



REGISTRO DE RADÔNIO EM SOLOS E ROCHAS DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE, RS, COMO GUIA PARA A PROSPECÇÃO DE ÁGUA.

Porto Alegre, dezembro/2015.

GLAUBER MINSEN GIULIANI

**REGISTRO DE RADÔNIO EM SOLOS E ROCHAS DO MUNICÍPIO DE
PORTO ALEGRE, RS, COMO GUIA PARA A PROSPECÇÃO DE ÁGUA.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Jaqueline Ozorio Chies

Supervisor: Ari Roisenberg

Porto Alegre, 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Giuliani, Glauber Minssen

Registro de radônio em solos e rochas do município de Porto Alegre, RS, como guia para a prospecção de água . / Glauber Minssen Giuliani. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015. [65 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es):Jaqueline Ozorio Chies

Coorientador(es):Ari Roisenberg

1. Hidrogeologia 2. Radônio 3. Aquífero fraturado 4. Água subterrânea I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Veleida Ana Blank CRB 10/571

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “REGISTRO DE RADÔNIO EM SOLOS E ROCHAS DO MUNICÍPIO DE PORTO ALEGRE, RS, COMO GUIA PARA A PROSPECÇÃO DE ÁGUA.” elaborado por “Glauber Minssen Giuliani”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Dr. Ana Maria Xavier

Prof. Dr. Norberto Dani

Prof. Dr. Teresinha Guerra

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Silvia e Robispirre, pelo apoio incondicional, ao meu irmão Jonathan e aos demais familiares.

À minha orientadora Jaqueline Ozorio Chies e ao meu supervisor de monografia e também orientador de pesquisa Ari Roisenberg pelo companheirismo, amizade, conhecimento, experiência e atenção dada a mim.

Aos meus colegas de pesquisa Paulo Henrique Stefano, Ana Júlia Bregolin e Matheus Santos pelas saídas de campo e atividades conjuntas em laboratório. Aos demais colegas de geologia que em algum momento me apoiaram na elaboração do estudo.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em especial ao Zildete Rocha e à Dr. Ana Maria Xavier pelo fornecimento do equipamento medidor de radônio utilizado no trabalho. Ao Professor Dr. Léo Hartmann pelo empréstimo do gamaespectrômetro. Ao Professor Dr. Norberto Dani pela colaboração no tratamento de dados do trabalho.

Aos meus amigos pelos momentos de descontração e amizade.

RESUMO

O presente trabalho compreendeu inicialmente o estudo petrográfico de lâminas delgadas e a interpretação de imagens sombreadas de relevo em fotografias de satélite, que forneceram elementos para a escolha de uma área-piloto na região do Município de Porto Alegre. A posterior análise desta área-piloto em fotografias aéreas permitiu a seleção de quatro lineamentos tectônicos contidos no Granito Viamão e no Granito Santana, com o objetivo de avaliar a variação na concentração de radônio ao longo de perfis transversais às estruturas. Os trabalhos de campo envolveram a utilização de equipamento SARAD mod. RTM 1688, analisando-se as concentrações de radônio em 17 pontos, tendo sido tomadas no total 102 medidas com teores de radônio compreendidos entre 896 e 12.952 Bq/m³. Nos mesmos pontos, foram realizadas determinações de concentração de urânio por gamaespectrometria, utilizando o equipamento RS-125 e obteve-se uma variação entre 1.6 e 3.1 ppm. Em todos os quatro lineamentos selecionados observou-se que o maior valor de concentração de radônio coincidiu com a linha principal da fratura tectônica. Contudo, os valores de gamaespectrometria não apresentaram um comportamento consistente que determinasse o mesmo padrão. Desta forma, os resultados obtidos demonstraram sua eficiência para detectar zonas de maior emanção de radônio e o método analítico pode ser considerado como eficaz para mapear lineamentos em áreas urbanas, onde os métodos geofísicos possuem limitada eficácia, em razão das edificações e diferentes tipos de modificações do terreno. Pode-se apontar, portanto, que possui potencial como guia para locação de poços de água subterrânea em sistemas de aquíferos fraturados.

Palavras-chaves: Hidrogeologia; Radônio; Aquífero fraturado; Água subterrânea.

ABSTRACT

The present work comprised initially the petrographic study of thin plates and the interpretation of images shaded relief in satellite photographs, which provided the elements for the choice of a pilot area in the region of the Municipality of Porto Alegre. The subsequent analysis of this pilot area of aerial photographs allowed the selection of four tectonic lineaments contained in Granite Viamão and Granite Santana, with the objective to of evaluating the variation in the concentration of radon along transversal profiles to structures. The field work involved the use of equipment SARAD mod. RTM 1688, analyzing the concentrations of radon in 17 points, having been taken in total 102 measures with radon levels between 896 and 12.952 Bq/m³. On the same points were made determinations of concentration of uranium by gamma spectrometry, using the RS-125 equipment and it was obtained a variation between 1.6 and 3.1 ppm. In all four selected lineaments, it was observed that the higher value of radon concentration coincided with the main line of the tectonic fracture. However, the values of gamma spectrometry did not present a consistent behavior that would determine the same pattern. In this way, the results obtained demonstrated its efficiency to detect areas of greater emanation of radon and analytical method can be regarded as effective to map lineaments in urban areas, where the geophysical methods have limited effectiveness, by reason of the constructions and different types of modifications of the terrain. It can be pointed out, therefore, that has potential as a guide for the lease of underground water wells in systems of fractured aquifers.

Key words: Hydrogeology; Radon; Fractured aquifer; Underground water.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Localização de Porto Alegre.....	14
Figura 2 - Mapa geológico do Município de Porto Alegre.....	16
Figura 3 - Decaimento radioativo do ^{238}U	17
Figura 4 - Equipamento RTM 1688.	25
Figura 5 - Equipamento RTM 1688 e acessórios para o uso no solo.....	26
Figura 6 - Gamaespectrômetro RS-125.	28
Figura 7 – Imagem com iluminação de azimute 90°	36
Figura 8 - Imagem com iluminação de azimute 90° e seus lineamentos traçados.....	37
Figura 9 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 90°	38
Figura 10 - Imagem com iluminação de azimute 180°	39
Figura 11 - Imagem com iluminação de azimute 180° e seus lineamentos traçados. ..	40
Figura 12 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 90°	41
Figura 13 - Imagem com iluminação de azimute 270°	42
Figura 14 - Imagem com iluminação de azimute 270° e seus lineamentos traçados. ..	43
Figura 15 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 270°	44
Figura 16 - Imagem com iluminação de azimute 360°	45
Figura 17 - Imagem com iluminação de azimute 360° e seus lineamentos traçados. ..	46
Figura 18 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 360°	47
Figura 19 - Anaglifo gerado.	49
Figura 20 - Anaglifo com as estruturas traçadas e a indicação das escolhidas para a elaboração dos perfis.	50
Figura 21 - Perfil Bento Gonçalves, seus respectivos pontos e lineamento.....	52
Figura 22 - Mapa estatístico de valores de concentração de radônio no Perfil Bento Gonçalves.....	53
Figura 23 - Perfil Lomba do Pinheiro e seus respectivos pontos.	54
Figura 24 - Mapa estatístico dos valores de concentração de radônio no Perfil Lomba do Pinheiro.	55
Figura 25 - Perfil Morro da Polícia e seus respectivos pontos e lineamento.....	56
Figura 26 - Mapa estatístico dos valores de concentração de radônio no Perfil Morro da Polícia.....	58
Figura 27 – Localização dos pontos no Perfil Arquidiocese e o lineamento.....	59
Figura 28 - Mapa estatístico de valores de concentração de radônio no Perfil Arquidiocese.....	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	19
Tabela 2	52
Tabela 3	55
Tabela 4	57
Tabela 5	60

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.2.1 Hipóteses	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo geral	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO	13
3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	16
4. O RADÔNIO E SEU COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO	17
5. PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFEROS FRATURADOS ..	21
6. METODOLOGIA.....	22
6.1 Análises Petrográficas	23
6.2 Identificação e seleção dos lineamentos	24
6.3 Medidas de radônio.....	24
6.4 Medidas de radiação gama.....	27
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
7.1 Petrografia das unidades graníticas	28
7.1.1 Granito Santana.....	28
7.1.2 Granito Viamão	30
7.1.3 Granito Independência	32
7.1.4 Granito Ponta Grossa.....	34
7.2 Resultados – Identificação dos lineamentos.....	35
7.3 Análises de radônio e urânio nos perfis selecionados.	51
7.3.1 Perfil Bento Gonçalves	51
7.3.2 Perfil Lomba do Pinheiro	54
7.3.3 Perfil Morro da Polícia.....	56
7.3.4 Perfil Arquidiocese.....	59
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

O uso da água e a busca de novos reservatórios vêm se apresentando cada vez maiores e mais corriqueiros na atualidade. Em regiões predominantemente granitóides, como o caso do Município de Porto Alegre, os aquíferos fraturados apresentam-se como reservatórios de grande importância, uma vez que fornecem significativa quantidade de água. O fornecimento de água a partir desses aquíferos se dá através de recarga meteórica possibilitando a exploração de água que circula nas fraturas das rochas. Contudo, neste ambiente percolam outras substâncias também, como o elemento radônio.

O radônio é um gás nobre que se origina a partir do decaimento radioativo da série do urânio e é conhecido como o maior emissor de radiação natural pelo fato de, à temperatura ambiente, ser gasoso. Altas concentrações deste elemento, tanto no solo como no ar, podem estar diretamente relacionadas a lineamentos tectônicos, falhas e fraturas pelas quais, através de um alívio de pressão, o gás escapa pelos vazios e sobe à superfície. Nesse sentido, medidas de concentrações de radônio podem ser uma ferramenta para a prospecção de aquíferos fraturados, visto que, se uma anomalia positiva de radônio for detectada, provavelmente haverá algum tipo de lineamento ou fratura que poderá possivelmente armazenar água.

Medir a emissão natural de radônio a partir da utilização de equipamentos poderá comprovar uma alta probabilidade de sucesso na busca de novos reservatórios de água em zonas cristalinas fraturadas. Neste âmbito, este método seria facilitador devido à sua praticidade, principalmente, nas zonas urbanas onde métodos geofísicos usados sofrem com a falta de espaço e interferências diversas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente estudo tem um retorno importante à sociedade, pois há implicações diretas na área temática de hidrogeologia. Os resultados permitirão avaliar a efetividade do registro de radônio em terrenos fraturados, estabelecendo-se correlações entre a distribuição deste gás nos solos e a localização de lineamentos tectônicos. Desta forma, considerando-se que a locação de poços tem como uma de suas premissas a localização de lineamentos, havendo correlações positivas entre os lineamentos e a concentração de radônio nos solos será possível obter uma melhor previsibilidade do sucesso da técnica prospectiva na região alvo. Este estudo, caso as hipóteses sejam confirmadas, será de grande valia para a necessidade de novos aquíferos fraturados cujo ambiente apresente pequenos espaços físicos ou áreas altamente urbanizadas onde métodos geofísicos tradicionais possam ser afetados por ruídos ou interferências externas.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A partir desta pesquisa, busca-se compreender de quão confiável é o método de emanção natural de radônio no mapeamento de fraturas e na prospecção de água em sistemas de aquíferos cristalinos fraturados.

1.2.1 Hipóteses

As hipóteses, a partir das premissas como: a) As rochas da área alvo são ricas em urânio, e sabendo que o mesmo decai para o radônio, a área alvo apresenta altos teores de radônio; b) O radônio é um elemento gasoso e devido a isso, tende a percolar entre as discontinuidades da rocha. Uma vez que neste tipo de sistema de aquífero a água está nas fraturas, o radônio estará junto à água; As hipóteses são as seguintes:

1.1.1. A - Onde houver alta concentração de radônio, haverá alto potencial para prospecção de água.

1.1.1. B - Onde houver pequena concentração de radônio, haverá pequeno potencial para prospecção de água.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é verificar a variação da concentração de radônio no solo ao longo de perfis cuja direção é transversal às fraturas tectônicas selecionadas em uma área-piloto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar se os maiores valores de concentração de radônio coincidem com a fratura tectônica.

- Validar este método para mapear fraturas em áreas nas quais os lineamentos não estejam evidentes na imagem de satélite ou na fotografia aérea, em virtude da existência de edificações ou terraplanagem na área.

- Fornecer elementos mais seguros para servir de guia para locação de poços de água subterrânea em aquíferos ígneos ou metamórficos fraturados.

2. LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

Porto Alegre, capital do Estado do Rio Grande do Sul, está inserida na região metropolitana homônima. Apresenta como municípios limítrofes Canoas, Cachoeirinha, Alvorada, Viamão e Nova Santa Rita. Sua borda oeste é banhada pelo Lago Guaíba. Abaixo, a figura 1 mostra a localização do Município de Porto Alegre no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Figura 1 - Localização de Porto Alegre



Fonte: Schneider *et al* (1974).

Porto Alegre está situada na região nordeste do Escudo Sul Riograndense e inserido no chamado Batólito de Pelotas (Fragoso-César *et al.*, 1986), cujas injeções e evolução estão diretamente relacionadas ao Ciclo Brasileiro. Nesta região predominam rochas granitóides de composição variada, com pequena incidência de rochas básicas e intermediárias. Além disso, são individualizados diques ácidos e, em menor quantidade, dioríticos (Philipp, 1995).

As rochas granitóides que ocorrem no Município de Porto Alegre pertencem às suítes Dom Feliciano e Viamão, tendo sido individualizada seis unidades litoestratigráficas (Philipp, 1995): Gnaisse Porto Alegre, Granito Independência, Granito Viamão, Granito Canta Galo, Granito Santana e o Granito Ponta Grossa. O Granito Viamão e o Granito Independência fazem parte da suíte Viamão e os granitos restantes fazem parte da suíte Dom Feliciano.

O Gnaisse Porto Alegre foi, inicialmente, definido como migmatitos homogêneos (Schneider *et al.*, 1974). Posteriormente, em 1998, foi denominado como Gnaisse por Philipp (1998). Trata-se de um ortognaisses de composição monzogranítica a granodiorítica com termos tonalíticos. Estes corpos

aparecem, frequentemente, como xenólitos com dimensões desde centímetros até hectômetros nos Granitos Independência e Viamão.

O Granito Independência está localizado em áreas elevadas de Porto Alegre e apresenta uma forma elíptica com orientação de alongamento principal à direção NE. Composicionalmente é dominado por sienogranitos e monzogranitos. Já o Granito Viamão é a mais aflorante unidade da região do Município de Porto Alegre, possuindo afinidade cálcio-alcalina e exibindo por mega-fenocristais orientados de feldspato potássico.

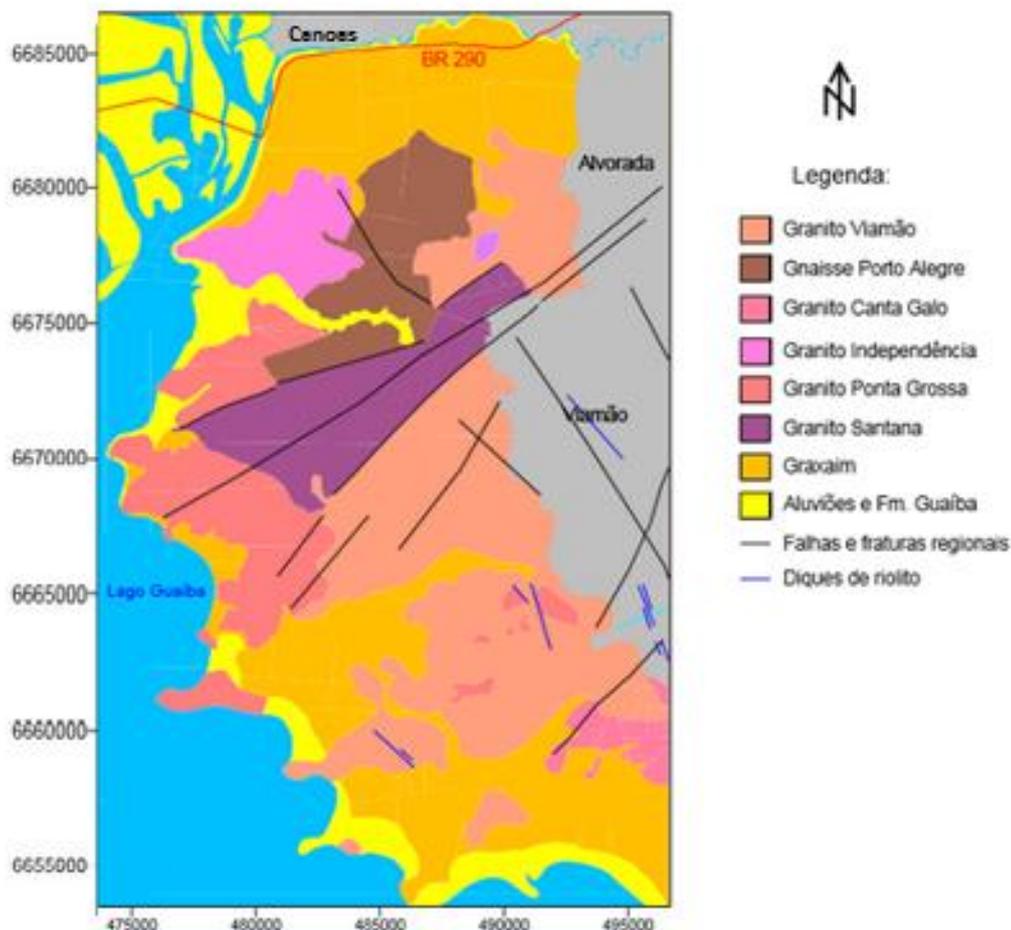
Por sua vez, o Granito Santa Galo ocorre na porção sul-sudeste do município e é representado por um corpo elíptico com alongamento na direção NE. Possui um manto de alteração muito espesso, e, devido a isso, apresenta relativamente poucos afloramentos na área em estudo. Apresenta, em quase toda sua extensão, uma estrutura maciça.

