

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BRUNA DA LUZ FARIAS

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO- 222 NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E O RISCO DE EXPOSIÇÃO PARA A POPULAÇÃO DE
CAÇAPAVA DO SUL- RS**

CAÇAPAVA DO SUL

2019

BRUNA DA LUZ FARIAS

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO- 222 NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E O RISCO DE EXPOSIÇÃO PARA A POPULAÇÃO DE
CAÇAPAVA DO SUL- RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Geofísica da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para obtenção
do Título de Bacharel em Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Vinícius de Abreu
Oliveira

CAÇAPAVA DO SUL

2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

d224a da Luz Farias, Bruna

AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO- 222 NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E O RISCO DE EXPOSIÇÃO PARA A POPULAÇÃO DE
CAÇAPAVA DO SUL- RS / Bruna da Luz Farias.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2019.

"Orientação: Vinícius de Abreu Oliveira".

1. Radônio. 2. Granito. 3. Poços. 4. AlphaGuard. 5.
Caçapava do sul. I. Título.

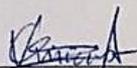
BRUNA DA LUZ FARIAS

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO – 222 NAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS E O RISCO DE EXPOSIÇÃO PARA A POPULAÇÃO DE
CAÇAPAVA DO SUL- RS**

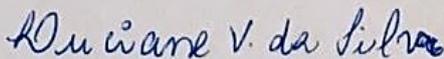
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geofísica

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 10, dezembro de 2019.

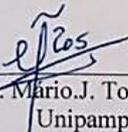
Banca examinadora:



Prof. Dr. Vinícius de Abreu Oliveira
Unipampa



Profª. Drª. Luciane Venturini da Silva
Unipampa



Prof. Dr. Mario J. Tomas Rosales
Unipampa

Dedico este trabalho a DEUS a minha família e
ao meu noivo Felipe Augusto Nascimento.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar eu agradeço a Deus, por estar sempre comigo, cuidar de mim, me dar forças, esperanças e confortar meu coração. Agradeço ao meu pai Orestes por tudo, porque se não fosse por ele o trabalho não teria se realizado, da forma dele me apoiou, me ajudou, e me deu tudo e todo o suporte necessário que eu precisei durante todo tempo de graduação e de vida. Agradeço a minha mãe Elisandra por cuidar de mim, manter tudo organizado e sempre sendo a base. Agradeço a minha maninha Helena Pyetra por ser incrivelmente fofa, por me descontraír e fazer minha vida mais feliz e iluminada. Agradeço ao meu orientador Vinicius de Oliveira por me orientar e ser um bom professor, agradeço a professora Luciane Venturini por ser mais que uma professora ser uma grande e querida amiga me ajudar e dar cálculo numérico nas férias de verão, agradeço ao professor Mário Rosales por me ensinar o que é de fato geofísica, agradeço ao Lenon por ser muito legal e nos ensinar o que pode mas não deve ser feito e agradeço ao Héber Caponi por me recepcionar tão bem em Poços de Caldas e viajar 1.624 Km de carro a cidade para que o trabalho pudesse ser realizado, agradeço a Graça Nascimento por me ajudar, e ter um bom coração e me dar o presente mais belo do mundo. Agradeço a Denize por ser uma amiga maravilhosa, pacienciosa, companheira, querida e aguentar meus ataques de pelanca. Agradeço a Fernanda por ser uma amiga maravilhosa. Agradeço a minha Bisavó Nair por orar por mim todos os dias. Agradeço aos meus colegas Barbara, Matheus Cruz, Guilherme, Víctor, Daniel, Weliton e Nicolas por serem bons amigos, por sobreviverem todas as lutas, compartilhando momentos, experiências, sábados, relatórios, trabalhos de campos pesados e a ao Mário. E em especial eu quero agradecer ao meu noivo Felipe Augusto Nascimento por simplesmente ser uma pessoa incrível, bondosa, generosa, gentil e pacienciosa, meu melhor amigo, meu grande companheiro por me ajudar e apoiar em absolutamente **tudo** e me ensinar que geofísica não é um suquinho de uva, obrigado pela orientação no trabalho, e obrigado por ser um anjo na minha vida.

