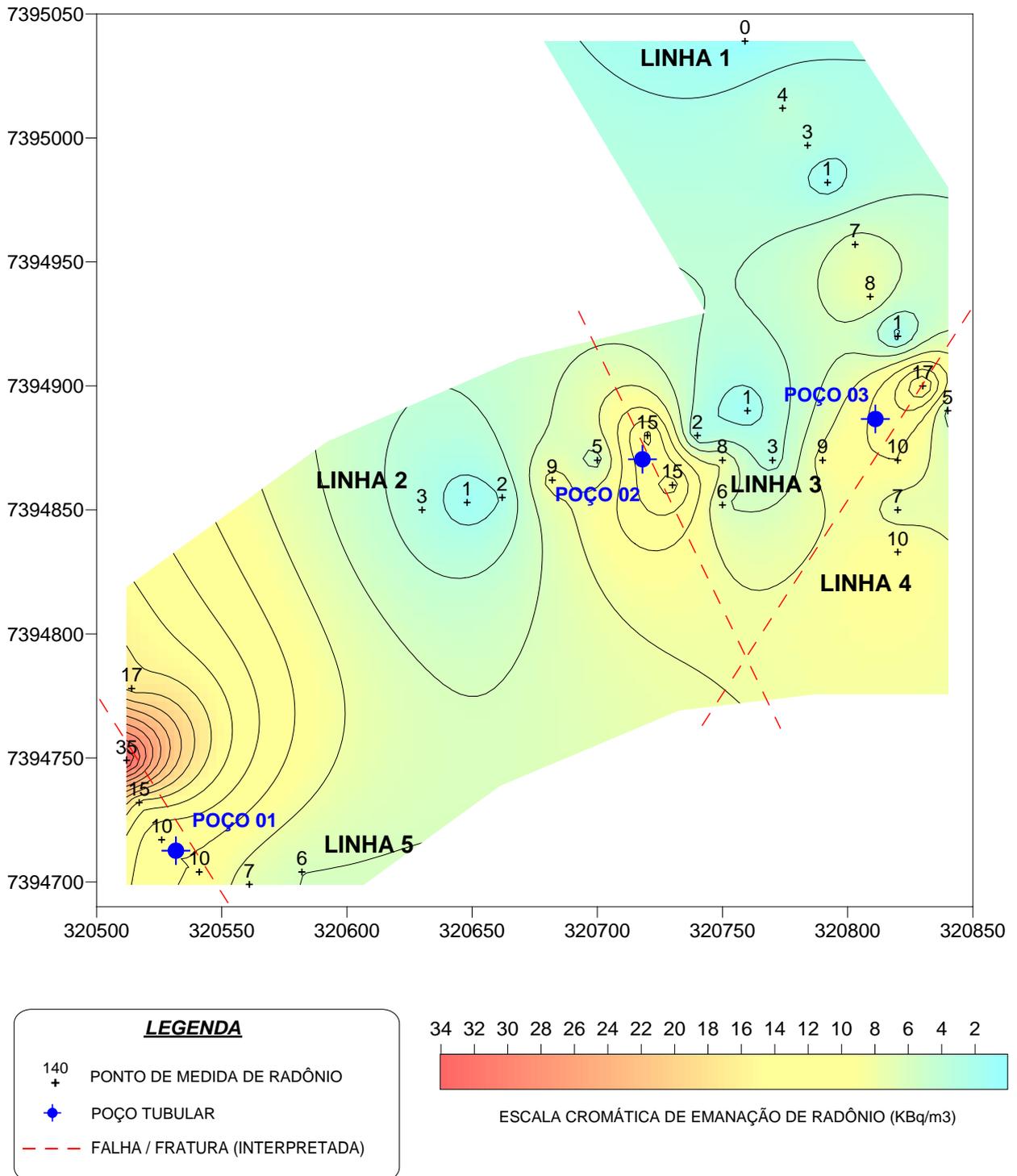


Figura 26: Resultados - Pq. Continental (Área 03 – mapa de emanação de Rn).

8.3. Geologia Local

A geologia da área é caracterizada pela ocorrência de rochas do Complexo Amparo (PLaGM), onde predominam biotita gnaisses, hornblenda-biotita gnaisses, granada-biotita gnaisses, gnaisses migmatizados, migmatitos com estruturas diversas, subordinadamente biotita xistos, quartzitos, anfibolitos, gonditos e metaultrabasitas.

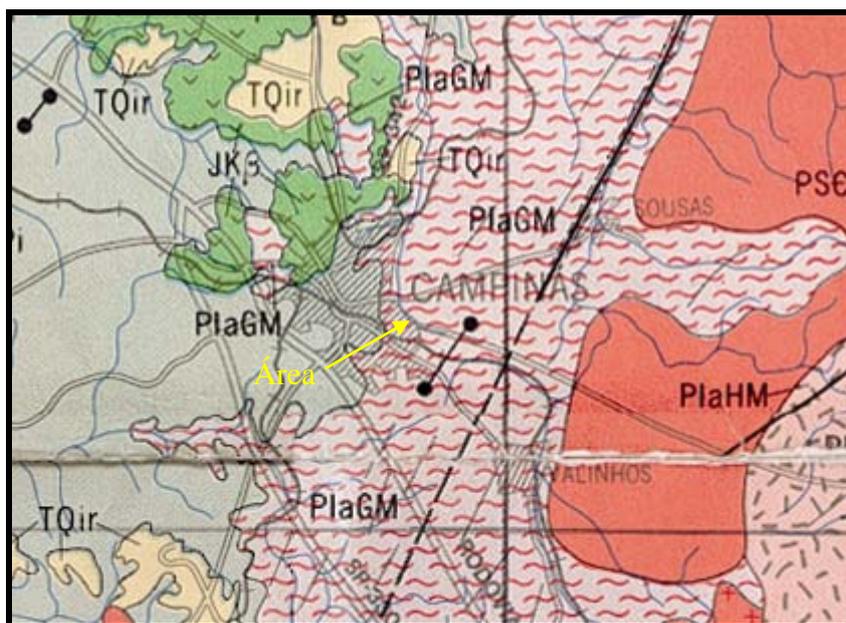


Figura 28: Mapa Geológico (Área Campinas - Flamboyant)

8.4. Trabalhos Executados

Foram levantadas duas linhas de emanção de Rn, com extensões de 220 m (LINHA A) e 180 m (LINHA B). Os pontos de medida, em todas as linhas foram espaçados de 20 metros entre si. Na mesma posição foram levantados dois perfis de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com 05 níveis de investigação e espaçamento de 20 m.