O Granito Santana, com posicionamento controlado por uma zona de cisalhamento de direção NE, constitui a principal feição estrutural e geomorfológica da região de Porto Alegre, sendo caracterizado por forte foliação magmática. Expressa forte alinhamento dos cristais. Composicionalmente, o Granito Santana é um peritita-granito a sienogranito.

Por fim, o Granito Ponta Grossa é representado por pequenos corpos com características similares que permitem a inclusão dos mesmos em uma mesma unidade litoestratigráfica. Apresenta estrutura maciça e uma composição sienogranítica.

Abaixo na figura 2, dando ênfase às litologias do município de Porto Alegre, podemos notar as seis diferentes litologias citadas e seus contatos. Também visualizando a imagem, a geografia do município ganha destaque em relação às cidades limítrofes como Canoas, Alvorada e Viamão e com o Lago Guaíba.

Figura 2 - Mapa geológico do Município de Porto Alegre.



Fonte: Modificado de Fianco (2011).

3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Dois sistemas de aquíferos ocorrem no Município de Porto Alegre. O Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano e o Sistema Aquífero Poroso Cenozóico. O Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano ocupa aproximadamente 65% da área do município, constituindo aquíferos descontínuos (Roisenberg, 2001; Roisenberg *et al.*, 2003.) O sistema apresenta uma elevada heterogeneidade hidrogeológica e suas fraturas são predominantemente de direção NW, com menor quantidade de direção NE. Já o Sistema Aquífero Poroso Cenozóico é de natureza granular, caracterizado

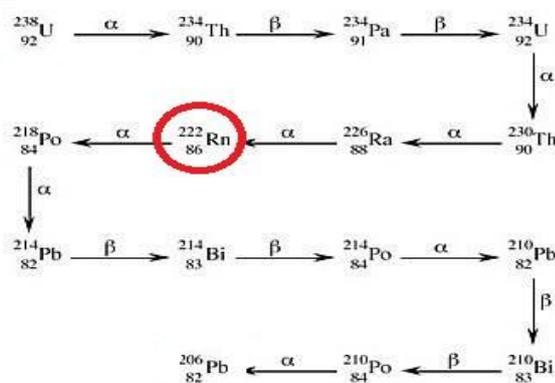
por depósitos argilo-arenosos a arenosos de origem flúvio-lacustre, lagunar e aluvionar.

O presente trabalho tratará apenas das áreas sobre influência do Sistema Aquífero Fraturado Pré-Cambriano, isto é, áreas cristalinas pré-cambrianas aflorantes.

4. O RADÔNIO E SEU COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO

Descoberto por Ernest Rutherford em 1900, o radônio é um elemento químico de número atômico $Z = 86$ do grupo dos gases nobres da tabela periódica. Ocorre na natureza devido ao decaimento radioativo da série do urânio (^{238}U) para o chumbo (^{206}Pb). São conhecidos 22 isótopos sendo o mais estável o isótopo ^{222}Rn radônio com uma meia vida de 3.84 dias. Abaixo, a figura 3 apresenta um esquema do decaimento do ^{238}U com o ^{222}Rn destacado.

Figura 3 - Decaimento radioativo do ^{238}U .



Fonte: Modificado de site Mundo Educação

Por se tratar de um elemento gasoso, o radônio é um elemento extremamente móvel, podendo, por um alívio de pressão, sair das estruturas cristalinas dos minerais e, por meio de fraturas ou poros nas rochas, escapar para os solos ou ar ambiente.

Devido ao isótopo de ^{238}U ser 99,27% de todo urânio natural existente no planeta e o radônio decair de sua série radioativa, o radônio (^{222}Rn) é

extremamente associado geoquimicamente ao urânio. Como as rochas apresentam certa quantidade de urânio em suas composições, conseqüentemente há concentrações de radônio também. A Tabela 1 apresenta as concentrações médias de urânio em diferentes litologias ígneas, metamórficas e sedimentares.

Tabela 1

ROCHAS ÍGNEAS	Urânio (ppm)
Graníticas	4,19
Gabróides	0,84
Ultramáficas	0,022
Eclogitos	0,20
Intrusivas alcalinas	9,82
Extrusivas silicáticas	5
Basálticas	0,43
ROCHAS METAMÓRFICAS	
Anfibolito	3,5
Gnaisse	2,2
Paragnaisse	4,5
Granulito	4,9
Ortognaisse	3,6
Coridierita Gnaisse	5,8
Mármore	0,17
Filito	1,9
Xisto	2,5
Rochas Máficas	3,2
ROCHAS SEDIMENTARES	
Arenitos	1,48
Grauvacas	2,1
Arcóseos	1,5
Folhelhos	3,25
Bauxita	11,4
Bentonita	5
Calcários	2,19
Dolomitos	0,03 – 2
Fosfáticas	50 – 300
Evaporitos	< 0,1

Fonte: Modificado de Duarte (2002).

Como pode ser observada na tabela 1, a concentração de urânio nas rochas ígneas, é substancialmente maior em rochas graníticas e rochas feldspatóidicas. Deve-se isso ao seu comportamento geoquímico que facilita o enriquecimento nas séries mais diferenciadas do magmatismo. Já nas rochas metamórficas, a maior quantidade de urânio está nos granulitos e nos gnaisses. As maiores quantidades de urânio em rochas são encontradas nos minerais acessórios como zircão, esfeno, apatita, monazita, allanita entre outros.

A despeito da radioatividade do radônio e suas consequências na saúde humana, ainda são relativamente poucos os estudos realizados no Brasil, ao contrário de países mais desenvolvidos, particularmente aqueles de clima frio.

Segundo Fianco (2011), o valor médio das concentrações medidas de 14 pontos em solos residuais graníticos de Porto Alegre foi de 4.454 Bq/m³. Cabe salientar que este valor está elevado devido a um ponto, excepcionalmente, ter apresentado a concentração de 30.600 Bq/m³. Excluindo este anômalo ponto e respectiva medida, o novo valor da concentração média fica em 1.914 Bq/m³.

Segundo Cliff (1990), cerca de 2.500 pessoas morrem anualmente devido ao câncer de pulmão no Reino Unido, através da inalação de radônio. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA), aproximadamente 21 mil mortes por câncer de pulmão ligado à inalação do gás radônio ocorrem a cada ano naquele país. Esse órgão americano também estima que 89% das mortes causadas por câncer associado ao conteúdo de radônio na água são provocadas pela inalação do gás e os 11% restante pela ingestão direta da água. Ademais, a ingestão de radônio também está associada ao aumento de câncer de estômago, porém com risco bem menor.

Estudos relacionados a radônio em minas subterrâneas da Checoslováquia, França, Canadá, Austrália e EUA identificaram que 2.700 mineiros, de um total de 64.000, que trabalharam nas minas alvos da pesquisa morreram por câncer de pulmão (Appleton, 2005). Obviamente que os dados não explanam que todos contraíram câncer devido à inalação do radônio, uma vez que diversos mineiros tiveram a doença causada por fatores como o

tabagismo. Todavia, é imperioso destacar que o número ainda assim é relativamente elevado e constitui uma preocupante realidade.

5. PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFEROS FRATURADOS

Segundo Cavalcante (1990), em torno de 58% do território brasileiro apresenta domínio hidrogeológico cristalino, o que dá uma importância muito grande às melhorias de métodos de prospecção de água em regimes cristalinos no Brasil. Os métodos de prospecção de água subterrânea podem ser divididos, tratando da área de prospecção, em dois principais grupos: os métodos regionais e os de detalhe.

Os métodos de prospecção de água subterrânea regionais são aqueles que se aplicam a grandes áreas de extensão como, por exemplo, o estudo feito para o abastecimento de uma cidade. Já os métodos de prospecção de detalhe são usados em áreas menores, que normalmente são restritas a variáveis limites como, por exemplo, o limite de uma propriedade.

As técnicas utilizadas no âmbito regional são a utilização de sensoriamento remoto e a interpretação de fotografias aéreas a fim de analisar os lineamentos estruturais, os padrões de drenagens e frequências de juntas estruturais. Também são devidamente analisados os poços já existentes na região e suas características principais. As informações possíveis são absorvidas e assim podendo gerar diversos tipos de resultados estatísticos na forma de mapas.

Os métodos de prospecção de água subterrânea de detalhe são os métodos geofísicos que podem ser utilizados, além de serem efetivos quando usados em áreas menores, também usados onde a superfície natural já fora modificada antropicamente como nos centros urbanos. Os métodos geofísicos mais utilizados na prospecção de água subterrânea em aquíferos fraturados são o método eletrorresistivo e o eletromagnético.

O método eletrorresistivo é bastante usado devido à resistividade, resistência em ohms entre as faces opostas de um cubo unitário do material, ser uma das propriedades físicas mais variáveis. Segundo Pereira (2009), os valores de resistividade podem chegar à ordem de 10^{-5} ohm. m para minerais metálicos e na ordem de 10^7 ohms. m para sedimentos extremamente secos ou rochas maciças. A partir disso, informações de recursos hídricos podem ser fornecidas sem o alto custo de um programa de perfuração. Dois tipos principais de técnicas são empregadas em levantamentos de resistividade para a busca de água subterrânea: Caminhamento Elétrico e a Sondagem Elétrica Vertical.

Já os métodos eletromagnéticos são utilizados a partir de perfis de caminhamento com espaços regulares. A frequência utilizada no equipamento e a resistividade do substrato investigado são determinantes para a profundidade de investigação. No caminhamento, ao passar por zonas fraturadas contendo água, os parâmetros são alterados em função dos grandes contrastes de resistividade.

Apesar de estes métodos serem bastante eficientes no uso da prospecção de água subterrânea em aquíferos fraturados, e particularmente em áreas densamente urbanizadas estes métodos apresentam deficiências em razão de interferências, como, por exemplo, redes de energia elétrica, pavimentação asfáltica, presença de veículos automotores, dentre outros fatores. Saliendo essas informações, o método de emanção natural de radônio se torna útil nestes locais, pois é livre dessas interferências e pode ser utilizado com facilidade em jardins e áreas de calçamento.

6. METODOLOGIA

O trabalho primeiramente passou por uma cuidadosa revisão bibliográfica do assunto em pauta, considerando-se que são poucos os

registros sobre o uso deste método prospectivo para águas subterrâneas, em especial em nosso país.

Numa segunda etapa do estudo foram realizadas análises de lâminas petrográficas de quatro litologias graníticas encontradas no Município de Porto Alegre e um reconhecimento geológico estrutural a partir do registro de lineamentos da região, utilizando-se imagens sombreadas de relevo extraídas do projeto *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (USGS)* e fotografias aéreas obtidas com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/CPRM. Essas duas metodologias serviram para a escolha das áreas-piloto nas quais os lineamentos tectônicos fossem claramente definidos em fotografia aérea.

Na etapa seguinte foram realizados trabalhos de campo detalhados nas áreas-piloto com reconhecimento e locação de lineamentos no terreno e utilização do equipamento RTM - 1688 para medidas de radônio no solo. As medidas foram realizadas seguindo uma malha espacial determinada que favorecesse o tratamento estatístico dos dados obtidos. Os estudos foram complementados com análises gama-espectrométricas nos mesmos locais em que foram realizadas as determinações com o RTM – 1688.

Os dados adquiridos foram representados por meio de tabelas, recebendo um tratamento estatístico adequado com o programa de computador Surfer para facilitar as conclusões obtidas.

6.1 Análises Petrográficas

Foram realizadas análises de quatro granitos presentes em Porto Alegre. Os granitos estudados, tanto macroscopicamente quanto microscopicamente, foram o Granito Santana, o Granito Viamão, o Granito Independência e o Granito Ponta Grossa.

Após análise macroscópica, foram feitas duas descrições petrográficas a partir de lâminas delgadas de cada corpo granítico, estudo este realizado no laboratório de microscopia do Departamento de Mineralogia e Petrografia do Instituto de Geociências da UFRGS. Foi dada maior atenção à presença de lamelas de biotita metamictizada, como indicativo dos efeitos da radioatividade.

6.2 Identificação e seleção dos lineamentos

Os lineamentos e eventuais concentrações de fraturas foram fatores determinantes para a escolha das áreas-piloto.

Foram utilizadas inicialmente imagens do tipo sombreadas de relevo extraídas do projeto *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM* do serviço geológico norte-americano (*USGS*). Esse tipo de imagem foi escolhido, pois possibilita uma melhor visualização das diferenças do relevo. A imagem de relevo é gerada a partir de uma grade retangular sobre a qual é aplicado um modelo de iluminação. Neste trabalho utilizou-se quatro ângulos de iluminação ($0^{\circ}/360^{\circ}$, 90° , 180° e 270°) o que ocasionou o uso de quatro diferentes imagens. Após o tracejar das estruturas, foram gerados diagramas de rosetas a partir do programa de computador *Rock Works*.

Também para detectar lineamentos e fraturas, foram utilizadas fotos aéreas de escala 1:60.000 do Município de Porto Alegre obtidas na biblioteca da CPRM. Com a escolha de duas fotos foi gerado um anaglifo, utilizando o programa *Ilwis*, que possibilitou a visualização do relevo em 3D com o auxílio de um óculos especial para a visualização. As imagens foram georreferenciadas e os lineamentos foram traçados com o uso do programa *ArcGIS*.

A seleção dos lineamentos a serem detalhados foi realizada atentando para uma boa definição visual da estrutura no anaglifo e no campo e boas condições de acesso ao local, que deveria permitir a execução de perfis transversais.

6.3 Medidas de radônio

As medidas de radônio foram feitas com o uso do equipamento *SARAD RTM* modelo 1688, disponibilizado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear

(CNEN). Este equipamento consiste de uma bomba de sucção que faz leituras de radônio do ar succionado para dentro do equipamento. O RTM 1688 pode tanto medir o radônio do ar do ambiente quanto pode ser conectado a um filtro e uma sonda para determinar o radônio no solo, tal como realizado no presente estudo. Para tanto, é cravada uma ponteira de aço no solo até profundidade de 100 cm e depois de retirada, a sonda é imediatamente introduzida no canal originado e o ar do solo, contendo radônio, é bombeado através da sonda capilar e levado à câmara de ionização, onde é determinada a concentração média do gás.

Figura 4 - Equipamento RTM 1688.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 5 - Equipamento RTM 1688 e acessórios para o uso no solo.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Com a finalidade de atender os objetivos específicos do trabalho, foram realizadas medidas de radônio ao longo de perfis transversais aos lineamentos selecionados, em pontos equidistantes, em média, 20 a 25 metros entre si, sendo um dos pontos localizado o mais próximo possível da estrutura tectônica. Em cada ponto foram feitas 6 medidas para análise da concentração de radônio, cada uma registrada a cada 5 minutos, totalizando um tempo total de 30 minutos por ponto. Cabe salientar que foram necessárias algumas precauções antes de reiniciar o procedimento no próximo ponto, evitando-se o efeito de memória do equipamento. Assim, o equipamento foi mantido funcionando por alguns segundos adicionais, bombeando o ar do próprio ambiente.