Não tenha medo, pois eu estou com você. Não precisa olhar com desconfiança, pois eu sou o seu Deus.
Eu fortaleço você, e o ajudo e o sustento com minha direita vitoriosa.

(Isaías 41:10)

RESUMO

O presente trabalho pioneiro verificou a concentração em águas subterrâneas do município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul/RS, cuja a população é de cerca 45 mil habitantes (IBGE/2018). Visto que há conhecimento sobre os fatores que afetam a presença desse elemento nas águas subterrâneas, e sendo esse a causa de vários problemas de saúde ao ser humano, este trabalho propões analisar amostras de águas de poços tubulares e freáticos da região em três domínios litológicos distintos. A geologia da área compreende granitóides biotita, leucogranitóides e granitóides bandados, que formam o Complexo Granítico Caçapava do Sul. As concentrações foram medidas através do equipamento AphaGUARD (Genitron GmbH). Após obter as medidas foram comparadas com os limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), cujo valor máximo é de 100Bq/L (100 desintegrações por segundo por litro) para verificar se proporcionam algum risco para a população que a utiliza. Das diversas medidas realizadas em poços tubulares e freáticos, notou-se uma concentração elevada que apresentam relação com a litologia granítica e estruturas geológicas.

Palavras- Chaves: 1. Radônio. 2. Granito. 3.Poços. 4.AlphaGuard. 5. Caçapava do Sul

ABSTRACT

This pioneering work verified the concentration in groundwater of the city of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul / RS, whose population is about 45 thousand inhabitants (IBGE / 2018). Since there is knowledge about the factors that affect the presence of this element in groundwater, and this is the cause of several human health problems, this paper proposes to analyze water samples from the region's tubular and groundwater wells in three distinct lithological domains. . The geology of the area comprises biotite granitoids, leucogranitoids and banded granitoids, which form the Caçapava do Sul Granitic Complex. Concentrations were measured using the AphaGUARD equipment (Genitron GmbH). After obtaining the measurements, they were compared with the limits established by the World Health Organization (WHO), whose maximum value is 100Bq / L (100 disintegrations per second per liter) to verify if they present any risk to the population that uses it. Of the various measurements made in tubular and groundwater wells, a high concentration was noted that is related to granite lithology and geological structures.