Os dados de emanção natural de radônio foram plotados sobre a pseudo-seções de resistividade aparente e seções de resistividade modelada, a fim de correlacionar as anomalias.

Foi elaborado também um mapa de emissão de radônio, com os dados obtidos nas duas linhas e um mapa de resistividade considerando o nível 02 do levantamento eletroresistivo das duas linhas, A e B.



Figura 29: Campinas Flamboyant – linhas levantadas.

8.5. Resultados

Os resultados obtidos em Campinas – (Área 04), mostram uma boa correlação entre as anomalias de resistividade e os picos de emissão de radônio. Foram detectados dois picos de emissão na linha A (70 KBq/m^3) e (54 KBq/m^3). O primeiro pico não é coincidente com nenhuma anomalia elétrica, já o segundo pico coincide com a anomalia encontrada entre as posições 220 m – 240 m da pseudo-seção de resistividade aparente.

Na linha B foi detectado um pico de emissão de Rn (39 KBq/m^3), coincidente com a anomalia de resistividade encontrada na posição 20 m da mesma linha. Uma outra anomalia encontrada na posição 160 m não apresentou correspondente nos dados de emissão de Rn.

O poço tubular perfurado na linha A está numa zona de baixa emissão de radônio e apresentou-se improdutivo. Não foi possível obter informações sobre seu perfil litológico e construtivo. O poço tubular perfurado na linha B também está numa zona de baixa emissão de radônio e apresentou uma pequena vazão de 2000 l/h, também não foi possível verificar seu perfil litológico e construtivo.

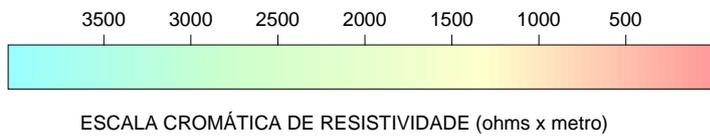
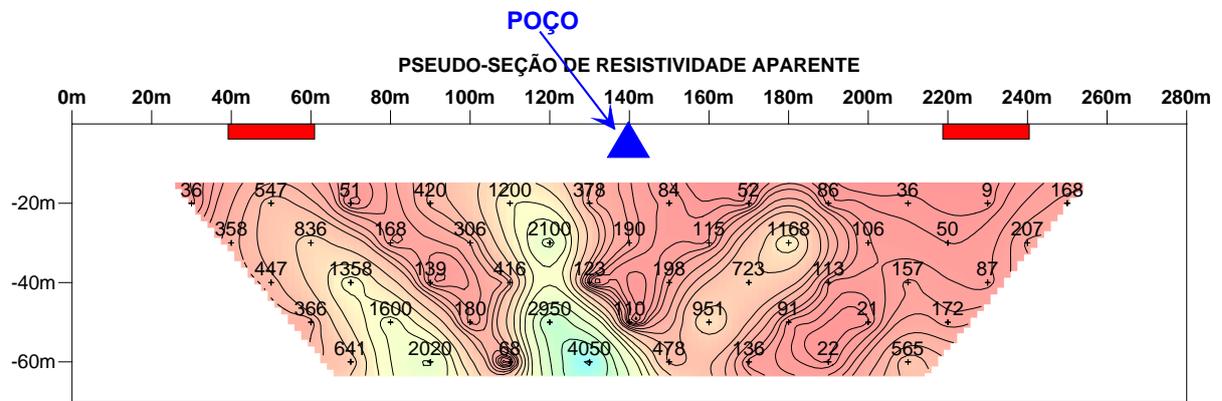
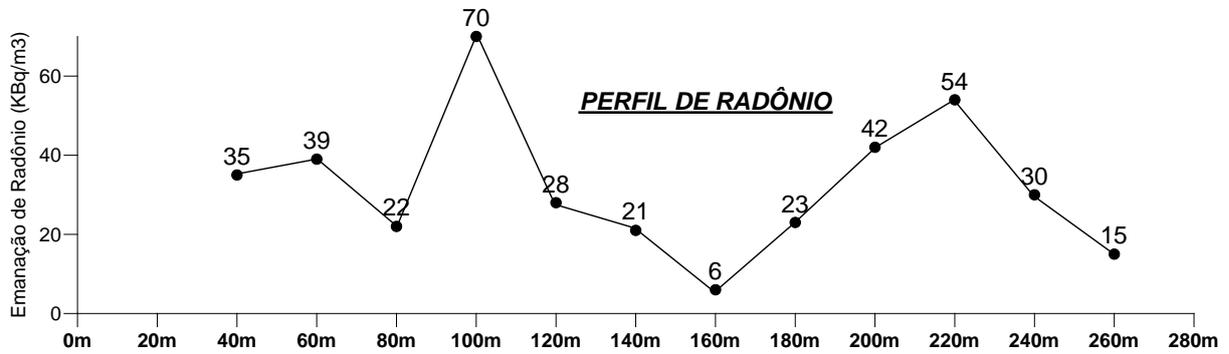
O valor médio do *background* na linha A é cerca de 20 KBq/m^3 e as anomalias são cerca três vezes maiores. Numa locação, apenas com os dados de emissão de radônio o poço teria sido locado numa posição diferente da atual e talvez o resultado tivesse sido melhor do ponto de vista possibilidade de captação de água. O poço teria sido locado na posição 100 m ou 220 m, onde estão os picos de emissão de radônio.

O valor médio do *background* na linha B é relativamente baixo, cerca de 12 KBq/m^3 e a anomalia é cerca três vezes maior. Numa locação, apenas com os dados de emissão de radônio o poço teria sido locado numa posição diferente da atual e talvez o resultado tivesse sido melhor do ponto de vista de captação de água. O poço teria sido locado na posição 40 m, onde está o pico de emissão de radônio, muito próximo de uma anomalia elétrica identificada.