Para uma melhor compreensão da qualidade dos dados obtidos o equipamento registra o erro analítico de cada medida de concentração de Radônio. As medidas iniciais que representam a maior concentração de radônio registraram erros analíticos compreendidos entre 6 e 10%, enquanto nas medidas seguintes a concentração de radônio decresce, aumentando o erro analítico. Este registro é automaticamente fornecido pelo equipamento e não depende do operador. Com este procedimento, o dado analítico pode ser assumido como estatisticamente corrigido. Para fins de representatividade, são considerados os valores de concentrações das seis medidas realizadas no

mesmo ponto, tomando-se como resultado final a concentração média de radônio.

Os valores foram tratados com o programa Surfer a fim de se obter uma melhor visualização e compreensão dos dados obtidos nos perfis.

6.4 Medidas de radiação gama

Para realizar as medições de radiação gama utilizou-se o equipamento RS-125 Super GAMMA-RAY SPECTROMETER, dispositivo portátil de levantamento de radiação, com capacidade de realizar a análise in situ.

Correlacionou-se o teor de urânio em superfície com o teor de radônio no solo. Foram feitas medidas de concentração de urânio com o gamaespectrômetro em todos os pontos que foram analisados os teores de radônio no solo. No presente estudo, o tempo de leitura do equipamento foi programado para 120 segundos.

O detector deste aparelho é um cristal muito sensível de NaI de 103 cm³, com aptidão de ler K, U, Th, taxa de dose e contagens totais por segundo (cps). Discrimina a contagem total, a energia excitação de fótons de 2,615 MeV pertencente ao pico do ²⁰⁸Tl (decaimento do ²³²tório para ²⁰⁸tálio), a energia excitação de fótons de 1,76 MeV do ²¹⁴Bi (decaimento do ²³⁸urânio para ²¹⁴bismuto) e a energia excitação de fótons de 1,46 MeV do ⁴⁰K (captura de elétron pelo potássio para passar ao ⁴⁰argônio). Além disso, mede uma faixa de energia para cada pico, desde 2,42 MeV até 2,82 MeV, desde 1,66 MeV até 1,86 MeV e desde 1,36 MeV até 1,56 MeV respectivamente. As concentrações de cada elemento pai são estimadas, tendo-se em conta o equilíbrio entre os radioelementos principais com seus filhos (Milsom, 2003).

Figura 6 - Gamaespectrômetro RS-125.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na primeira etapa do estudo permitiram definir como a área-piloto do estudo, a região leste de Porto Alegre, que correspondem à área de ocorrência do Granito Santana e do Granito Viamão.

7.1 Petrografia das unidades graníticas

7.1.1 Granito Santana

O Granito Santana possui cor rosada a avermelhada, passando para castanha avermelhada, quando alterado. Em vários locais aparecem manchas irregulares escuras e avermelhadas que são atribuídas à percolação de fluídos com deposição de óxidos de ferro e manganês.

Composicionalmente, este granito é constituído por ortoclásio-microclínio granito a sienogranito, de textura equigranular grossa a média (5-12 mm), com predomínio de feldspato alcalino róseo prismático, pequenas quantidades de plagioclásio branco euédrico e com biotita intersticial. O quartzo, abundante, possui forma em geral alongada.

A estrutura do granito está bem marcada por uma foliação magmática definida pela orientação de feldspato alcalino prismático e biotita e, em zonas mais deformadas, pelo alongamento do quartzo. Esta foliação é bastante penetrativa e ocorre em quase toda a extensão do corpo. Segundo Phillip *et al.* (2008), nas porções mais deformadas da rocha, aparece uma textura protomilonítica com quartzo alongado e lineação de estiramento mineral sub-horizontal. Nas bordas leste e oeste do corpo ocorrem, localmente, faixas restritas protomiloníticas e miloníticas. Estas rochas miloníticas contêm de 30 a 40% de porfiroclastos de 2 a 6 milímetros envolvidos por uma matriz grano-lepidoblástica fina.

Lâmina 5 – S2 – Santana

Mineralogia:

Essenciais: Quartzo; Ortoclásio; Microclínio; Plagioclásio.

Acessórios: Opaco; Zircão; Fluorita; Allanita, Apatita, Biotita.

Secundários: Mica Branca; Opaco.

Análise modal:

Ortoclásio: 47%.

Microclínio: 18%.

Quartzo: 27%.

Plagioclásio: 6%.

Demais: 2%.

Classificação petrológica: Feldspato-alcalino Granito.

A rocha possui textura equigranular média hipidiomórfica predominantemente formada por feldspato alcalino (ortoclásio e microclínio) subédrico prismático e por quartzo anédrico. Textura poiquilítica devido às inclusões dos minerais acessórios nos grãos de feldspato. Os grãos de ortoclásio estão quase todos muito pertitizados (manchas de albita) com textura “pele de tigre”. A fluorita, em muitos grãos apresentou coloração roxa o que caracteriza provavelmente radioatividade. A allanita também mostrou vestígios de radiação, pois apresenta aparência amorfa. A biotita alterou-se praticamente toda para mica branca mais óxido de ferro. Há duas gerações de minerais metálicos: 1) Opacos de cristalização precoce e 2) Opacos secundários derivados da alteração da biotita.

Lâmina 1 - S1- Santana

Mineralogia:

Essenciais: Quartzo; Pertita; Microclínio; Plagioclásio.

Acessórios: Zircão; Fluorita; Opaco; Allanita; Apatita; Biotita.
 Secundários: Clorita; Mica branca; Opaco.

Análise modal:

Ortoclásio: 34%.

Microclínio: 27%.

Quartzo: 33%.

Plagioclásio: 5%.

Demais minerais: 1%.

Classificação petrológica: Feldspato-alcálico Granito

Predomina textura equigranular média hipidiomórfica com uma trama principal composta por feldspato alcalino (ortoclásio e microclínio) prismático subédrico e por quartzo anédrico e estirado. A textura poiquilítica é evidenciada pelas inclusões dos minerais acessórios (zircão, allanita, fluorita e opaco) no feldspato alcalino e plagioclásio. A presença de pertitas com textura “pele de tigre” está muito presente e é definida por grossos filmes de manchas de albita nos restícios grãos de ortoclásio. O estiramento dos cristais de quartzo originou a formação, em alguns pontos da lâmina, de sub-grãos do mesmo mineral. Ocorre a presença de fluorita com alguns grãos com a coloração bem roxa, evidenciando que o mineral é radioativo. A biotita praticamente se alterou toda para clorita, opaco (óxido de ferro ao redor da clorita) e mica branca.

7.1.2 Granito Viamão

O Granito Viamão apresenta uma textura porfirítica marcada pela presença de megacristais de feldspato alcalino de 1 a 10 cm, que perfazem de 15 a 40% da rocha estando imersos em uma matriz equigranular grossa a média (4-8 mm), de composição granodiorítica composta por plagioclásio, feldspato de potássio, quartzo, biotita e, raramente, horadônioblenda.

Os megacristais de feldspato alcalino são subédricos a euédricos, com limites retilíneos a lobados, exibindo uma zonação marcada por trilhas concêntricas de inclusões de biotita, plagioclásio e opacos. A biotita ocorre como mineral interticial ou como agregados lenticulares milimétricos associados com allanita e minerais opacos euédricos. O quartzo é incolor e está estirado por fluxo ou com forma amebóide. O plagioclásio, de cor branca, é euédrico e possui forma prismática.

Uma feição marcante neste granito é a presença de enclaves máficos de composição diorítica, concentrando-se, sobretudo na sua porção oeste.

Lâmina 7 – V1 - Viamão

Mineralogia:

Essenciais: Plagioclásio; Quartzo; Microclínio.

Varietais: Biotita.

Acessório: Zircão; Apatita; Esfeno; Opaco.

Secundário: Muscovita

Análise modal:

Plagioclásio: 25%.

Microclínio: 44%.

Quartzo: 25%.

Biotita: 5%.

Acessórios: 1%.

Classificação petrológica: Sienogranito

O granito Viamão apresentou predominantemente textura porfirítica com fenocristais de microclínio com a matriz apresentando textura equigranular média. A textura poiquilítica foi evidenciada pelas inclusões dos acessórios e pelas diversas inclusões de biotita nos feldspatos. O plagioclásio apresentou estar bastante sericitizado (muscovita inclusa) e mirmequitos nos grãos próximos de grãos de microclínio. O esfeno apresentou a superfície lisa com coloração marrom o que evidencia que o esfeno está metamictizado. Muitas inclusões de biotita principalmente. Alguns grãos de zircão apresentaram lhalos metamícticos evidenciando sua radioatividade.

Lâmina 8 - V2 – Viamão

Mineralogia:

Essenciais: Plagioclásio; Microclínio; Quartzo; Ortoclásio.

Varietais: Biotita.

Acessórios: Zircão; Apatita; Opaco.

Secundário: Clorita; Muscovita.

Análise modal:

Ortoclásio: 38%.

Plagioclásio: 15%.

Microclínio: 12%.

Quartzo: 30%.

Biotita: 4%.

Demais minerais: 1%.

Classificação petrológica: Sienogranito.

Ao microscópio, a rocha apresentou textura equigranular média. Os grãos de feldspato alcalino estão parcialmente ou até mesmo totalmente transformados em microclínio. Estão exibindo formas subédricas a euédricas. Alguns grãos estão zonados. A textura poiquilítica é comum sendo definida principalmente pelas frequentes inclusões de biotita no feldspato potássico. Também é possível analisar as inclusões de zircão, apatita e opacos na biotita. A biotita alterou-se em alguns pontos para clorita, alguns grãos estão praticamente todo cloritizados. A radioatividade do zircão é evidenciada pelos halos metamicticos principalmente na biotita cuja estrutura foi destruída pela radiação em torno do grão do zircão.

7.1.3 Granito Independência

O granito possui cor cinza clara a esbranquiçada, com pontuações escuras conferidas pela biotita. Quando alterado, adquire tons amarelados a alaranjados. Apresenta textura equigranular média a grossa (3-6 mm), exibindo, localmente, uma textura inequigranular a equigranular fina a média (1-2 mm), cuja mineralogia é constituída por feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo e pouca biotita (2 a 4%). Uma intensa variação textural é observada mesmo na escala de afloramento, onde é comum ocorrer uma complexa rede de veios, diques e bandas, com espessuras entre 5 e 100 cm, alternando porções mais tardias de natureza aplítica a pegmatítica.

Composicionalmente, o Granito Independência é dominado por sienogranitos e monzogranitos. O feldspato alcalino é subédrico e mostra cor cinza claro a branco. O plagioclásio é branco e ocorre com formas prismáticas. O quartzo é amebóide e intersticial. A biotita ocorre como cristais euédricos e, mais raramente, como agregados.

Lâmina 3 – Independência 2

Mineralogia:

Essenciais: Ortoclásio; Microclínio; Plagioclásio; Quartzo.

Varietais: Biotita.

Acessórios: Zircão; Apatita; Opaco; Allanita.

Secundários: Clorita; Opaco (óxido de ferro).

Análise modal:

Ortoclásio: 20%.

Microclínio: 5%.

Plagioclásio: 31%.
 Quartzo: 41%.
 Biotita: 3%.

Classificação petrológica: Monzogranito.

A rocha possui textura equigranular média hipidiomórfica. A textura poiquilítica é evidenciada pelas inclusões de biotita e acessórios nos feldspatos. É possível também analisar as inclusões de acessórios na biotita. Alguns grãos de plagioclásios estão apresentando mirmequitos. No ortoclásio e no microclínio são encontradas finas pertitas em vários pontos da lâmina. A biotita está, em muitos grãos, se alterando para clorita mais óxido de ferro (opaco). Alguns grãos estão totalmente cloritizados. A radioatividade do zircão é evidenciada pelos halos metamícticos. Há grãos que inclusos na biotita, por exemplo, destroem a estrutura do filossilicato devido à radiação emitida. O quartzo, em alguns pontos, está alongado com subgrãos de tamanhos diferentes ou constituindo agregados com tamanho de grão menor.

Lâmina 4 – Independência 1

Mineralogia:

Essenciais: Plagioclásio; Ortoclásio; Quartzo.

Varietais: Biotita.

Acessórios: Zircão; Fluorita; Apatita; Allanita; Muscovita.

Secundários: Clorita; Opaco (óxido de ferro); Muscovita (sericita).

Análise modal:

Quartzo: 40%.

Plagioclásio: 37%.

Ortoclásio: 20%.

Biotita: 2%.

Demais minerais: 1%.

Classificação petrológica: Monzogranito.

O granito independência apresenta textura equigranular média (3mm) hipidiomórfica. Há muitas inclusões de biotita no feldspato (ortoclásio e plagioclásio) evidenciando a textura poiquilítica. Também inclusos, os acessórios estão tanto nos feldspatos quanto nas biotitas. Alguns grãos de plagioclásio estão apresentando mirmequitos. A biotita está sofrendo alteração descrita pela reação: Biotita → clorita mais óxido de ferro. Alguns grãos estão totalmente cloritizados e os opacos estão estirados como se estivessem

ocupando o espaço das clivagens da antiga biotita. O plagioclásio e o ortoclásio estão bastante sericitizados. A fluorita está incolor. O quartzo é alongado com sub-grãos de tamanho variado ou constituindo agregados granoblásticos finos irregulares. O zircão apresenta halos metamórficos.

7.1.4 Granito Ponta Grossa.

O granito possui cor rosa com tons avermelhados, mostrando textura equigranular grossa a média (5-10 mm). Apresenta estrutura maciça e uma grande homogeneidade estrutural. Contém raros enclaves máficos, com formas arredondadas e dimensões da ordem de 1 a 5 cm, com contatos curvos e bem definidos.

A composição petrográfica do Granito Ponta Grossa é sienogranítica, contendo essencialmente feldspato alcalino de cor rosa, subédrico, com pequenas quantidades de plagioclásio branco, prismático, quartzo amebóide e, mais raramente, biotita intersticial. Os acessórios são o esfeno, zircão, apatita, allanita e os minerais opacos.

Lâmina 6 – PG1- Ponta Grossa

Mineralogia:

Essenciais: Quartzo; Microclínio; Plagioclásio.

Varietais: Biotita.

Acessórios: Zircão; Apatita; Fluorita; Esfeno; Allanita; Opaco.

Secundários: Biotita verde; Clorita; Opaco; Muscovita (sericita).

Análise modal:

Quartzo: 40%.

Plagioclásio: 20%.

Microclínio: 36%.

Biotita: 3%.

Demais minerais: 1%.

Classificação petrológica: Sienogranito.

O granito ponta grossa apresenta textura equigranular média a grossa (3mm a 6mm) hipidiomórfica. Apresenta textura poiquilítica definida por inclusões de plagioclásio e biotita no microclínio; biotita no plagioclásio; zircão, apatita, esfeno, allanita e opaco na biotita. Os plagioclásios estão apresentando sericita e alguns grãos mirmequitos. A biotita apresenta transformação incipiente para biotita verde, clorita e opaco. O esfeno está com a textura lisa e

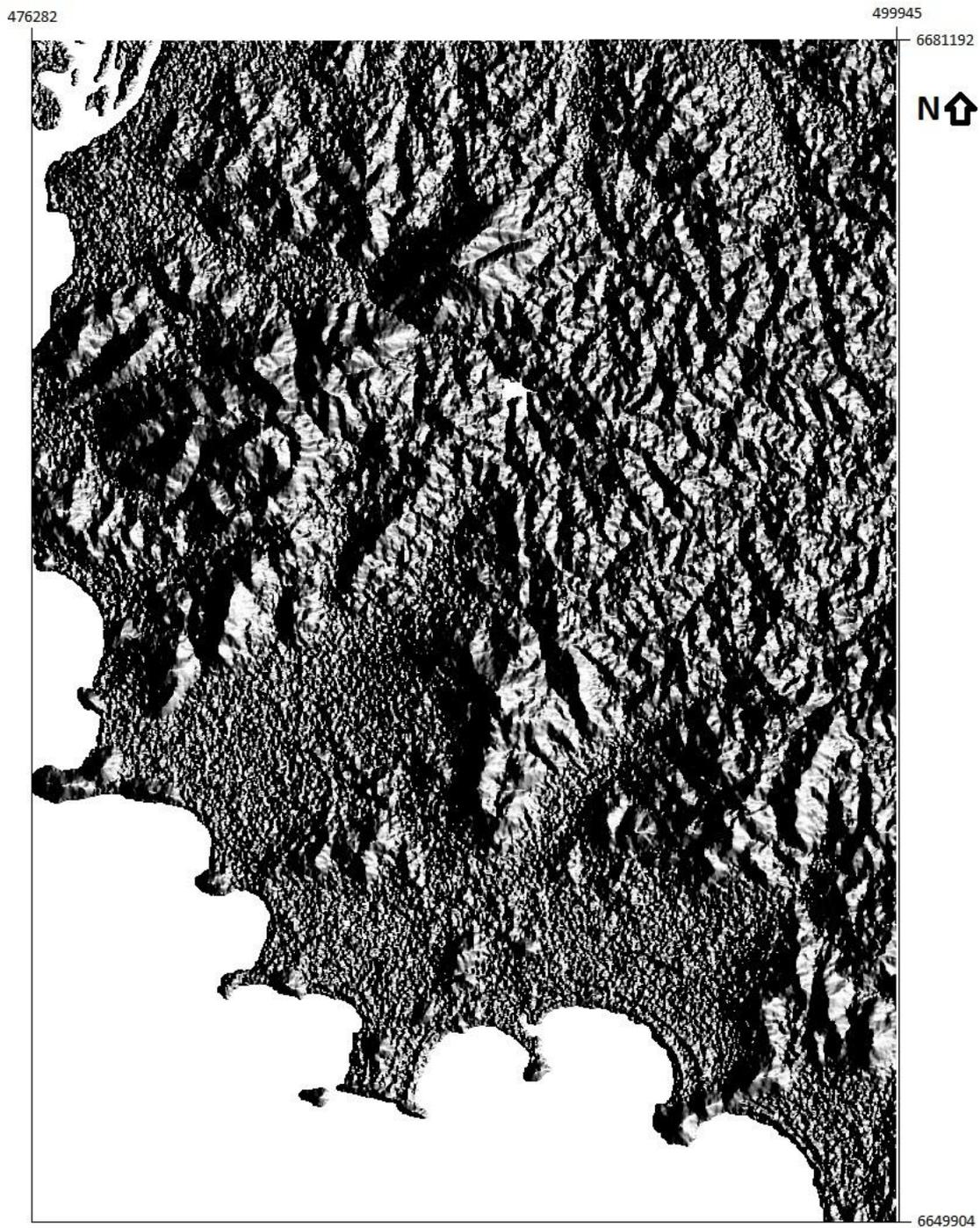
se encontra metamictizado. Os zircões estão apresentando halos metamicticos na biotita. A fluorita está incolor e está preenchendo as fraturas entre os grãos.