Keywords: 1. Radon. 2. Granite 3.Wells. 4.AlphaGuard. 5. Caçapava do Sul

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Série radioativa do Urânio-238 – Rádio.....	17
Figura 2 –Elementos radioativos em diferentes tipos de rochas	19
Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo	23
Figura 4 – Mapa geológico da área de estudo (BITENCOURT,1983).....	26
Figura 5– Amostras retiradas em campo.....	27
Figura 6– Bacias hidrográficas do município de Caçapava do Sul.....	28
Figura 7–Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos (MACHADO, 2005).....	30
Figura 8– Equipamento AlphaGUARD PQ2000PRO (GENITRON,2007).....	33
Figura 9 – AlphaPUMP.....	34
Figura 10 – Aquakit.....	34
Figura 11- Mapa geológico.....	40
Figura 12- Mapa de isocontorno de concentração de Rn ²²²	41
Figura 13- Mapa da distribuição da população.....	42
Figura 14 – Mapa de quantidade de poços.....	43
Figura 15- Mapa de classificação de risco.....	44
Figura 16 – Tabela dos cálculos de prioridade Processo de Análise Hierárquico.....	45
Figura 17 – Histograma de concentração de Rn ²²² e números de poços.....	41
Figura 18 – Mapa de isocontorno de concentração de Rn ²²²	42
Figura 19 – Mapa de zona de risco de exposição de Rn ²²²	50
Figura 20 – Mapa <i>raster</i> de zona de risco de exposição de Rn ²²²	51
Figura 21 – Mapa a) mapa geológico retirado da Pós-Graduação em Ciências, Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre- RS, Ana Clara Fianco. Mapa b) mapa de isocontorno de concentração de Rn ²²² do município de POA. Fonte: autora.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE eU^{238} EM ALGUNS TIPOS DE ROCHAS.....	18
Tabela 2 – ESTUDOS DE RADIAÇÃO EM VÁRIOS PAÍSES.....	21
Tabela 3 – LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS PONTOS AMOSTRADOS.....	32
Tabela 4- TEORES DISSOLVIDOS NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DE CAÇAPAVA DO SUL.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP- Processo de Análise Hierárquico
AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica
BC - Bacia do Camaquã
CPRM -Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CMPF – Complexo Metamórfico Passo Feio
 (smcs)- sequência metasedimenter clássica
 (smqs)- sequência metasedimenter química
 (smbs)- sequência metasedimenter básica
ESRG- Escudo Sul-Rio-grandense
FH - Formação Hilário
fgb – Fácies Granitoides Bandados
flg – Fácies Leucogranitoides
fbg – Fácies Biotita Granitoides
FRB – Formação Rio Bonito
GSF – Granito Santos Ferreira
GM - Grupo Maricá
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
K - potássio
OMS – Organização Mundial da Saúde
Pa²³⁴ - protactínio de massa 234 u
Pb²⁰⁶ - chumbo de massa 206 u
ppm – Parte por milhão
Rn²²²- radônio de massa de 222 u
Ra²²⁶ - rádio de massa 226 u
Th²³⁴ - tório de massa de 234 u
TTa -Terreno Taquarembó
TT -Terreno Tijucas
TSG-Terreno São Gabriel
U²³⁸ - urânio de massa 238 u
u- Unidade de massa atômica ($1,66 \cdot 10^{-27}$ kg)
USEPA – Agência de proteção ambiental dos EUA

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO GERAL.....	16
2.1 OBJETIVO ESPECIFICO.....	16
3 JUSTIFICATIVA.....	16
4 REVISÃO DE BIBLIOGRAFICA.....	17
4.1 Considerações Iniciais sobre o Rn²²².....	17
4.2 Características da Emissão de Rn²²².....	19
4.3 Meia vida.....	20
4.4 Relação do Rn²²²e Saúde.....	20
5 ÁREA DE ESTUDO.....	22
5.1 LOCALIZAÇÃO.....	22
6 GEOLOGIA.....	24
6.1 GEOLOGIA LOCAL.....	27
7 DOMÍNÍOS HIDROGEOLÓGICOS E SISTEMAS AQUÍFEROS EM CAÇAPAVA DO SUL.....	28
8.MATÉRIAS E MÉTODOS.....	32
8.1 METODOLOGIA APLICADA.....	32
8.1.1 EQUIPAMENTO AlphaGUARD PQ2000PRO.....	33
8.1.2 MEDIDAS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA.....	35
8.1.3 FLUXOGRAMA DE TRATAMENTO DE DADOS.....	37
8.1.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	38
8.1.5 O MÉTODO PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICO (AHP)	39
9 RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES	46
9.1 MEDIDAS DE RADIAÇÃO.....	46
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A.....	60

1 INTRODUÇÃO

O radônio (Rn^{222}) foi descoberto por Robert Bowie Owens e Ernest Rutherford em 1899, sendo um gás nobre incolor, inodoro, inerte e radioativo, com meia-vida de 3,82 dias que aparece na natureza oriundo do decaimento da série do Urânio-238 (EPA,2003, UNSCEAR,2000; LANL,2003). As rochas que possuem este elemento emitem continuamente para o ambiente. Estudos da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 1999), indicam que altos índices de Rn^{222} no ambiente são responsáveis por apresentar riscos à saúde da humana. O decaimento do Rn^{222} libera principalmente partículas alfa, que embora não possam penetrar por longas distâncias, apresentam uma alta capacidade de ionização de átomos, podendo danificar tecidos orgânicos e até alterar o DNA (GESELL & PRICHARD, 1975,1980).