Quando são lançados em planta os dados de resistividade do nível 02 de caminhamento das linhas A e B e os dados de emissão natural de radônio também obtidos nas linhas A e B, fica clara a separação em zonas de baixa resistividade e alta emissão de radônio e zonas de alta resistividade e baixa emissão de radônio.

A interpretação final é de que há uma zona de rochas mais fraturadas no final da linha A e início da linha B. Se os poços tivessem sido perfurados nestas posições, provavelmente o resultado teria sido mais positivo em relação a vazão dos mesmos. Vale ressaltar que os dados de resistividade da linha A, principalmente em sua porção inicial, ficaram prejudicados em função da presença de interferências (aterramentos).

**LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO
ÁREA CEMITÉRIO FLAMBOYANT - CAMPINAS
LINHA A**



LEGENDA

- 415 + VALOR MEDIDO DE RESISTIVIDADE
- ANOMALIA DE BAIXA RESISTIVIDADE E SUA PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE

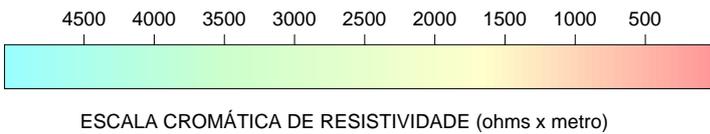
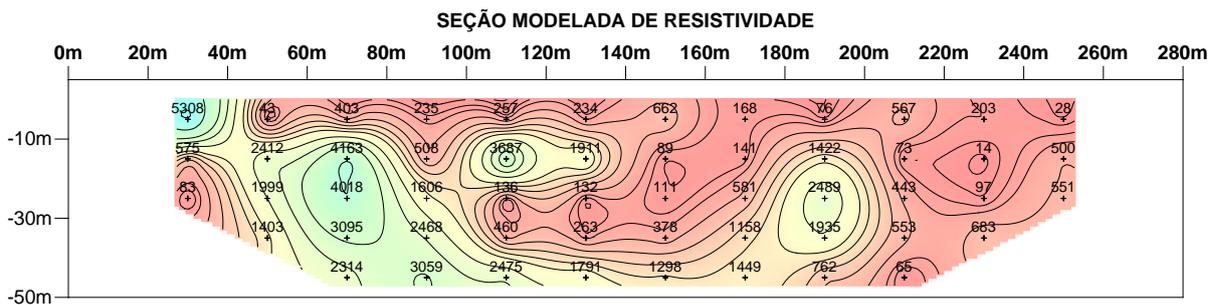
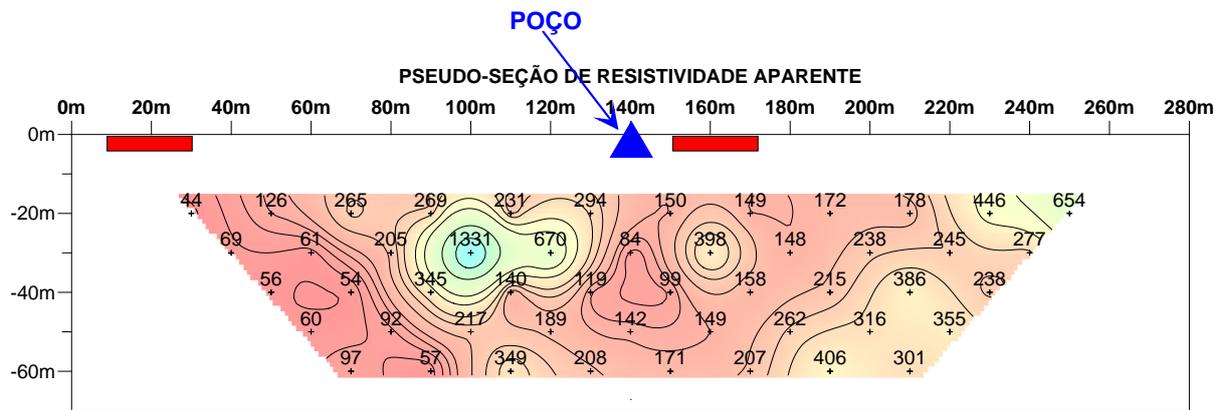
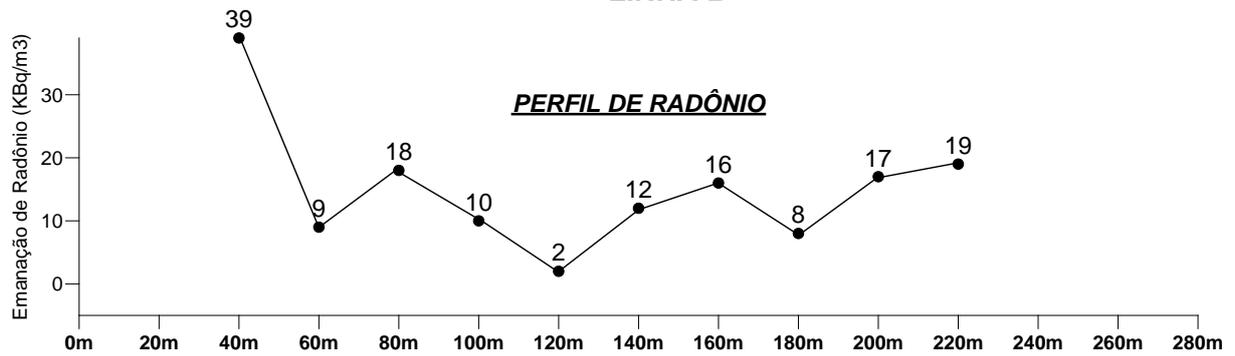


Figura 30: Resultados – Campinas (Área 04 – Linha A)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO ÁREA CEMITÉRIO FLAMBOYANT - CAMPINAS LINHA B



LEGENDA

415 + VALOR MEDIDO DE RESISTIVIDADE

ANOMALIA DE BAIXA RESISTIVIDADE E SUA PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE

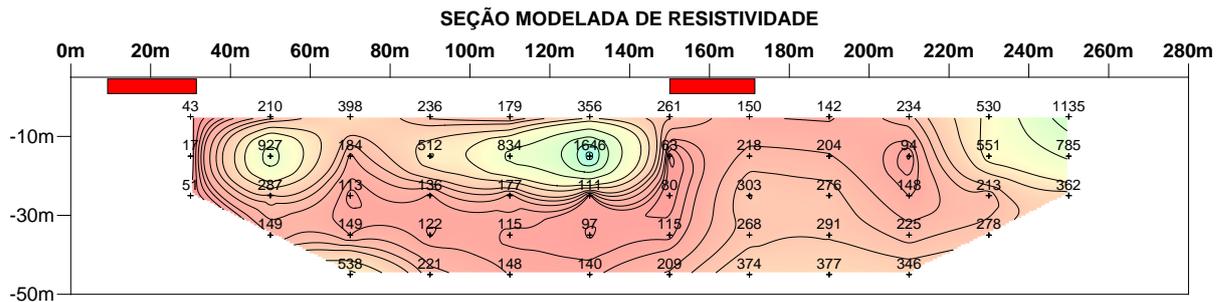


Figura 31: Resultados – Campinas (Área 04 – Linha B).

**ÁREA - CAMPINAS
CEMITÉRIO FLAMBOYANT**

**MAPA DE RESISTIVIDADE
NÍVEL 2 DO DIPOLO-DIPOLO**

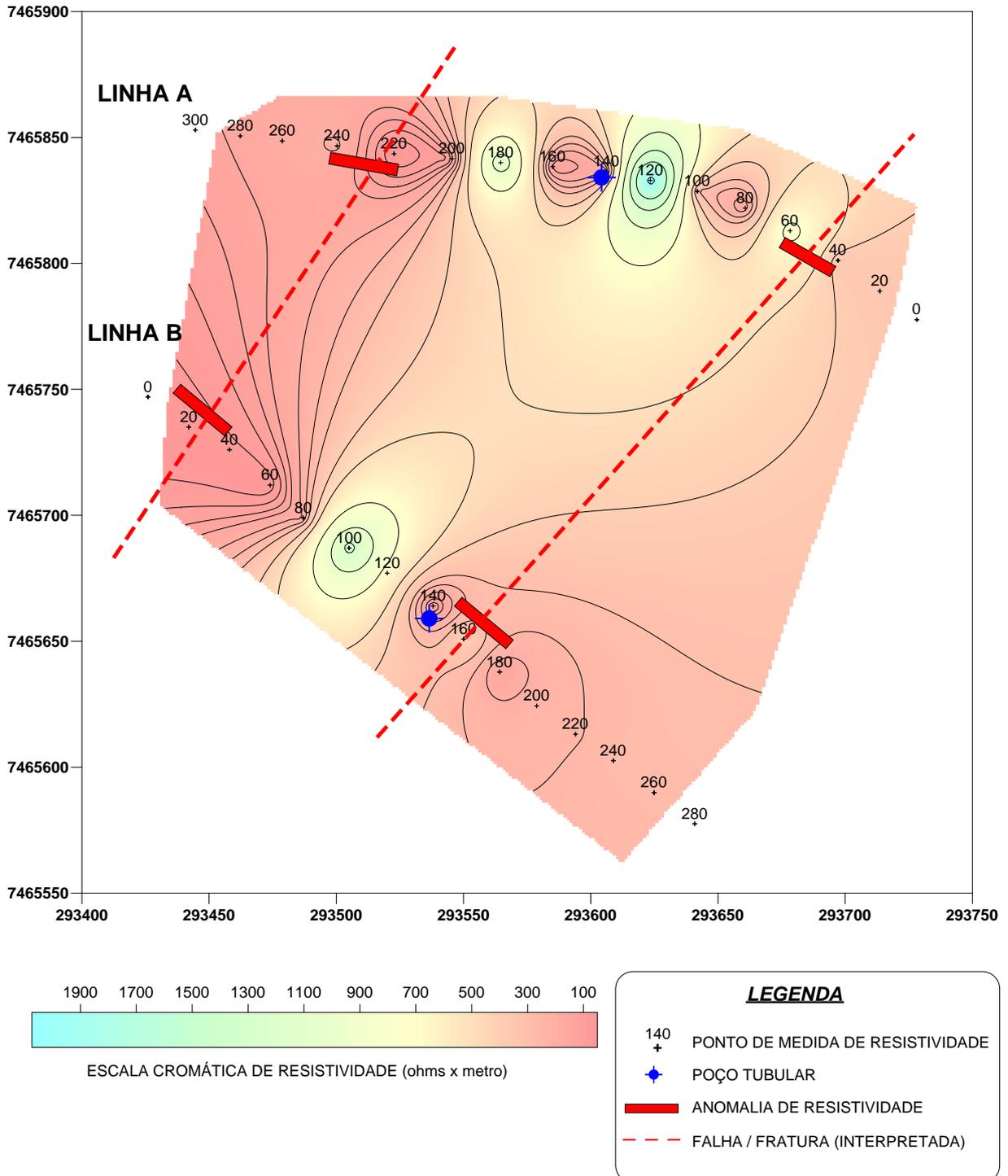


Figura 32: Resultados – Campinas (Área 04 - Mapa de Resistividade Nível 2).