Sabendo que as rochas mais alcalinas tendem a ser mais radioativas e que as análises petrográficas serviram como ferramenta para identificar a concentração dos possíveis minerais possuidores de urânio e identificar lamelas metamictizadas de biotita. As unidades Granito Santana e Granito Viamão, considerando-se estes elementos foram pré-selecionadas para a segunda fase do trabalho.

7.2 Resultados – Identificação dos lineamentos

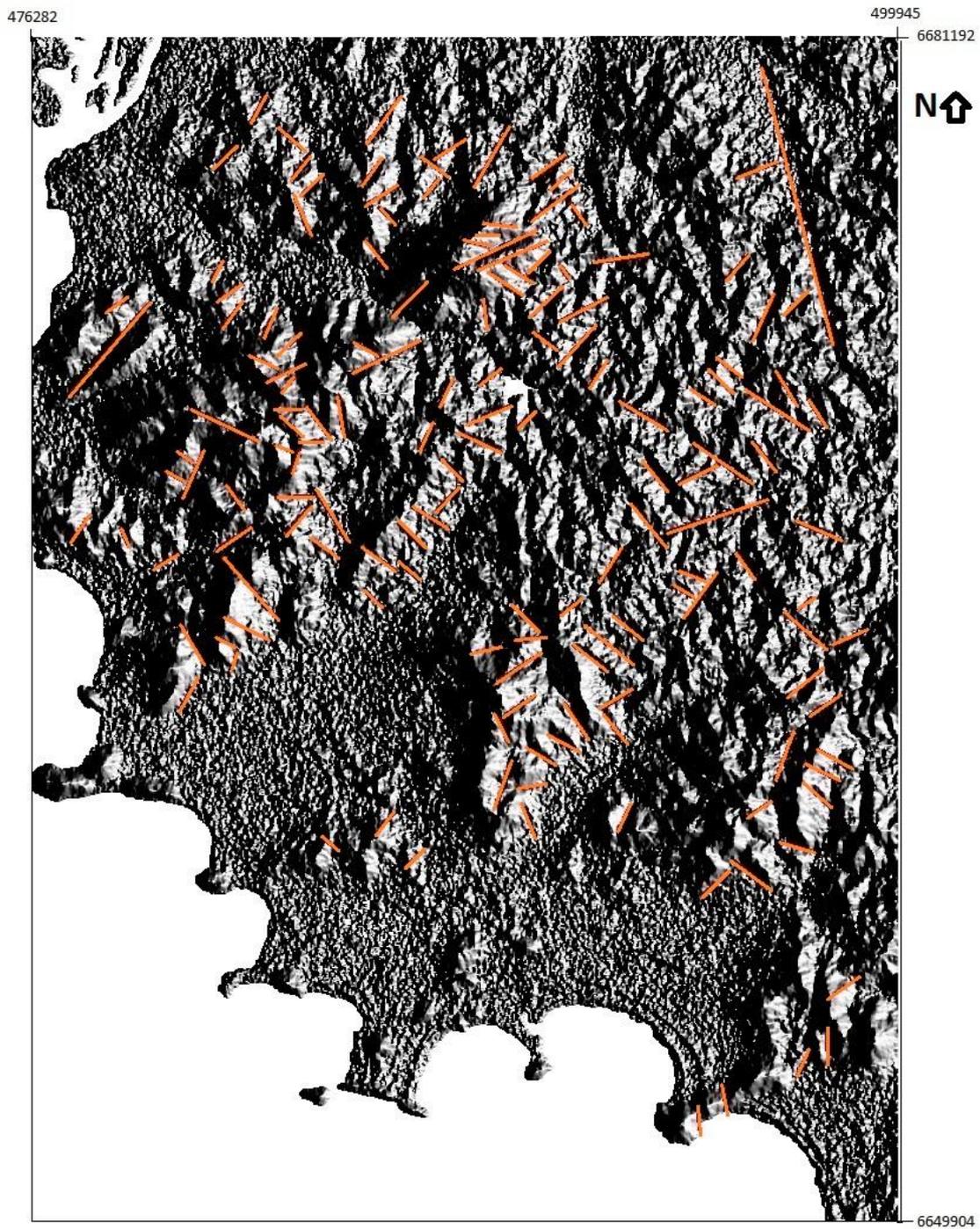
Como já mencionado, foram analisadas quatro imagens (ângulos diferentes de iluminação) do tipo sombreadas de relevo extraídas do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* do serviço geológico norte-americano. As quatro imagens originais e suas respectivas quatro figuras com os lineamentos traçados estão mostradas a seguir em ordem de iluminação de 90 a 360 graus:

Figura 7 – Imagem com iluminação de azimute 90°.



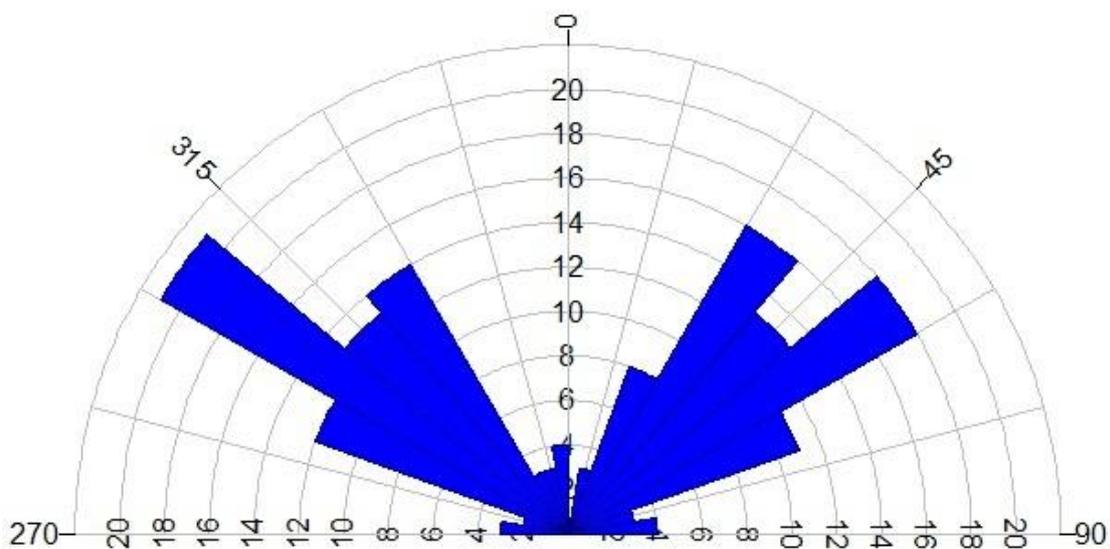
Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 8 - Imagem com iluminação de azimute 90° e seus lineamentos traçados.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

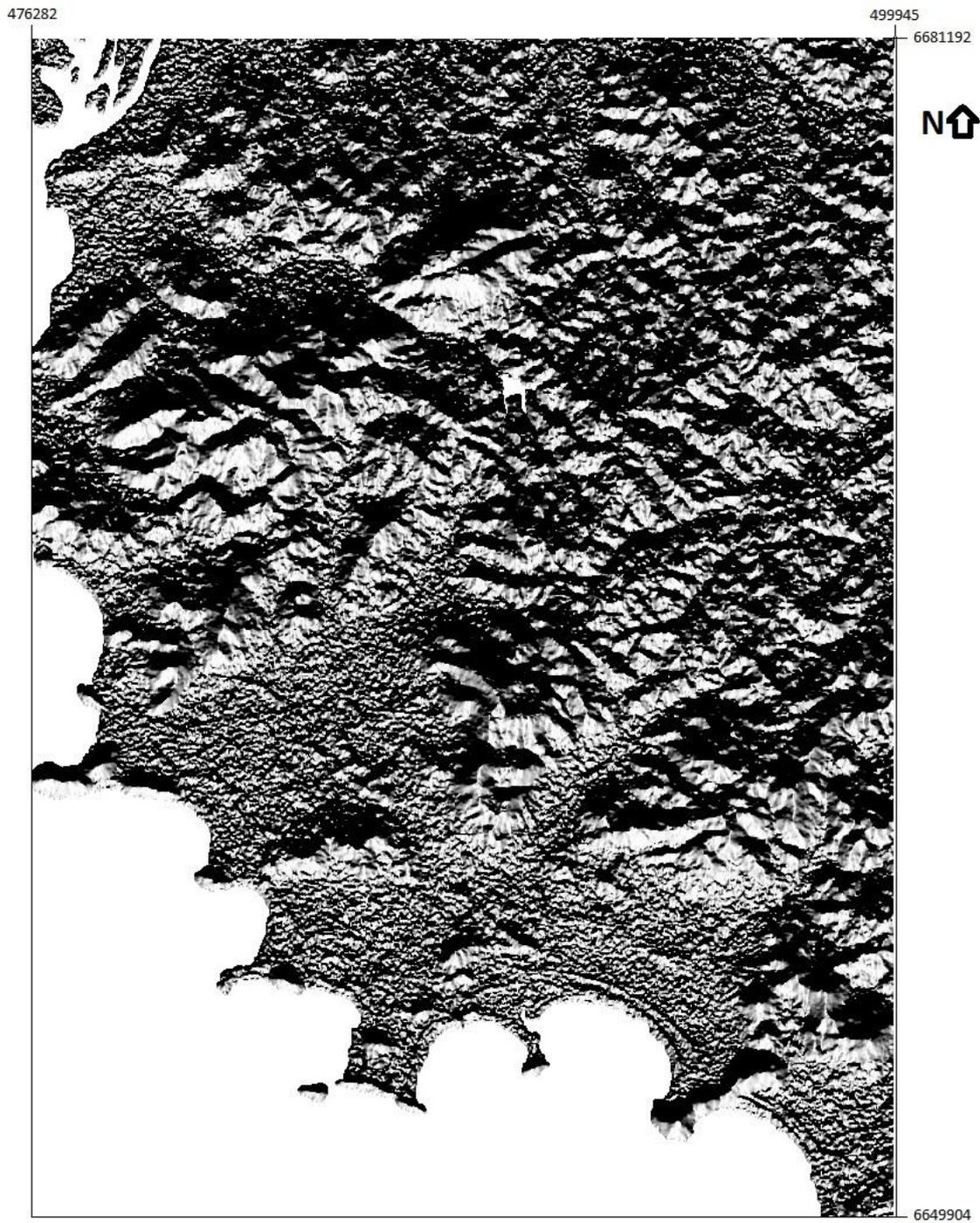
Figura 9 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 90°.



Quadro Estatístico	
Método	Frequência
Intervalo de classe	10 graus
População total	151
População da direção principal	21

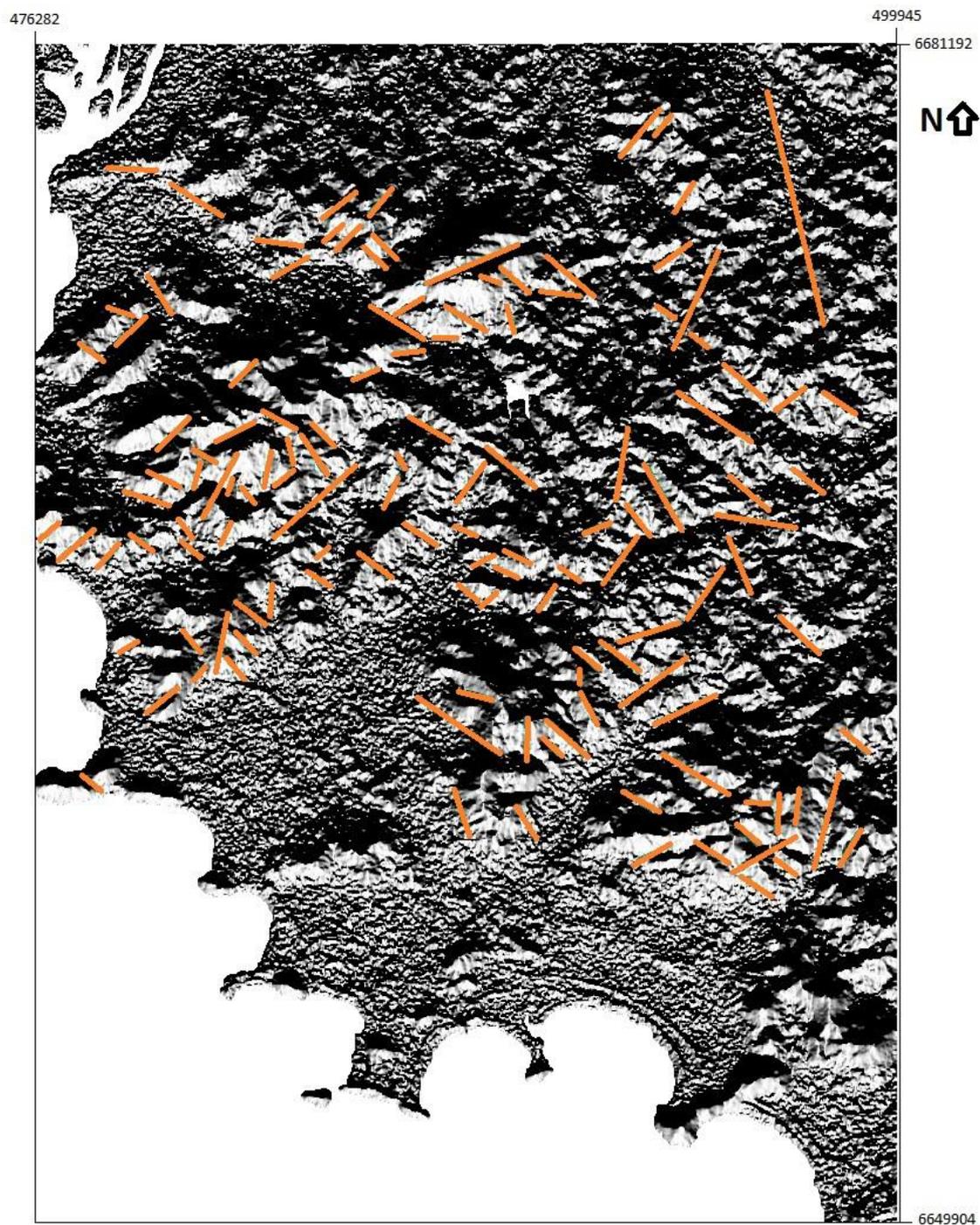
Fonte: Dados da pesquisa (2015).

Figura 10 - Imagem com iluminação de azimute 180°.