O Rn^{222} pode ser prejudicial à saúde quando inalado ou quando consumido junto com a água, o elemento em questão é responsável por cerca de 21.000 casos de câncer de pulmão no mundo por ano, sendo ultrapassado apenas pelo cigarro. Esse elemento é responsável por 55% da radiação natural e os outros 45% de diversas radiações, como: raios cósmicos (8%); radiação terrestre (8%); radiação interna (11%); Raios X (11%); medicina nuclear (4%); usinas nucleares (1%) e outros produtos (1%) (BUSHONG,2001).

Devido as propriedades geoquímicas do Rn^{222} , as rochas graníticas com afinidades alcalinas e rochas feldspatóídicas são as mais propícias a terem elevados teores deste elemento. Nessas rochas, o Rn^{222} normalmente está presente em minerais acessórios, como na monzonita, zircão, thorita, esfeno, apatita, alanita entre outros minerais (BUTLER & SCHANABEL,2000). O Rn^{222} consegue emanar por rachaduras, fissuras e poros do solo para a atmosfera e se alojar em diversas construções como: residências, prédios, escolas, garagens e minas subterrâneas.

Uma das características do Rn^{222} é ser um gás pesado, fazendo com que se acumule no subsolo e lençóis freáticos (UNSCEAR,2000). Esse elemento se move mais lentamente na água do que no ar (ALDENKAMP,1994), como pode ser evidenciado através do coeficiente de difusão do gás: $1,0 \times 10^{-9} \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para a água, e $1,0 \times 10^{-6} \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ para o ar. O Rn^{222} quando dissolvido na água se encontra na forma de pequenas bolhas que escapam facilmente devido alguma turbulência, sendo o motivo de rios e córregos apresentarem baixa concentração de Rn^{222} . Ao mesmo tempo, o Rn^{222} pode ser transportado por até 5 km através de fraturas e cavernas (UNSCEAR,2000).

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA, 2014) estabeleceu um limite de concentração máxima de Rn^{222} em ar em ambientes fechados em $300Bq/m^3$. A OMS (Organização Mundial da Saúde) estabeleceu um limite máximo de concentração de Rn^{222} em água que é $100Bq/L$ e sugere-se medidas de precaução caso a radioatividade medida exceder $0,1 Bq/L$ na água potável. Desta forma é relevante determinar se as concentrações de Rn^{222} são aceitáveis ou se requerem medidas de proteção a população devido aos impactos a saúde gerados pela exposição (WHO, 2004). Há risco de contaminação por Rn^{222} quando inalado ou ingerido, assim em 1994 a EPA (Environmental Protection Agency), relatou que a quantidade do consumo da água potável deve ser um item a ser estudo, e infelizmente estudos não estão sendo realizados em muitos países, principalmente no Brasil (EPA,2003; EPA,2009).

As células mais afetadas quando o Rn^{222} é ingerido são as células-tronco e aquelas que apresentam grande proliferação (as que tem capacidade de divisão contínua) na garganta e na parede do estômago, principalmente as células que constituem as glândulas secretoras. Ao percorrer o trajeto digestivo o gás é absorvido pelo intestino delgado, permanecendo em média de 15 a 20 minutos, também ocorrendo prejuízo nas células desse órgão. Ao mesmo tempo, a água ao ser ingerida com o Rn^{222} difunde-se na parede do estômago e é interceptada pela mucosa e estrutura vascular desse órgão. Antes que as partículas alfas atinjam uma maior profundidade o tecido que reveste internamente esse órgão absorve o gás. O Rn^{222} é pouco solúvel em tecidos do corpo, mas penetra na corrente sanguínea e segue até o fígado e outros órgãos do corpo humano e grande parte é eliminado em dentro de uma hora após a ingestão (EPA, 1999; EPA,2003; EPA,2009).