**ÁREA - CAMPINAS
CEMITÉRIO FLAMBOYANT**

MAPA DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO

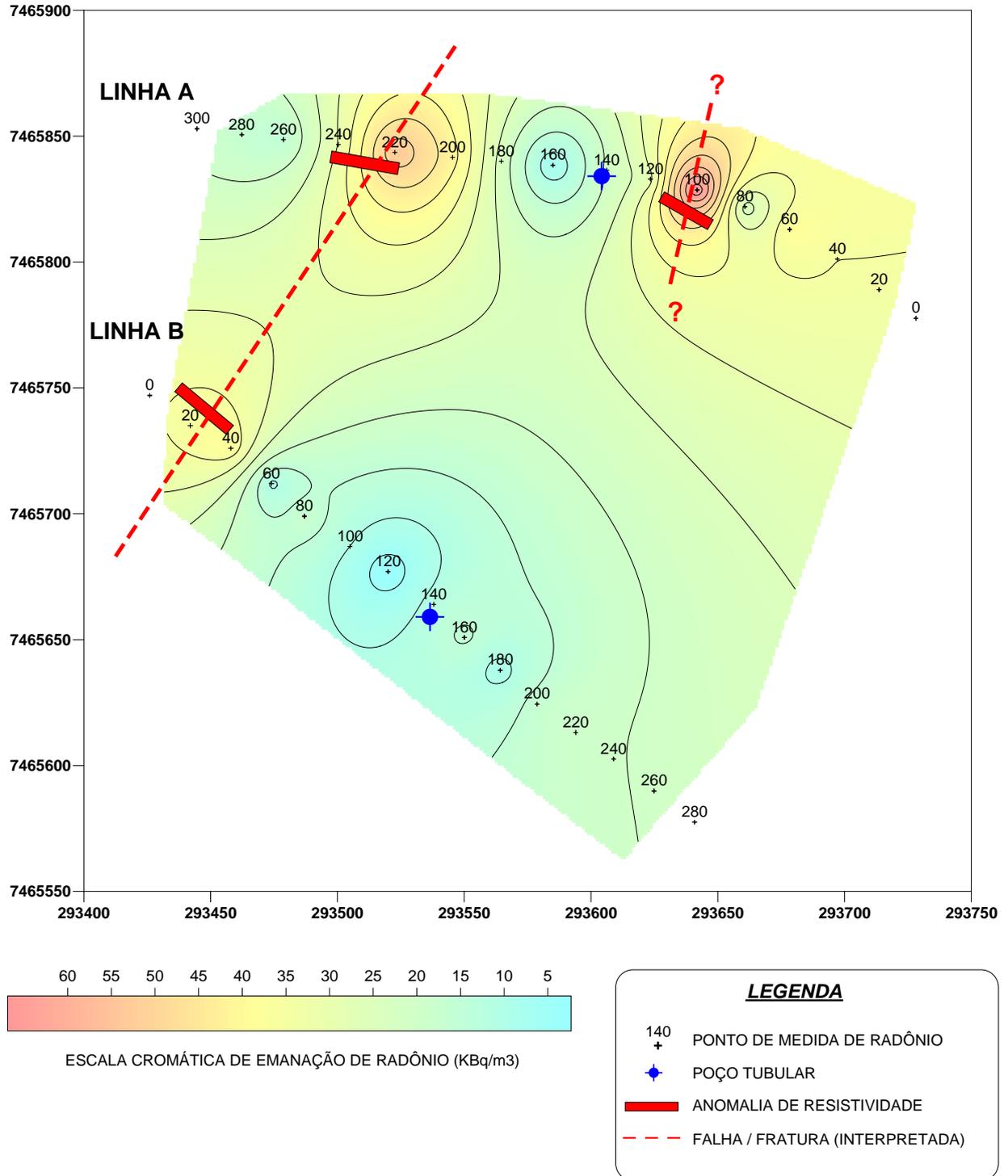


Figura 33: Resultados – Campinas (Área 04 - mapa de emanação de radônio).

9. ÁREA 05 – CAMPINAS AVEIRO

9.1. Justificativa

A exemplo da anterior, esta foi escolhida em virtude de possuir dois poços tubulares profundos, sendo porém os dois poços produtivos, e situar-se em área de embasamento cristalino com pequena espessura de manto de alteração e apresentar a possibilidade de se executar levantamento eletrorresistivo.

9.2. Localização

A área de estudo localiza-se em um sítio produtor de mudas de plantas ornamentais, no município de Campinas / SP, próximo ao anel viário e Rodovia Dom Pedro I.



Figura 34: localização área 05 – Campinas Aveiro

9.3. Geologia Local

A geologia da área é caracterizada pela ocorrência de rochas do Complexo Amparo (PLaGM), onde predominam biotita gnaisses, hornblenda-biotita gnaisses, granada-biotita gnaisses, gnaisses migmatizados, migmatitos com estruturas diversas, subordinadamente biotita xistos, quartzitos, anfibolitos, gonditos e metaultrabasitos.

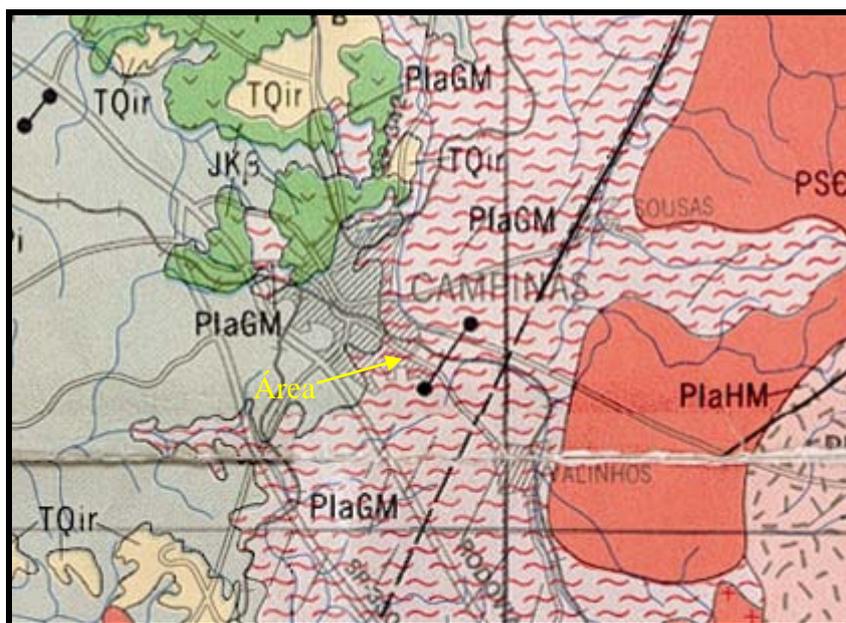


Figura 35: Mapa Geológico (Área Campinas - Aveiro)

9.4. Trabalhos Executados

Foi levantada uma linha de emanção de Rn, com extensão de 140 m. Os pontos de medida foram espaçados de 20 metros entre si. Na mesma posição foi levantado um perfil de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com 05 níveis de investigação e espaçamento de 20 m.