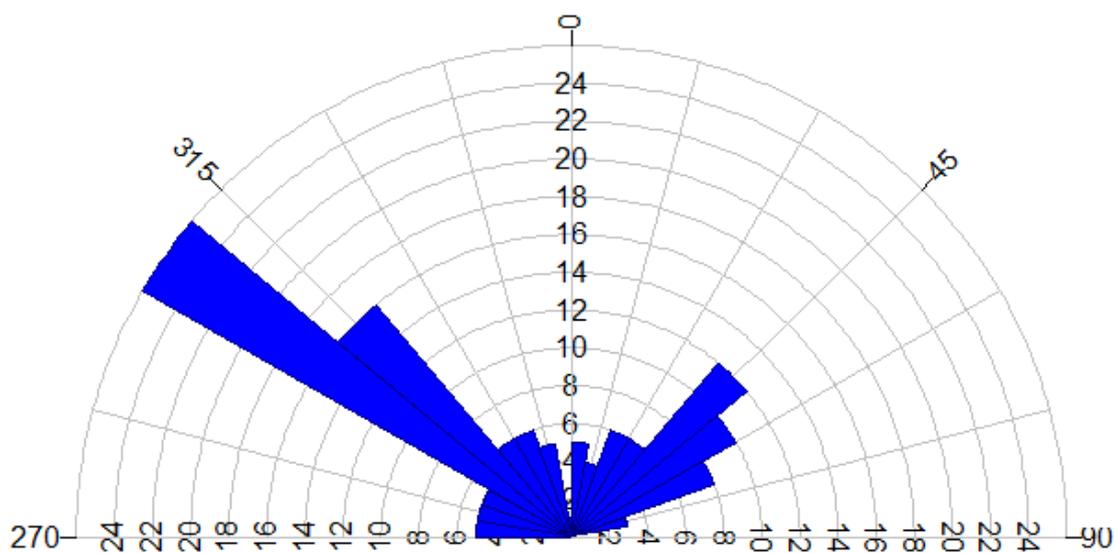
Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 11 - Imagem com iluminação de azimute 180° e seus lineamentos traçados.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

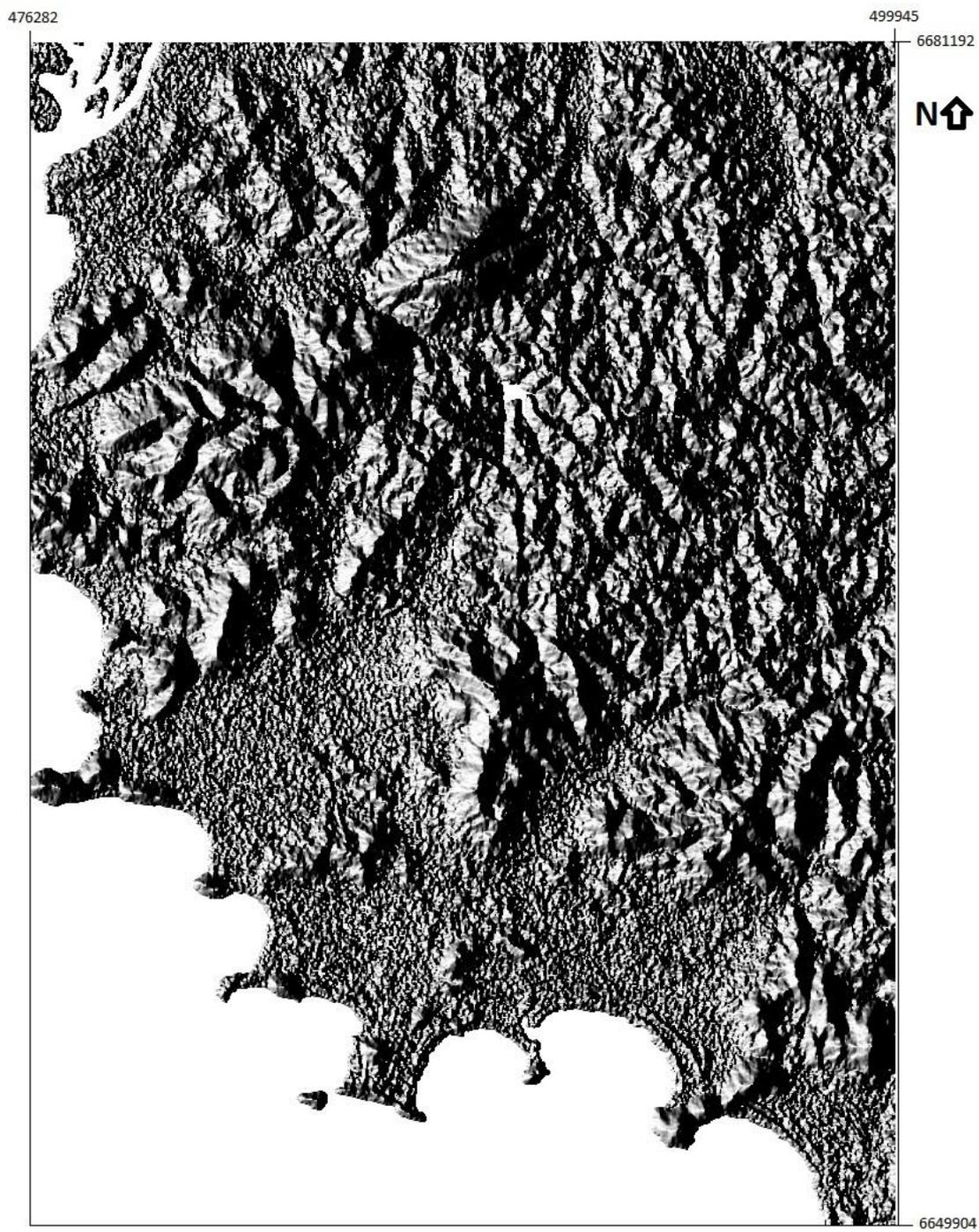
Figura 12 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 90°.



Quadro Estatístico	
Método	Frequência
Intervalo de classe	10 graus
População total	129
População da direção principal	26

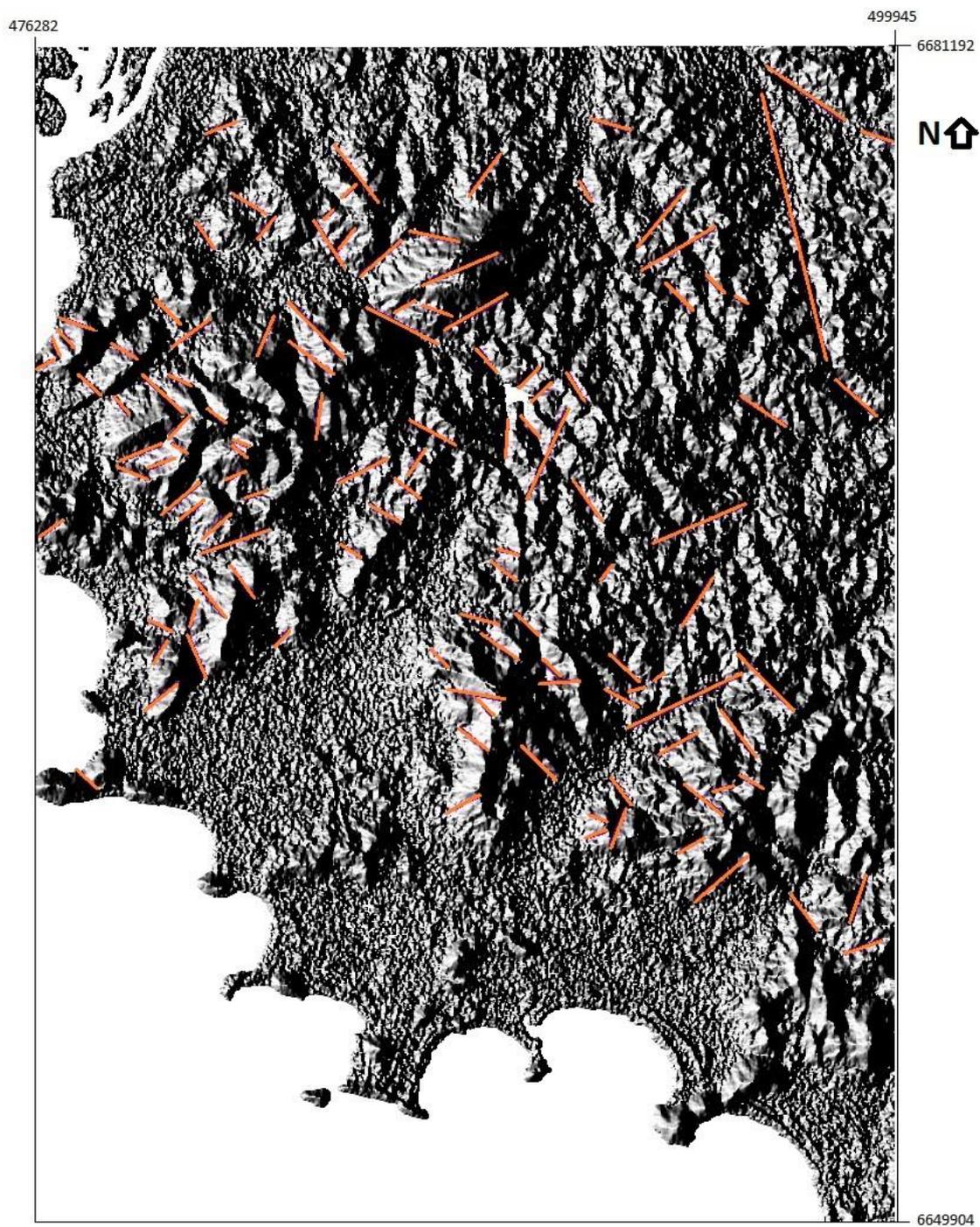
Fonte: Dados da pesquisa (2015)

Figura 13 - Imagem com iluminação de azimute 270°.



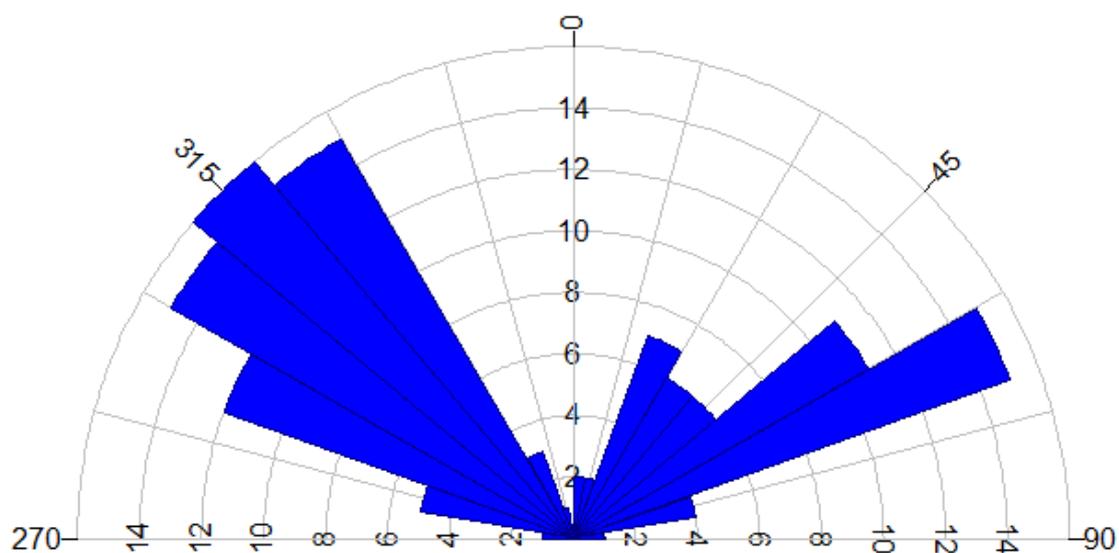
Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 14 - Imagem com iluminação de azimute 270° e seus lineamentos traçados.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

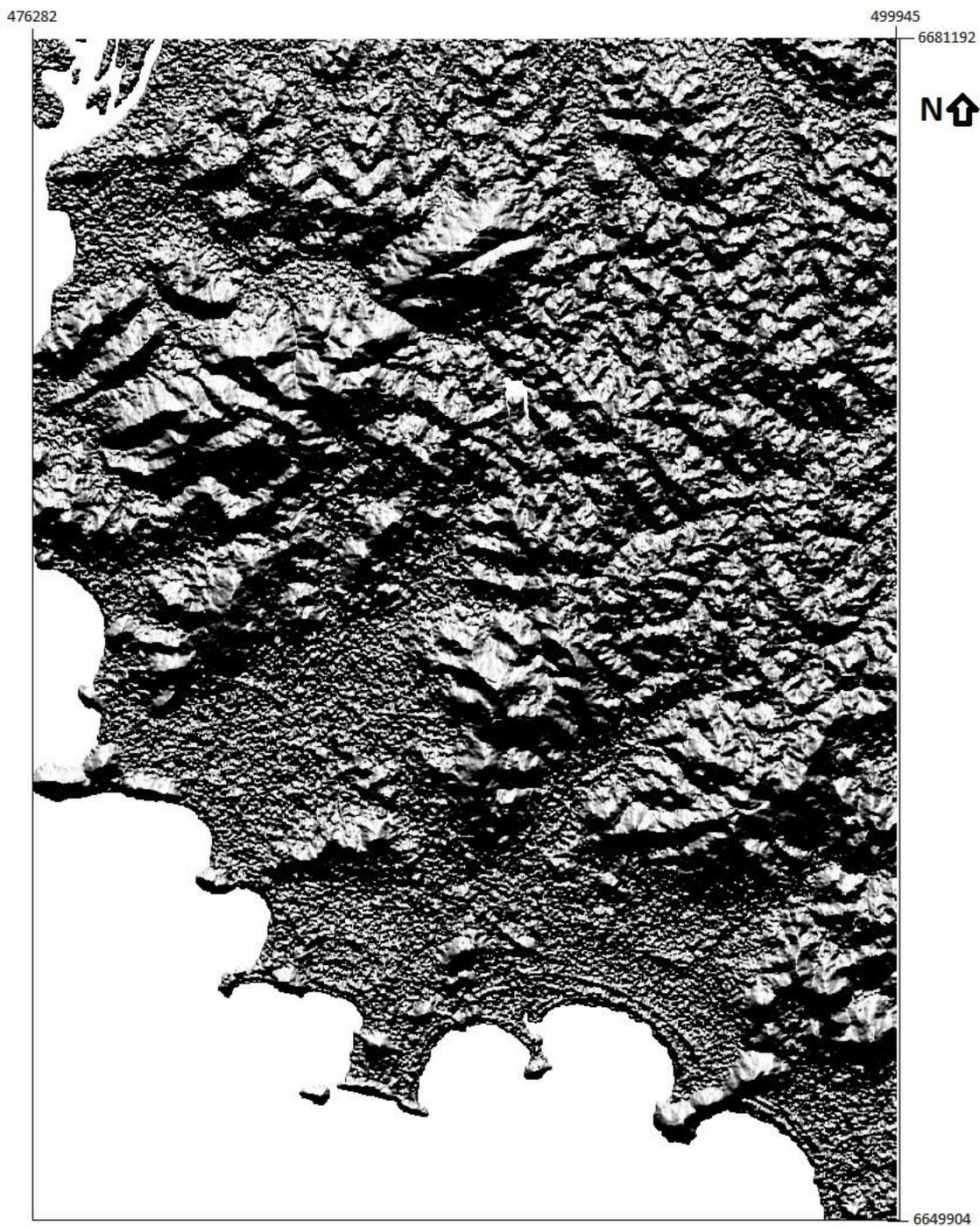
Figura 15 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 270°.