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho é verificar os valores de concentrações de Rn^{222} , confeccionar um mapa de domínio de concentração, averiguar se há possibilidade de risco de exposição para população, e se a geologia da região tem influência sobre esse risco.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos neste projeto incluem:

- Correlacionar as concentrações medidas com a litologia do município granito-Caçapava do Sul;
- Verificar se o granito atua como um influenciador direto das concentrações de Rn^{222} ;
- Verificar zona de risco de exposição;
- Comparar os resultados obtidos com outros valores de referências adotados pela Organização Mundial da Saúde (OMS);
- Tratamento de dados estático dos dados de concentração de Rn^{222} mediante a confecção de histogramas de frequência;
- Confecção de um mapa de risco de vulnerabilidade.

3 JUSTIFICATIVA

A escolha da área de estudo se justifica por compreender granitóides, com a população locada sobre ele. Tem-se que a composição litológica desses granitóides está presente o elemento químico radioativo U^{238} cuja série de decaimento apresenta o elemento radioativo de interesse neste trabalho, o Rn^{222} .

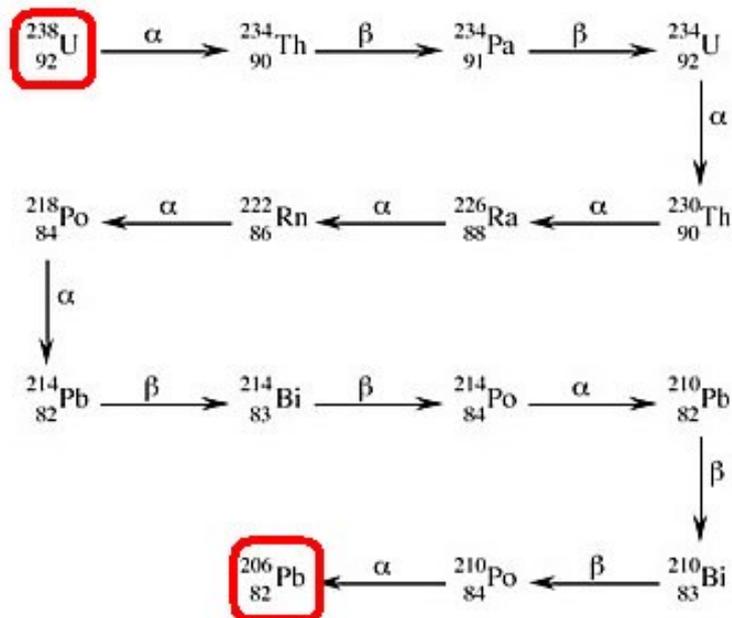
O interesse no Rn^{222} está no fato de que quando ingerido altera o funcionamento dos órgãos do aparelho digestivo, o que sugere a necessidade de controle da concentração deste elemento por questão de saúde pública. A área de estudo possui poços tubulares e freáticos de distintas profundidades assim facilitando a realização do trabalho. E ainda não existem trabalhos desse porte em Caçapava do Sul, embora tenhamos uma fonte de evidência deste elemento devido a sua associação com a litologia granítica.

4 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

4.1 Considerações Iniciais sobre o Rn²²²

O radônio é um gás nobre que possui número atômico 86, encontrando-se na natureza em minerais, dissolvido em águas subterrâneas ou livre na atmosfera, sendo formado a partir do decaimento radioativo da série do U²³⁸ (Figura 1). Está presente na natureza na forma três isótopos naturais, o Rn²²², Rn²²⁰ (torônio) e Rn²¹⁹ (actinônio). Esses três isótopos de radônio são oriundos do decaimento radioativo dos isótopos de rádio (Ra²²⁶, Ra²²⁴ e Ra²²³) (APPLETON, 2005). O Rn²¹⁹ apresenta um tempo de meia-vida de apenas 3,92 segundos, limitando sua ocorrência e abundância na atmosfera (APPLETON, 2005). O tempo de meia-vida do Rn²²⁰ é de 56 segundos, enquanto a meia-vida do Rn²²² é de 3,82 dias. O Rn²²² é o mais abundante dos isótopos deste elemento na natureza, razão pela qual é o isótopo que possui maior número de trabalhos na literatura. Além disso, o Rn²²² pode ser transportado por maiores distâncias do que os outros isótopos do mesmo elemento (APPLETON, 2005).