Os dados de emanção natural de radônio foram plotados sobre a pseudo-seção de resistividade aparente e seção de resistividade modelada, visando estabelecer correlações entre as anomalias.



Figura 36: Campinas Aveiro linha levantada

9.5. Resultados

Os resultados obtidos em Campinas – (Área 05), apresentaram uma fraca correlação das anomalias de resistividade e de emissão de radônio. Não foram detectados picos expressivos de emissão, os valores mais altos foram (33 e 34 KBq/m^3), sendo que o valor médio do *background* foi (20 KBq/m^3). Uma anomalia elétrica foi detectada no início da linha.

Apesar de não terem sido detectados picos expressivos de emissão, é possível observar uma variação no padrão de emissão, que é irregular no início do caminhamento, onde ocorrem altos e baixos de emissão e onde foram detectados os dois maiores valores, até a posição de 80 m. A partir deste ponto a emissão fica estável variando de (23 a 26 KBq/m^3).

Quando se observa a pseudo-seção de resistividade aparente vê-se claramente uma zona anômala, de baixa resistividade no início da linha, que se correlaciona com o padrão de emanção irregular do radônio. Esta anomalia elétrica não é observada na seção modelada de resistividade em função de sua localização próxima do início do levantamento e, por conseguinte, o volume de dados ser insuficiente para a modelagem adequada.

Os poços tubulares perfurados nesta área estão no limite entre a zona de padrão irregular de emanção de radônio e de baixa resistividade. Não foi possível obter informações sobre o perfil litológico e construtivo dos poços, porém suas vazões são baixas, entorno de 1000 l/h.

A interpretação final é de que talvez haja uma zona de rochas mais fraturadas no início da linha de caminhamento. Não é possível afirmar, uma vez que não foram detectados picos de emanção de radônio e a anomalia elétrica não é muito conclusiva. É possível que se os poços tivessem sido perfurados mais próximos das posições iniciais da linha de caminhamento o resultado teria sido mais positivo em relação à vazão dos mesmos.

**LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE EMANAÇÃO DE RADÔNIO
ÁREA AVEIRO - CAMPINAS**

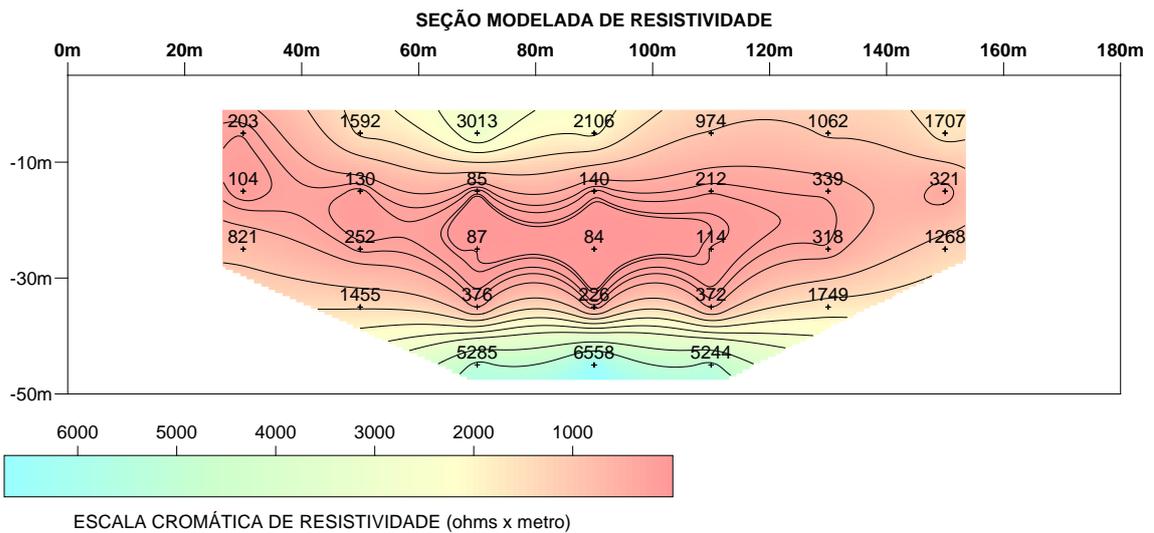
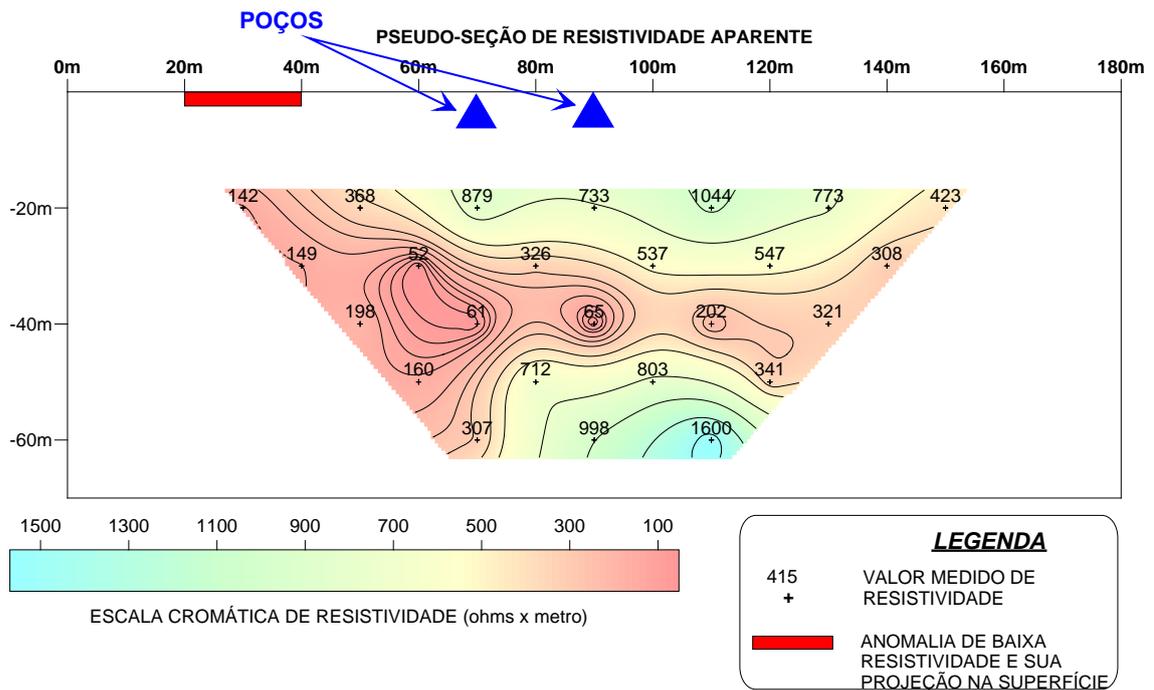
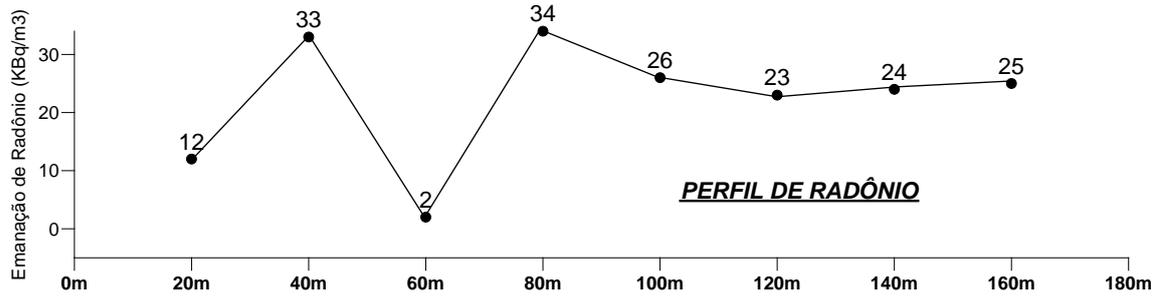