Quadro Estatístico	
Método	Frequência
Intervalo de classe	10 graus
População total	122
População da direção principal	16

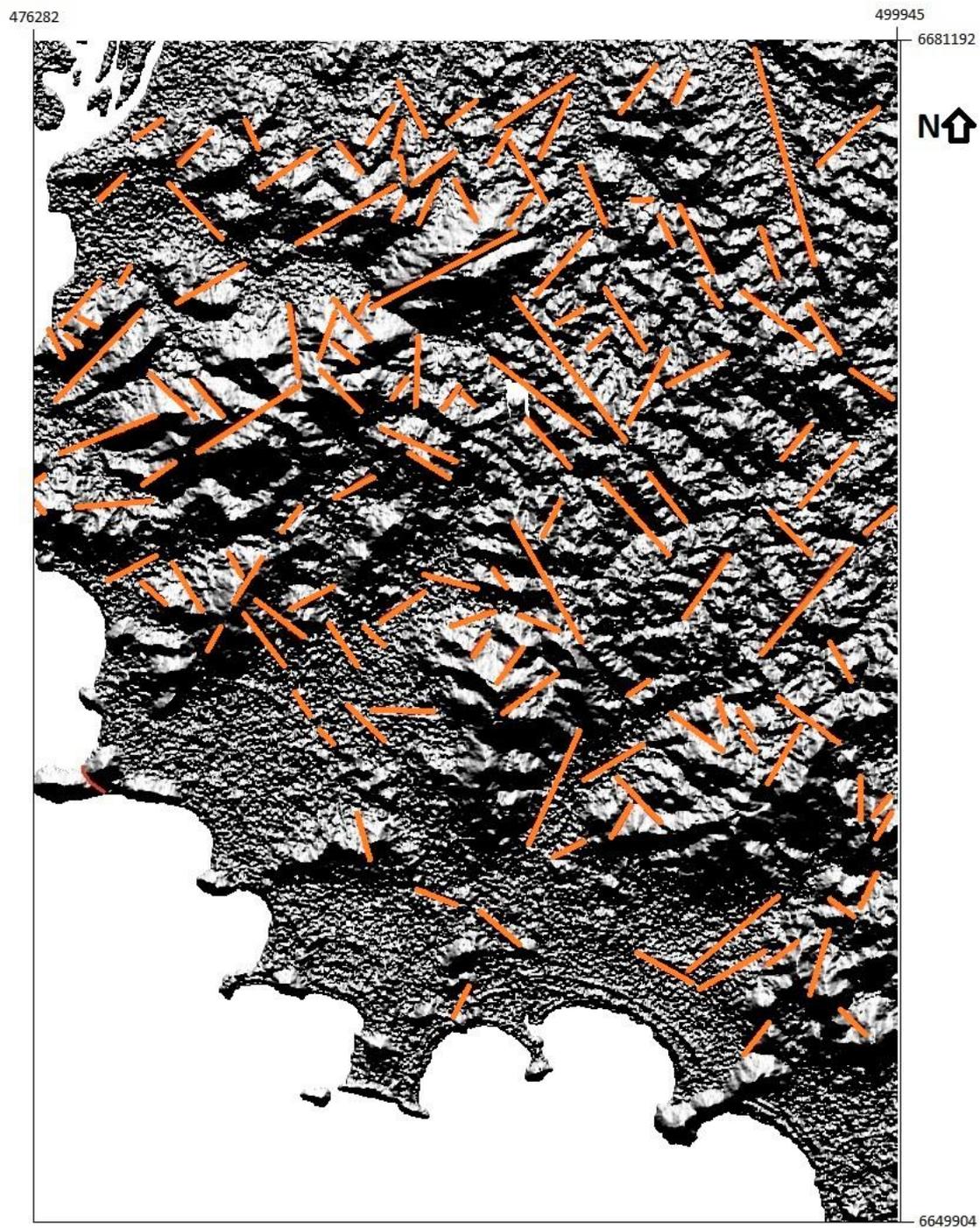
Fonte: Dados da pesquisa (2015).

Figura 16 - Imagem com iluminação de azimute 360°.



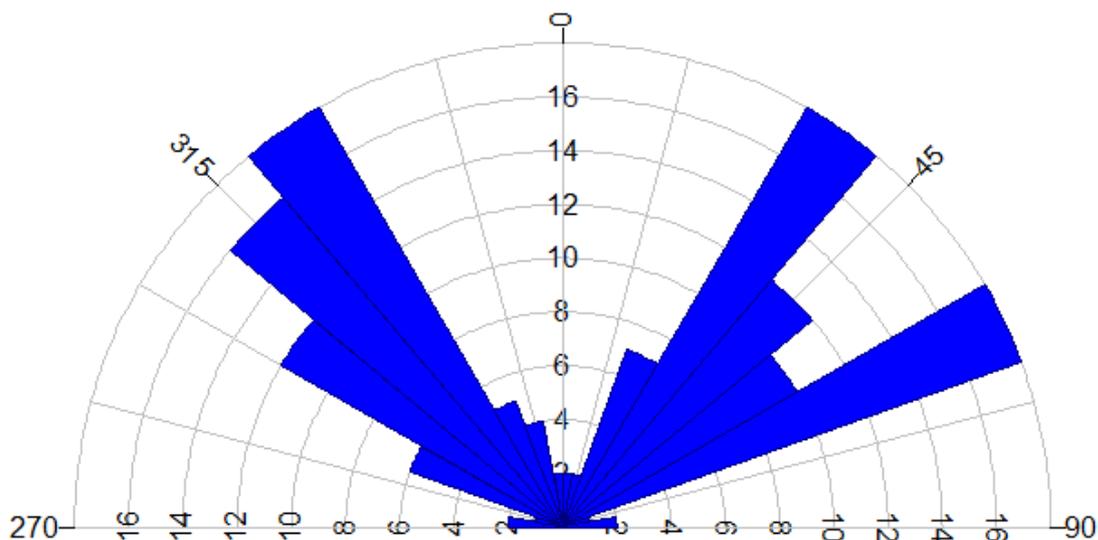
Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 17 - Imagem com iluminação de azimute 360° e seus lineamentos traçados.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 18 - Diagrama de Roseta da imagem com iluminação de azimute 360°.



Quadro Estatístico	
Método	Frequência
Intervalo de classe	10 graus
População total	139
População da direção principal	18

Fonte: Dados da pesquisa (2015).

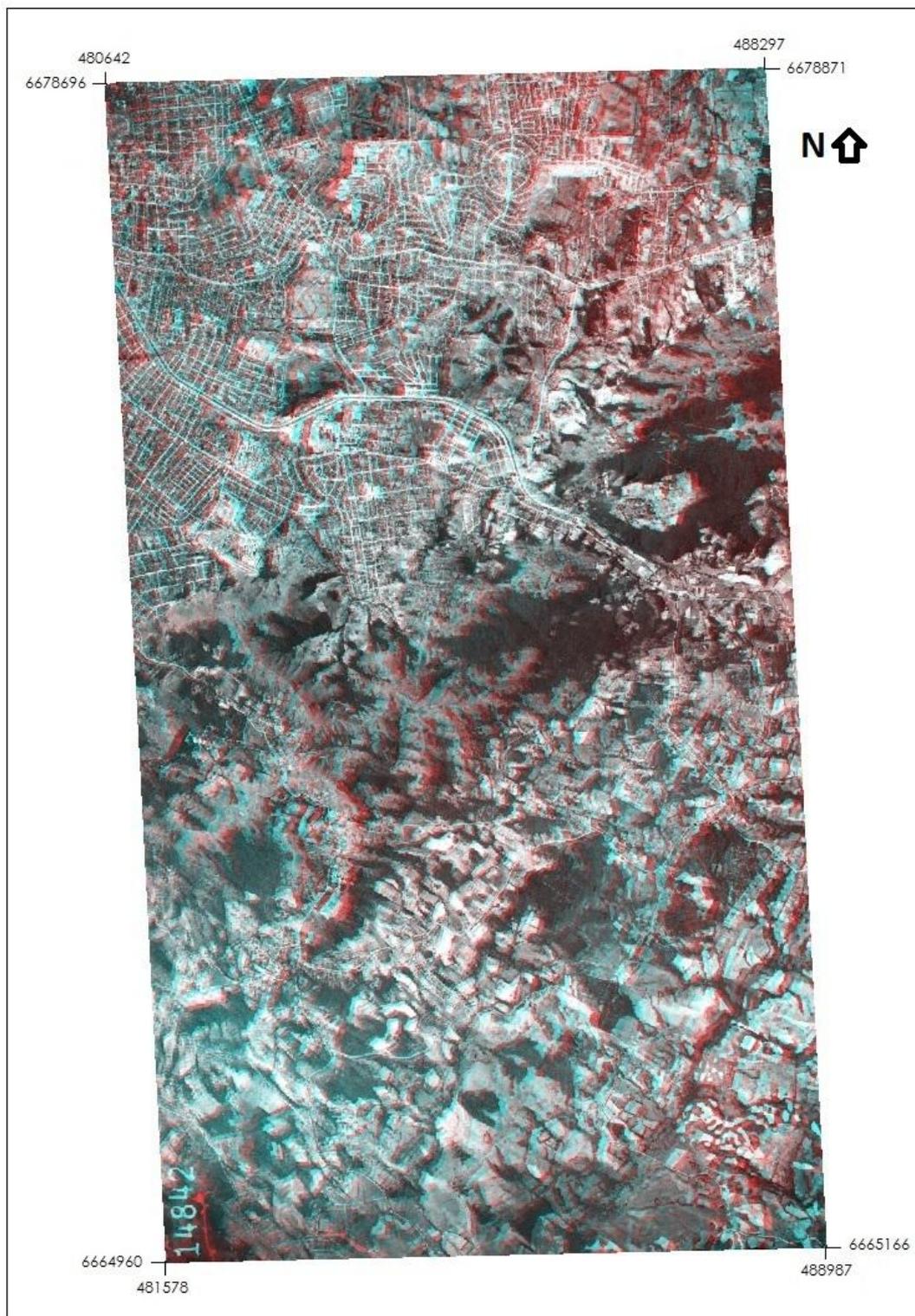
Pode-se observar a partir das imagens que os lineamentos tectônicos se concentram na topografia mais alta do município que é representada pelas litologias cristalinas. Com base nos diagramas de rosetas, o predomínio dos lineamentos estruturais com direção noroeste (NO) é evidenciado. Um considerável número de estruturas com direção nordeste (NE) também foi apresentada.

Ultrapassada essa etapa do trabalho, foi selecionada uma região mais específica para a visualização dos lineamentos. Para isto, foram utilizadas duas fotos aéreas em escala 1:60.000 para a geração do anaglifo, cuja região se

refere a uma área central das imagens sombreadas de relevo que é separada pelas duas litologias mencionadas (Granito Santana e Granito Viamão).

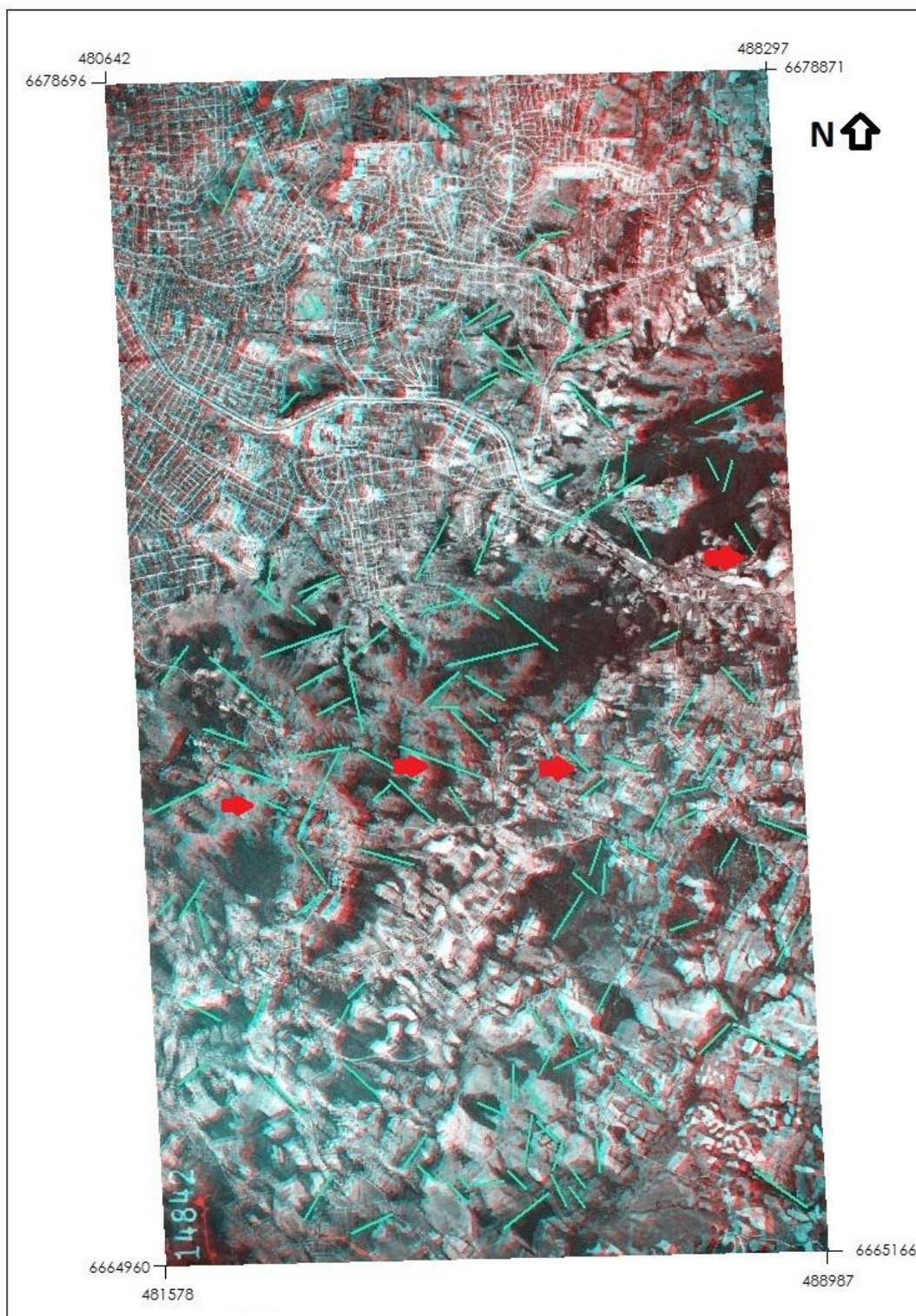
Essa região foi escolhida pela grande concentração dos lineamentos e pela boa representação dos mesmos no campo. Por se tratar de uma área consideravelmente grande de Porto Alegre, muitos bairros da cidade estão na imagem gerada como, por exemplo, o bairro Agronomia, Lomba do Pinheiro, Partenon, Belém Velho, entre outros. Na figura 19, a representação do anaglifo gerado é o mesmo, da figura 20. Dentre os lineamentos marcados, foram selecionados quatro destinados à realização dos estudos.

Figura 19 – Visão estereoscópica pelo método do anaglifo da área de estudo ajustado ao terreno, envolvendo o estereopar 14842 e 14843 na escala original 1/100000, adquirido em 1975 pelo Serviço Geográfico e Cartográfico do Exército Brasileiro.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Figura 20 - Anaglifo com as estruturas traçadas e a indicação das escolhidas para a elaboração dos perfis.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

7.3 Análises de radônio e urânio nos perfis selecionados.

Foram realizados quatro perfis para medidas de concentração de radônio no solo. Nestes perfis, também foram adquiridos os valores de gamaespectrometria de urânio em cada ponto. Dois perfis se encontram em área aflorante do Granito Santana e os dois restantes no Granito Viamão.

Os perfis foram denominados Perfil Bento Gonçalves, Perfil Lomba do Pinheiro, Perfil Morro da Polícia e Perfil Arquidiocese, de acordo com sua localização. Os dois primeiros perfis citados são localizados no Granito Viamão, enquanto os dois últimos no Granito Santana.

7.3.1 Perfil Bento Gonçalves

O Perfil Bento Gonçalves foi composto por três pontos, sendo o último ponto situado no lineamento que possui direção noroeste. A imagem abaixo apresenta o perfil traçado transversalmente ao lineamento e a localização dos pontos analisados.

Figura 21 - Perfil Bento Gonçalves, seus respectivos pontos e lineamento.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

A tabela 2 apresenta os resultados das medidas de radônio e urânio nos pontos do Perfil Bento Gonçalves com as respectivas coordenadas geográficas.