Figura- 1 Série radioativa do Urânio-238 – Rádio Fonte: (modificado de TANNER, 1978)



Os níveis de Rn²²² no ar estão relacionados diretamente com a litologia da região. Em geral, as rochas metamórficas, granitos, folhelhos, carbonosos, e rochas carbonáticas e fosfáticas com altas concentrações de U²³⁸ e Ra²²⁶, são as que apresentam maiores

concentrações deste elemento (Tabela-1). O U^{238} é um elemento litófilo, com meia vida de 4,5 bilhões de anos sendo incompatível com os minerais do manto se concentrando mais na crosta. O U^{238} nas rochas ígneas encontra-se, em maior concentração nas rochas intrusivas, como sienitos e granitos alcalinos e granodioritos. A Figura 2 relaciona a abundância de elementos radioativos em diferentes tipos de rochas, que usualmente apresentam altos teores de minerais radioativo (APPLETON, 2005).

Tabela-1 concentrações médias de eU^{238} em alguns tipos de rochas. Fonte: modificado em TANNER, (1978).

ROCHAS		eU (ppm)
ÍGNEAS	Graníticas	4,19
	Gabróides	0,84
	Ultramáficas	0,022
	Ecogitos	0,20
	Intrusivas alcalinas	9,82
	Basálticas	0,43
	Arenitos	1,48
	Folhelhos	3,25
	Bauxita	11,4
	Bentonita	5,0
SEDIMENTARES	Calcários	2,19
	Fosfáticas	50-300
	Evaporitos	<0,1
	Areias	3,0
	Lamas	2,3
	Anfibolito	3,5
	Gnaisse	2,2
	Paragnaisse	4,5
METAMÓRFICAS	Granulito	4,9
	Ortognaisse	3,6
	Mármore	0,17
	Filito	1,9
	Xisto	2,5

Figura 2- Elementos radioativos em diferentes tipos de rochas



Fonte: Wollenberg, (1977)

O Rn^{222} é o único elemento gasoso na série de decaimento radioativo do U^{238} e do tório, sendo naturalmente gerado. Appleton (2005) destaca que ambientes fechados e com baixa ventilação apresentam maior acumulação de Rn^{222} . A concentração dos isótopos de Rn^{222} em solos depende das propriedades físicas dos mesmos. Da mesma forma, a velocidade com a qual o radônio se desloca no solo é controlada, principalmente, pela granulometria do solo e pela quantidade de água presente entre os grãos. De maneira geral solos arenosos favorecem o escape do Rn^{222} para ambiente, e solos argilosos tendem a reter o gás, em um processo de confinamento (DUARTE, 2002, FIANCO et al., 2012).

4.2 Características da Emissão de Rn^{222}

Os isótopos de Rn^{222} são liberados quando o Ra^{226} decai por meio de emissão alfa. Os principais fatores que determinam a saída do Rn^{222} do meio no qual se encontram são localização do átomo de Ra^{226} no grão mineral, a densidade do meio e a direção que o átomo de Rn^{222} assume no momento da sua emissão. Se o átomo de Ra^{226} se encontra localizado em uma região muito interna na estrutura mineral, dificilmente o Rn^{222} é liberado para atmosfera (TANNER, 1978). Mas se o Rn^{222} gerado pelo decaimento radioativo estiver localizado próximo a superfície, ele poderá ser liberado por espaços intersticiais ou planos de

fraturas das rochas. Para a maioria dos solos, entre 10% a 50% do Rn^{222} produzido consegue ser liberado do mineral em que está presente (TANNER,1978). Os átomos de Rn^{222} que entram nos interstícios são transportados por difusão e advecção, podendo ser liberados na atmosfera. Nascimento (2008) destaca que a capacidade de adsorção dos argilominerais pode favorecer a retenção de isótopos radioativos, por isso espera-se uma relação positiva entre radioatividade e teor de finos.