Figura 37: Resultados – Campinas (Área 05)

10. CONCLUSÕES

Os métodos de prospecção de água subterrânea podem ser divididos em dois principais grupos: Métodos de Prospecção Regional e os Métodos de Prospecção de Detalhe.

Os métodos de prospecção regional são baseados na interpretação de foto aérea, imagens de satélite e aerogeofísica visando a elaboração de mapas de lineamentos estruturais, de isofrequência de juntas, litoestruturais e lineamentos magnéticos que ao serem cruzados podem gerar um mapa de probabilidades.

Os métodos de prospecção de detalhe são baseados nas variações das propriedades físicas do subsolo e são fundamentalmente divididos em eletrorresistivos e eletromagnéticos.

Alguns trabalhos recentes têm procurado, na medida do possível, conciliar as técnicas de prospecção regional com as técnicas de prospecção de detalhe para uma melhor probabilidade de acerto.

A correta aplicação de um determinado método ou técnica deve levar em consideração os condicionantes geológicos e os fatores externos que podem influenciar nos resultados.

A metodologia aqui apresentada para mapeamento de aquíferos fraturados mostrou-se bastante eficiente, uma vez que as correlações entre as anomalias de emanção de Rn, as anomalias geoeletricas e os dados de vazão dos poços foi, de uma forma geral, muito boa.

A emanção natural de radônio é uma técnica de prospecção de detalhe, que pode ser aplicada em regiões onde outros métodos não são passíveis de aplicação, como em áreas urbanas altamente povoadas.

Assim como acontece com todos os demais métodos de prospecção de água subterrânea, a emanção natural de radônio deve ser usada com critério, podendo ser uma ferramenta auxiliar para outros métodos ou mesmo uma ferramenta única para regiões onde outros métodos não possam ser aplicados devido à presença de interferências externas, devendo ser respeitadas as condições adequadas para sua aplicação.

A metodologia apresentada atingiu os objetivos – ser capaz de identificar zonas fraturadas para locação de poços em áreas urbanas. Porém, a identificação de zonas fraturadas não garante o sucesso da perfuração do poço, já que é impossível

determinar previamente as vazões associadas ao fraturamento ou mesmo a simples presença de água nestas fraturas.

Para detecção de zonas fraturadas recomenda-se a execução de perfis de caminhamento, com espaçamento entre medidas o mais detalhado possível. No presente trabalho foi usado espaçamento de 20 metros, um bom detalhe. No entanto, espaçamentos menores podem ser utilizados para uma maior precisão.

Os dados devem ser avaliados em perfis de Concentração VS. Distância Percorrida, visando identificar os picos de emanção e sua posição no terreno. Havendo a possibilidade de execução de mais de uma linha de caminhamento, ou mesmo uma malha de medidas, os dados devem também ser lançados em planta, sendo traçadas linhas de isovalores de emanção.

Não existem valores absolutos que caracterizam uma anomalia. A mesma deve ser comparada relativamente ao *background* da área. De acordo com os resultados do presente trabalho, podem seguramente ser considerados como anomalias valores pelo menos duas a três vezes maiores que a média do *background*.

Como proposta de continuidade de pesquisa, sugere-se estudos detalhados de fraturamentos e zonas de falhas conhecidas. Também indica-se a exploração de novas possibilidades de aplicação da emanção natural de radônio, tais como mapeamento de contatos geológicos e identificação de rochas ricas em urânio, bem como estudos relacionados à habitação e saúde humana evitando construções sobre áreas de elevada emanção, entre outras possibilidades.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPARAO, A., SIVARAMA, R. S., SUBRAHMAYA, V. S. Depth of Detection of Buried Resistive Targets With Some Electrode Arrays in Electrical Prospecting. In *Geophysical Prospecting*, v.45, p.365-75, 1997.

BARKER, R. D. Depth of Investigation of Collinear Symmetrical Four-electrode Arrays. In *Geophysics*, v.54, n° 8, 31-37 p. 1989.

BRENHA, R. F. Processos de Difusão de Radônio e Sua Aplicação na Previsão de Atividade Sísmica e Vulcânica. Dissertação de Mestrado. Instituto Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo. 1981.