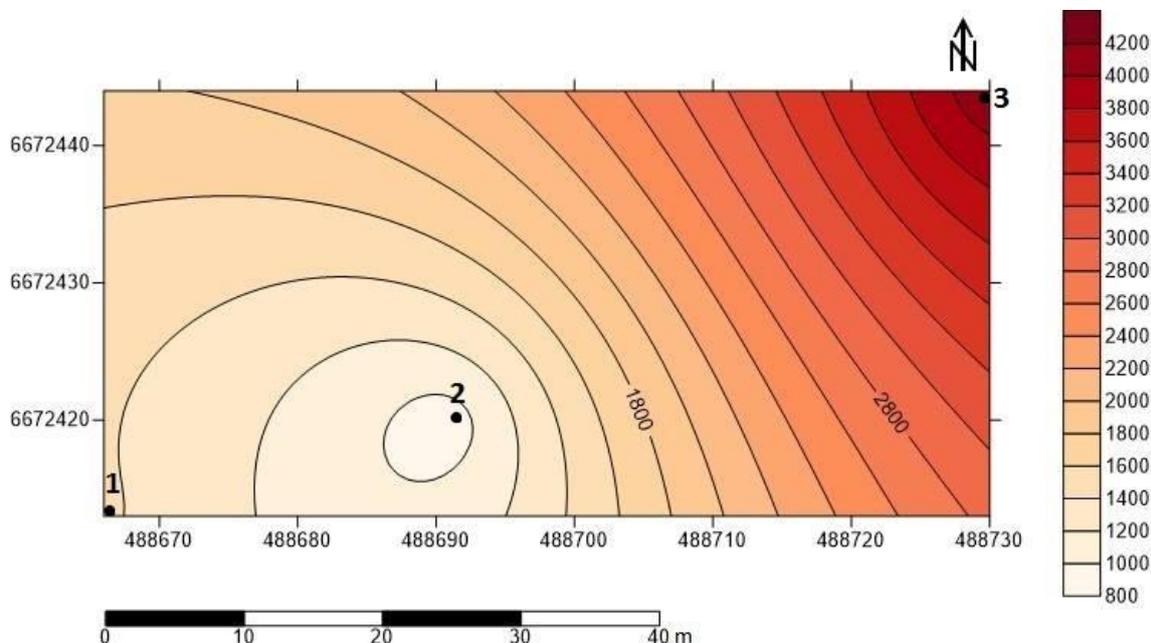
Tabela 2

Perfil Bento Gonçalves

UTM: 0488666/6672413		UTM: 0488691/6672420		UTM: 0488730/6672444	
Urânio: 1.6 ppm		Urânio: 1.6 ppm		Urânio: 2.2 ppm	
Ponto 1	Urânio: 1.6 ppm	Ponto 2	Urânio: 1.6 ppm	Ponto 3	Urânio: 2.2 ppm
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio	Medidas	Radônio
1	2730 +- 17%	1	1354 +- 24%	1	8583 +- 9%
2	2058 +- 19%	2	1215 +- 26%	2	6086 +- 11%
3	774 +- 36%	3	1442 +- 22%	3	3280 +- 15%
4	1358 +- 24%	4	775 +- 31 %	4	3148 +- 15%
5	956 +- 29%	5	191 +- 58%	5	1802 +- 21%
6	680 +- 40%	6	497 +- 43%	6	2145 +- 20%
Média	1431 Bq/m ³	Média	896 Bq/m ³	Média	4174 Bq/m ³

O mapa tratado estatisticamente com os dados das concentrações de radônio nos três pontos é apresentado na figura 22.

Figura 22 - Mapa estatístico de valores de concentração de radônio no Perfil Bento Gonçalves.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

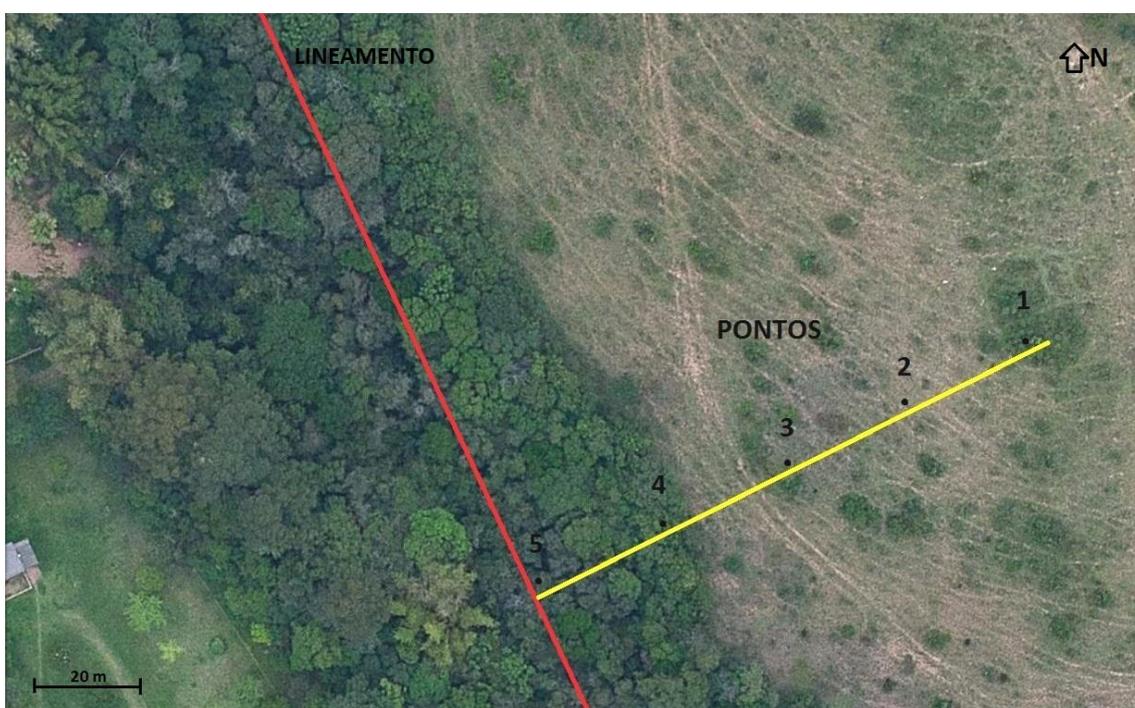
Como se pode visualizar, a partir da tabela 2 e do mapa da figura 18, há uma diferença de valores da concentração de radônio do ponto 1 para o ponto 2, com decréscimo da ordem de 37%. Já a diferença do ponto 2 para o ponto 3 registra um incremento de 366%. Não devemos ignorar o fato que a distância do ponto 1 para o ponto 2, em torno de 26 metros, é menor que a distância do ponto 2 para o ponto 3, aproximadamente 42 metros. Contudo, o valor medido no ponto 3 é significativamente maior do que os pontos anteriores.

Os dados de concentração de urânio obtidos através da gamaespectrometria, mostram o mesmo valor de 1,6 ppm nos pontos 1 e 2. O ponto 3 apresentou aumento de 37% (2,2 ppm) em relação aos dois primeiros. Não obstante tratar-se de um método semi-quantitativo, deve-se salientar a coincidência de comportamento de radônio e urânio no ponto 3.

7.3.2 Perfil Lomba do Pinheiro

No Perfil Lomba do Pinheiro foram realizadas análises em cinco pontos distribuídos transversalmente ao lineamento que possui direção noroeste. Neste perfil, foi possível distribuir homogeneamente, os pontos numa distância média de vinte metros, estando o ponto 5 situado junto ao lineamento. O perfil traçado, os pontos escolhidos e a feição estrutural são representados na figura 23.

Figura 23 - Perfil Lomba do Pinheiro e seus respectivos pontos.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

As concentrações de radônio e urânio nos cinco pontos são apresentadas na tabela 3 e representadas no mapa estatístico da figura 24.

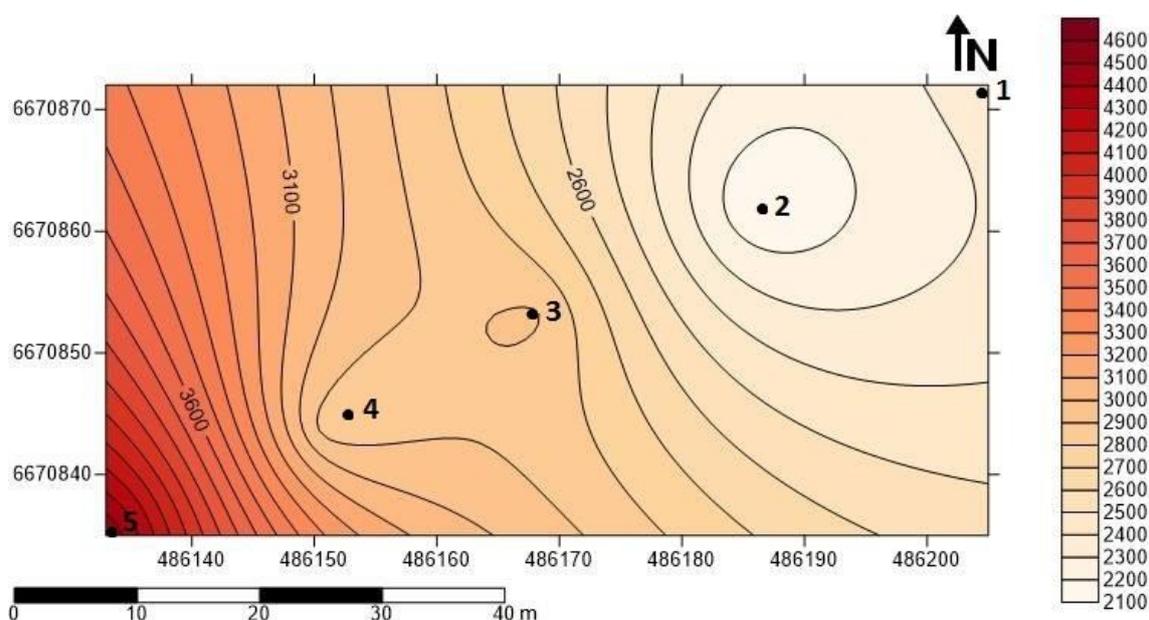
Tabela 3

Perfil Lomba do Pinheiro

UTM: 0486205/6670872		UTM: 0486186/6670862		UTM: 0486168/6670853	
Ponto 1	Urânio: 2.1 ppm	Ponto 2	U: 2.2 ppm	Ponto 3	U: 2 ppm
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio	Medidas	Radônio
1	2467 +- 23%	1	2345 +- 23%	1	3781 +- 15%
2	2933 +- 21%	2	1927 +- 29%	2	3154 +- 18%
3	3102 +- 20%	3	1719 +- 30%	3	2653 +- 23%
4	1982 +- 29%	4	2149 +- 25%	4	3289 +- 19%
5	1641 +- 30%	5	2632 +- 23%	5	1775 +- 30%
6	2008 +- 29%	6	1828 +- 30%	6	2846 +- 23%
Média	2355 Bq/m ³	Média	2100 Bq/m ³	Média	2916 Bq/m ³

UTM: 0486151/6670844		UTM: 0486133/6670835	
Ponto 4	U: 1.9 ppm	Ponto 5	U: 1.7 ppm
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio
1	1733 +- 30%	1	3785 +- 19%
2	2689 +- 24%	2	4452 +- 16%
3	2891 +- 23%	3	4107 +- 17%
4	3563 +- 18%	4	4492 +- 16%
5	3210 +- 19%	5	4858 +- 15%
6	2960 +- 23%	6	5321 +- 13%
Média	2841 Bq/m ³	Média	4502 Bq/m ³

Figura 24 - Mapa estatístico dos valores de concentração de radônio no Perfil Lomba do Pinheiro.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

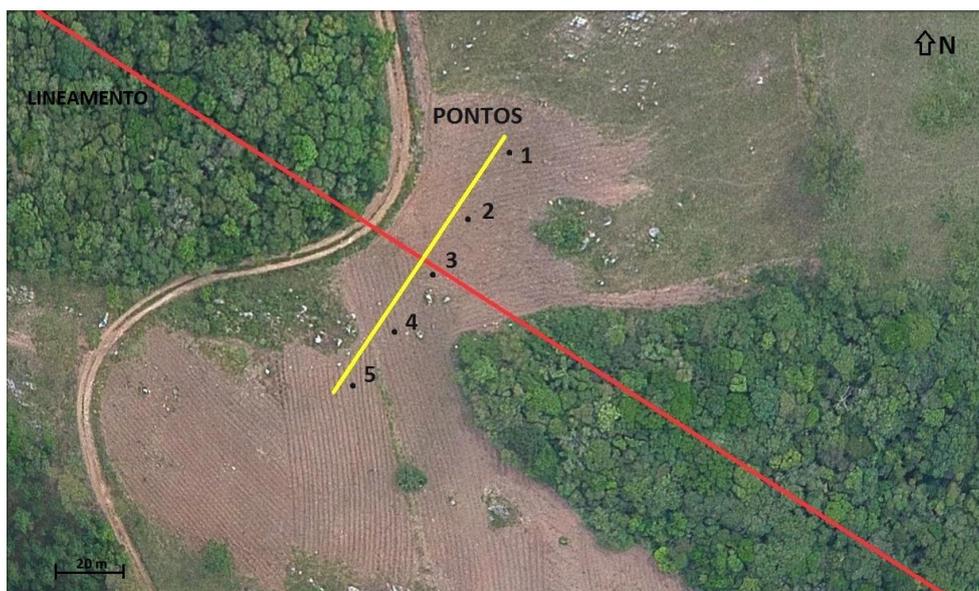
É possível visualizar que há uma pequena diferença de valores da concentração de radônio do ponto 1 para o ponto 2 (diminuição de 11%) e do ponto 3 para o ponto 4 (diminuição de 2,5%). Contudo, há um aumento de 39% do ponto 2 para o ponto 3 e um aumento de 58% do ponto 4 para o ponto 5. O aumento é ainda maior se considerarmos o valor da concentração medida do ponto 1 em relação ao ponto 5 (aumento de 114%).

No que diz respeito aos valores de gamaespectrometria, os teores de urânio no solo no Perfil Lomba do Pinheiro variam timidamente. O menor valor de 1.7 ppm é verificado no ponto 5 e o maior valor, de 2.2 ppm, no ponto 2. Neste caso, é importante assinalar que não existe uma correlação entre os valores de urânio medidos por gamaespectrometria e as concentrações de radônio.

7.3.3 Perfil Morro da Polícia

No Perfil Morro da Polícia foram realizadas medidas em cinco pontos, estando o ponto 3 localizado junto ao lineamento, feição esta que é muito visível em visão 3D do anaglifo. O perfil traçado e a localização dos pontos são representados na figura 25.

Figura 25 - Perfil Morro da Polícia e seus respectivos pontos e lineamento.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

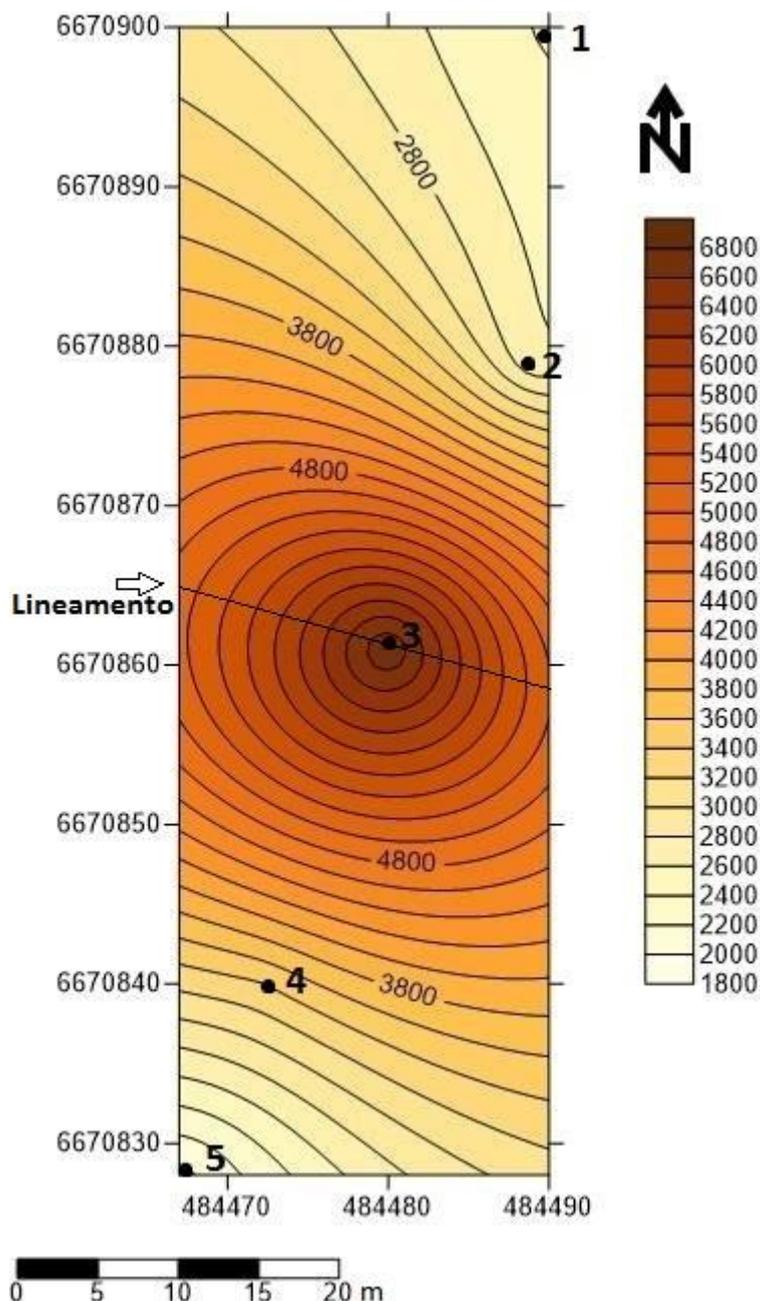
A tabela 4 registra as coordenadas geográficas, concentrações de radônio e urânio nos pontos do perfil Morro da Polícia.

Tabela 4

Perfil Morro da Polícia					
UTM: 0484490/6670900		UTM: 0484489/6670879		UTM: 0484480/6670861	
Ponto 1	Urânio: 1.8 ppm	Ponto 2	U: 1.9 ppm	Ponto 3	U: 2.3 ppm
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio	Medidas	Radônio
1	2730 +- 17%	1	5438 +- 12%	1	4629 +- 14%
2	2058 +- 19%	2	3201 +- 16%	2	9252 +- 9%
3	2536 +- 18%	3	2644 +- 18%	3	6621 +- 11%
4	1358 +- 24%	4	1998 +- 22%	4	7453 +- 10%
5	2857 +- 17%	5	957 +- 34%	5	6977 +- 11%
6	2692 +- 17%	6	1582 +- 25%	6	5916 +- 12%
Média	2372 Bq/m ³	Média	2637 Bq/m ³	Média	6808 Bq/m ³
UTM: 0484472/6670840		UTM: 0484467/6670828			
Ponto 4	U: 1.7 ppm	Ponto 5	U: 2 ppm		
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio		
1	3244 +- 16%	1	2115 +- 19%		
2	3428 +- 16%	2	1874 +- 23%		
3	3917 +- 15%	3	1526 +- 25%		
4	2986 +- 17%	4	2237 +- 19%		
5	3589 +- 16%	5	1983 +- 22%		
6	3121 +- 16%	6	1817 +- 23%		
Média	3381 Bq/m ³	Média	1925 Bq/m ³		

A figura 26 apresenta o mapa estatístico das concentrações médias de radônio no Perfil do Morro da Polícia:

Figura 26 - Mapa estatístico dos valores de concentração de radônio no Perfil Morro da Polícia.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

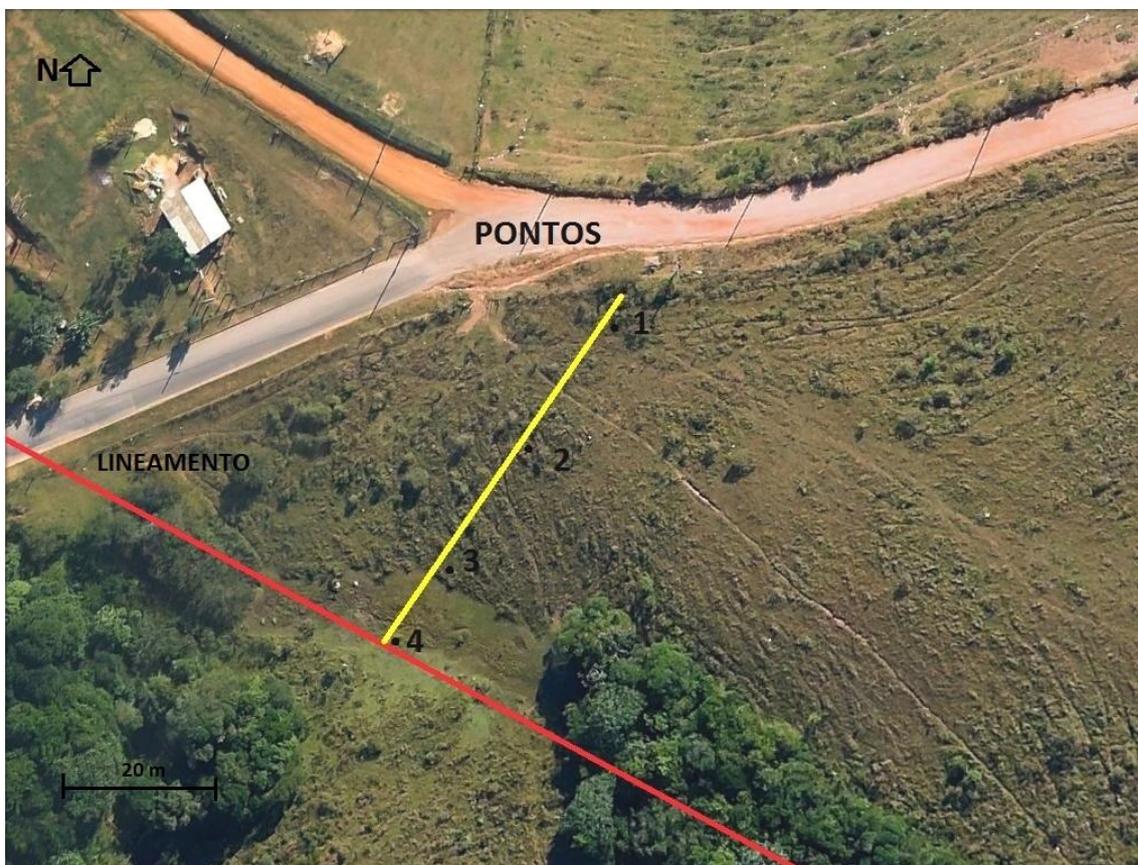
É facilmente observável, a partir da tabela 4, que os valores de concentração de radônio variam muito pouco entre os pontos 1 e 2 (aumento de 11%), havendo uma diferença maior entre os pontos 4 e 5 (decréscimo de 45%). Por outro lado, as concentrações de radônio apresentam um incremento de 158% do ponto 2 para o 3, enquanto este incremento é menor do ponto 4 para o 3, da ordem de 100%.

Os valores de urânio obtidos através da gamaespectrometria variaram pouco no Perfil Morro da Polícia. O maior valor encontrado foi 2.3 ppm no ponto 3 e o menor, 1.7 ppm, no ponto 4, situação que coincide com a variação dos resultados de radônio, isto é, o ponto que apresentou maior valor de urânio também foi o ponto que apresentou a maior concentração de radônio. Contudo, o ponto de menor concentração de urânio possui a segunda maior concentração de radônio no solo, o que representa uma inconsistência entre os dois métodos analíticos.

7.3.4 Perfil Arquidiocese

No Perfil Arquidiocese foram realizadas medidas em quatro pontos, estando o ponto 4 junto ao lineamento. O perfil traçado e a localização dos pontos são representados na figura 27.

Figura 27 – Localização dos pontos no Perfil Arquidiocese e o lineamento.



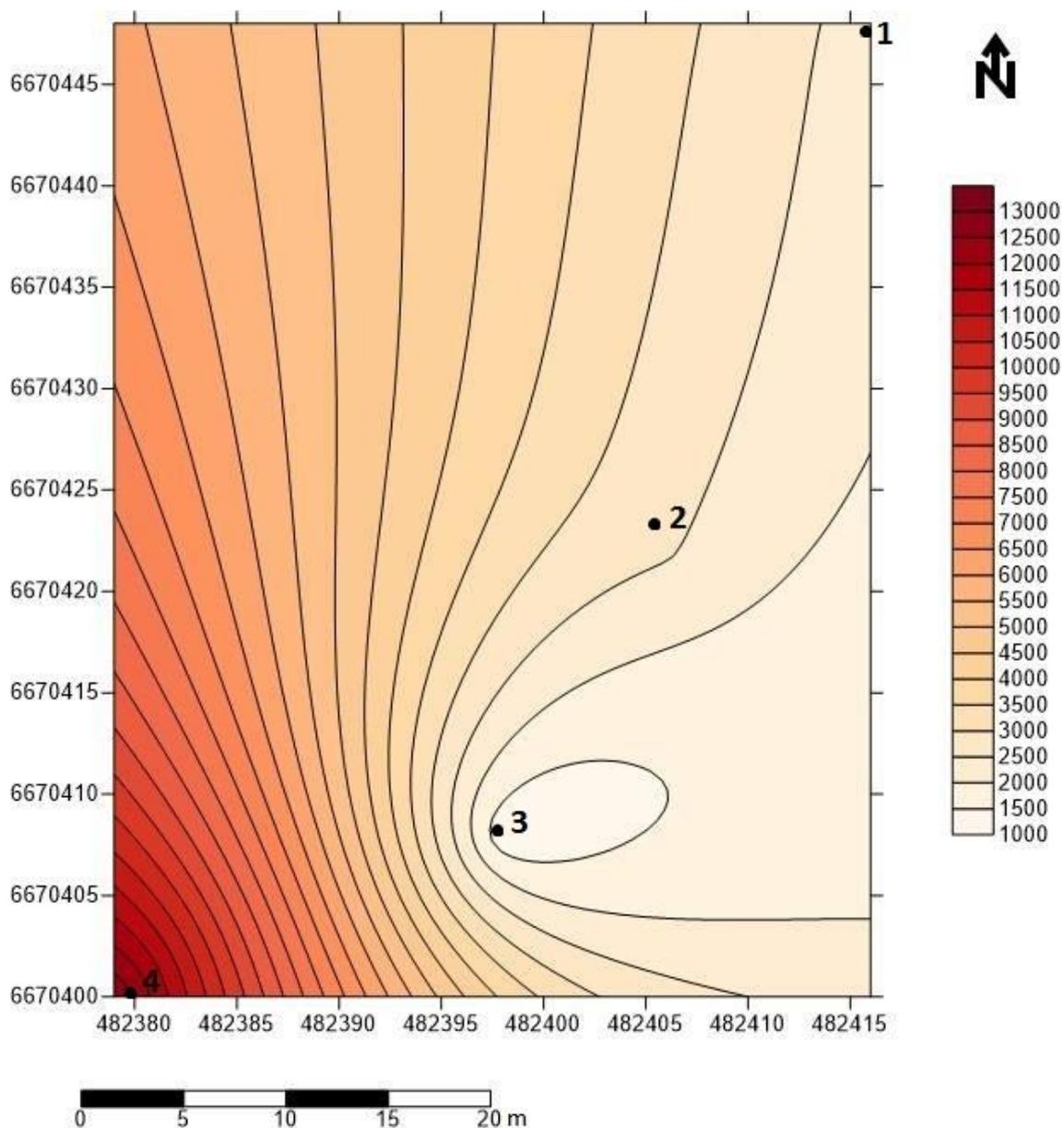
Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Na tabela 5 são apresentadas concentrações de radônio e urânio nos quatro pontos do Perfil Arquidiocese. Na figura 28 está representado o mapa estatístico de concentrações de radônio no perfil.

Tabela 5

Perfil Arquidiocese			
UTM: 0482416/6670448		UTM: 0482406/6670422	
Ponto 1	U: 3.1 ppm	Ponto 2	U: 1.8 ppm
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio
1	3037 +- 20%	1	3088 +- 18%
2	2852 +- 21%	2	3466 +- 17%
3	2512 +- 23%	3	2917 +- 20%
4	1761 +- 30%	4	2115 +- 26%
5	2209 +- 23%	5	1597 +- 33%
6	21494 +- 30%	6	2175 +- 26%
Média	2311 Bq/m ³	Média	2560 Bq/m ³
UTM: 0482398/6670408		UTM: 0482379/6670400	
Ponto 3	U: 2.6 ppm	Ponto 4	U: 1.9 ppm
Medidas	Radônio	Medidas	Radônio
1	2358 +- 22%	1	3668 +- 15%
2	759 +- 59%	2	19436 +- 6%
3	810 +- 51%	3	21091 +- 6%
4	938 +- 45%	4	17282 +- 6%
5	1312 +- 33%	5	9479 +- 9%
6	785 +- 47%	6	6753 +- 10%
Média	1155 Bq/m ³	Média	12952 Bq/m ³

Figura 28 - Mapa estatístico de valores de concentração de radônio no Perfil Arquidiocese.



Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

No Perfil Arquidiocese, o valor da concentração do radônio no ponto 4 é muito maior que as concentrações nos três pontos mais distantes do lineamento. Se compararmos os resultados, temos aumentos expressivos de 460%, 406% e 1021%, respectivamente dos pontos 1, 2 e 3 para o ponto 4.

As concentrações de urânio obtidas através da gamaespectrometria mostram claramente que não existe correspondência com a situação geológica

em relação ao lineamento e com o teor de radônio registrado, variando entre 1,8 e 3,1 ppm.

A visualização dos mapas estatísticos de distribuição do radônio deixa claro que em todos os quatro perfis realizados, as maiores concentrações nos solos coincidem com os lineamentos estruturais.

Por outro lado, os resultados de concentração de urânio obtidos por meio do método gamaespectrométrico, mostraram inconsistências em relação à distribuição do radônio e, não obstante haver uma limitação pelo número de pontos analisados, torna-se evidente não ser possível traçar correlações com significado geológico.

Por consequência, não obstante o radônio se originar por decaimento do urânio, não é possível correlacionar as concentrações destes elementos com as metodologias e equipamentos utilizados no presente estudo, o que pode ser decorrente da diferença de sensibilidade das duas técnicas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos preliminares realizados conduziram à seleção de uma área-piloto através da interpretação de imagens de relevo sombreado. Esta área compreende exposições do Granito Santana e do Granito Viamão. A fotointerpretação, por outro lado, permitiu a escolha de 4 lineamentos tectônicos com boa definição visual no campo.

Foram medidas as concentrações de urânio por gamaespectrometria e de radônio através do equipamento Sarad mod. RTM 1688 em pontos localizados ao longo de perfis transversais aos lineamentos selecionados.

As concentrações de urânio variaram entre 1,6 e 3,1 ppm, sem manter padrões de distribuição compatíveis com a localização dos lineamentos. No caso do radônio, as concentrações deste elemento no solo variaram entre 896 e 12952 Bq/m³. A distribuição deste elemento guardou estreita relação com os lineamentos, ou seja, os maiores valores, em todos perfis realizados,

coincidiram com estas estruturas, definindo sua localização no campo e demonstrando que a liberação mais intensa do gás se dá ao longo das fraturas.

Com isto, os resultados permitiram concluir que as concentrações de radônio no solo possuem uma distribuição consistente com os lineamentos registrados no campo. Desta forma, a metodologia pode ser utilizada como um guia para o mapeamento de estruturas e localização de poços em aquíferos de áreas urbanas, onde edificações, cobertura de solo com asfalto e serviços de terraplanagem tornam a visualização de fraturas pouco evidentes.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Appleton, D. (2005). Radon In Air and Water, Essentials of Medical Geology. *Editor: Olle Selinus*, 227-263.

Cavalcante, I. N., & Rebouças, A. D. C. (1990). Caracterização hidrogeológica de terrenos cristalinos com manto de alteração. *Águas Subterrâneas*, 13.

Cliff, K. D. (1990). U. K. National Radiological Protection Board radon calibration procedures. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 95(2), 135-138

Duarte, C. R. (2002). *Radioelementos naturais na área do Projeto Rio Preto (GO)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade de São Paulo.

Fianco, A. C. B. (2011). *Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre, RS*. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Fragoso Cesar, A. R. S., Figueiredo, M. D., Soliani Jr, E., & Faccini, U. F. (1986). O Batólito Pelotas (Proterozóico Superior/Eo-Paleozóico) no Escudo do Rio Grande do Sul. In *SBG, Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 34, pp. 1322-1342).

Milsom, J. 2003. *Field Geophysics*. 3ra edição, Chichester, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 232p.

Site do Mundo Educação. Disponível em <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/decaimento-radioativo-idade-terra.htm>
Acesso em: 06 de agosto de 2015.

Peireira, C. M. A. (2009). *Mapeamento de aquíferos fraturados empregando métodos geoeletricos e emanção natural de radônio*. São Paulo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal de São Paulo.

Philipp, R. P. (1995). Condições de posicionamento do plutonismo da Suíte Dom Feliciano na Região de Porto Alegre, RS. *SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS*, 5, 207-209.

Philipp, R. P., Machado, R., Nardi, L. V. S., & Lafon, J. M. (2008). O magmatismo granítico neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Brazilian Journal of Geology*, 32(2), 277-290.

Roisenberg, C., Viero, A. P., Roisenberg, A., Schwarzbach, M. S., & Morante, I. C. (2003). Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas Subterrâneas de Porto Alegre, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(4), 137-147.

Roisenberg, C. (2001). *Hidroquímica do Sistema Aquífero Fraturado Pré Cambriano e qualidade das águas subterrâneas do Município de Porto Alegre, RS*. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Schneider A.W., Loss E.L. & Pinto J.F. (1974). *Mapa Geológico da folha de Porto Alegre – RS*. Pesquisa Série Mapas (7). Porto Alegre. UFRGS. Instituto de Geociências.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. (1999). *Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis*. Wahsington, Federal Register 64, pp. 9559-9599.