CARRASQUILLA, A.; PORSANI, M. J.; TAVARES, A. Prospecção de Águas Subterrâneas no Alto Xingu – Pará – Com Métodos Geofísicos Eletromagnéticos. In *Revista Brasileira de Geociências*, v. 27 (3), 221 – 228 p. 1997.

CAVALCANTE, I. N. Estudo Hidrogeológico de Terreno Cristalino com Manto de Intemperismo – Áreas Piloto Atibaia SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 123p. 1990.

DEMÉTRIO, J. G. A. Perfis de Temperatura na Locação de Poços Tubulares no Cristalino do Nordeste Brasileiro – Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 98p. 1998.

EDWARDS, L. S. A. Modified Pseudo-Section for Resistivity and Induced-Polarization. In *Geophysics*, v.3, p.78-95. 1977.

EVANGELISTA, T. M., VENEZIANI, P., MENDONÇA, A. S. F., TEIXEIRA, E. C. Avaliação de Etapas Intermediárias de Técnicas de Sensoriamento Remoto Aplicada à Pesquisa de Água Subterrânea em Relação ao Seu Produto Final. In *Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, 395-403p. 1998.

GALLAS, J. D. F. Principais Métodos Geoelétricos e Suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental, Tese de Doutorado – UNESP (Rio Claro), 174p. 2000.

GALLAS, J. D. F. Prospecção de Água Subterrânea em Aquíferos Cristalinos Com o Emprego de Métodos Indiretos, In *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, 24 (1/2), 43-51p. 2003.

GUNDERSEN, L. C. S. Radon in Sheared Metamorphic and Igneous Rock. In *Field Studies of Radon in Rocks, Soil, and Water*. U.S. Geological Survey Bulletin, 39-49 p.1995.

GUNDERSEN, L. C. S. The Geology and Geochemistry of Soils in Boyertown and Easton, Pennsylvania. In *Field Studies of Radon in Rocks, Soil, and Water*. U.S. Geological Survey Bulletin, 51-62 p.1995.

GUNDERSEN, L. C. S.; SCHUMANN, R. R.; OTTON, J. K.; DUBIEL, R. F.; OWEN, D. E.; DIKINSON, K. A. Geology of Radon in the United States. In *Gates, A. E. et al., Geologic Controls of Radon*. Geologic Society of America – Special Paper 271: 1-16. 1992.

HENRY, M. E.; KAEDING, M. E.; MONTEVERDE, D. Radon in Soil Gas and Gamma-Ray Activity of Rocks and Soils at the Mulligan Quarry, Clinton, New Jersey. In *Field Studies of Radon in Rocks, Soil, and Water*. U.S. Geological Survey Bulletin, 65-75 p. 1995.

HIODO, F. Y.; PORSANI, J. L.; ELIS, V. R. Técnicas Nucleares Usadas na Localização de Zonas Fraturadas nos Granitos de Itu. In *Revista Brasileira de Geofísica*, v.20, n.2, 129-134p. 2003.

INCEÖZ, M.; BAYKARA, O.; AKSOY, E.; DOGRU, M. Measurements of Soil Gas Radon in Active Fault Systems: A Case Study Along the North e East Anatolian Fault System in Turkey. In *Radiation Measurements*. v.41 349-353 p. 2006.

KING, C. Y.; WALKINGSTICK, C.; BASLER, D. Radon in Soil Gas Along Active Faults in Central California. In *Field Studies of Radon in Rocks, Soil, and Water*. U.S. Geological Survey Bulletin, 77-79 p. 1995.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:500.000. 1981.

MADRUCCI, V. Prospecção de Água Subterrânea em Terrenos Cristalinos Utilizando-se Análise Integrada de Dados Sensoriamento Remoto, Geofísicos e Técnicas de

Geoprocessamento, Região de Lindóia, SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 226p. 2004.

MARQUES, R. M. Utilização do VLF (Very Low Frequency) na Prospecção de Água Subterrânea em Zonas de Rochas Cristalinas. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 62 p. 1995.

MEDEIROS, W. E. de, & LIMA, O. A. L. de, Origem do Potencial Elétrico Espontâneo em Rochas Cristalinas Fraturadas e Sua Utilização na Locação de Poços. In *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 17 (2,3), 104-116 p. 1999.

ONE, C. Emanometria de Gás Radônio das Séries Radioativas Naturais, na Prospecção de Água em Fraturas de Rochas, Metodologia e Instrumentação. Trabalho de Graduação II. Instituto Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo. 1998.

PARASNIS, D. S. Principles of Applied Geophysics – 4^a edição, Chapman & Hall, 429p. 1986.

PARISOT, E. H. As Águas Subterrâneas no Centro Oeste do Município de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 92p. 1983.

REBELO, A. M. A.; BITTENCOURT, A. V. L.; MANTOVANI, L. E. Modelos de Exalação de Radônio em Paisagens Tropicais Úmidas Sobre Granitos. In *Boletim Paranaense de Geologia*. n 52. p. 61-76 – Editora UFPR. 2003.

REIMER, G. M. Simple Techniques For Soil-Gas and Water Sampling For Radon Analysis. In *Field Studies of Radon in Rocks, Soil, and Water*. U.S. Geological Survey Bulletin, 19-22 p. 1995.

SIGRID, A. B.; OWEN, D. E.; SCHUMANN, R. R. A Preliminary Evaluation of Environmental Factors Influencing Day-to-Day and Seasonal Soil-Gas Radon Concentrations. In *Field Studies of Radon in Rocks, Soil, and Water*. U.S. Geological Survey Bulletin, 23-31 p. 1995.

SIQUEIRA, J. B; CAVALCANTE, I. N.; REIS, A. V. G. Aplicação do Sensoriamento Remoto para Locação de Poços Tubulares. In *Revista de Geologia*. v 15, 141-150 p. 2002.

SHERIFF R. E. Geophysical Methods – Prentice Hall, 605 p. 1989.

TELFORD, W. M. Applied Geophysics – Cambridge University Press 860p.1990

USGS – United States Geological Survey. The Geology of Radon. 1995. Disponível em <http://energy.cr.usgs.gov/radon/>. Acesso em 30 de maio de 2008.