4.3 Meia vida

A meia-vida ($T_{1/2}$) é o tempo para que núcleos radioativos (N) e o decaimento radioativo (R) diminuam a metade do valor inicial, sendo uma propriedade estatística utilizada para grande quantidade de átomos envolvidos no decaimento radioativo. Para obter uma relação entre a meia-vida ($T_{1/2}$) e a constante de desintegração (λ), substituímos o tempo (t) por ($T_{1/2}$) na equação de decaimento radioativo (Equação 1).

$$R = R_0 \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

Onde R_0 é a taxa de decaimento no instante $t=0$ e R é a taxa de decaimento em $t>0$. Assim obtêm-se a equação (2), (HALLIDAY et.al., 2009).

$$\frac{1}{2} R_0 = R_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) \quad (2)$$

Após umas interações matemáticas tem-se a meia-vida ($T_{1/2}$) através da equação (3):

$$\begin{aligned} T_{1/2} &= \ln 2 / \lambda \\ T_{1/2} &= 0,693 / \lambda \end{aligned} \quad (3)$$

4.4 Relação do Rn^{222} e Saúde

Elevados teores de Rn^{222} são conhecidos na literatura por apresentar riscos à saúde da população, podendo, muitas vezes, ser responsável por casos de doenças como câncer. Os danos causados por emissão de Rn^{222} foram estudados e debatidos por BEIR V (1990).

USEPA (1999), indicam que altos índices de Rn^{222} no ambiente são responsáveis por apresentar riscos à saúde da população. O mesmo estudo revela que 89% das mortes

relacionadas ao Rn^{222} são devidas a inalação do gás; os outros 11% são resultados da ingestão direta do mesmo na água.

A NRC (*National Council on Radiation Protection and Measurement*) realizou um estudo nos USA na década de 80 e constatou que apenas 18% da radiação é resultado de ação humana. Os outros 82% da radiação são decorrentes de processos naturais de decaimento radioativo, e o Rn^{222} foi considerado como a principal fonte natural de radiação.

Estudos sobre radiação oriunda do Rn^{222} e os riscos causados a saúde da população foram realizados em diversos países como Reino Unido, Irlanda, Austrália, dentre outros (Tabela- 2), muitos desses países fornecem níveis máximos tolerados (WHO,2009).

Tabela- 2 Estudos de radiação em vários países

País	Concentração média nos lares (Bq/m³)	Nível para ação (Bq/m³)
Austrália	-	200
Bélgica	-	400
Tchéquia	140	200
Finlândia	123	400
Alemanha	50	250
Irlanda	60	200
Israel	-	200
Lituânia	37	100
Luxemburgo	-	250
Holanda	-	20
Noruega	51-60	200
Polónia	-	400
Rússia	19-250	-
Suécia	180	400
Suíça	70	1000
Reino Unido	20	200
Comunidade Europeia	-	400
USA	46	150
Canadá	-	200

Fonte: WHO,(2009)

Corrêa (2006) realizou um estudo de concentrações de Rn^{222} em casas no Município de Curitiba, PR. Segundo o autor,75% das casas amostradas apresentou concentrações de até 50 Bq/m³, 10% dos resultados ficaram entre 50 e 100 Bq/m³ e 16% ficaram acima de 100Bq/m³.

No estado do Rio Grande do Sul, foi realizado um levantamento de dados de radiação pela CPRM. O objetivo desse estudo foi adquirir dados de gamaespectômetro em diversas áreas do RS, incluindo a capital Porto Alegre.

Fianco et.al (2011) realizou um estudo pioneiro de concentrações de Rn^{222} na região de Porto Alegre, RS, utilizando principalmente dados de concentrações em águas subterrâneas. Segundo o autor, as concentrações de Rn^{222} encontradas refletem a variabilidade litológica, comparando os valores de concentração de Rn^{222} da intrusão granítica com os demais domínios.

Cerca de 50 % dos poços analisados apontaram concentrações do gás maiores que 100 Bq/L, ou seja, valores maiores que o permitido pela Organização Mundial da Saúde. E o estudo destacou que a porosidade e permeabilidade dos solos influenciaram diretamente na distribuição do Rn^{222} .

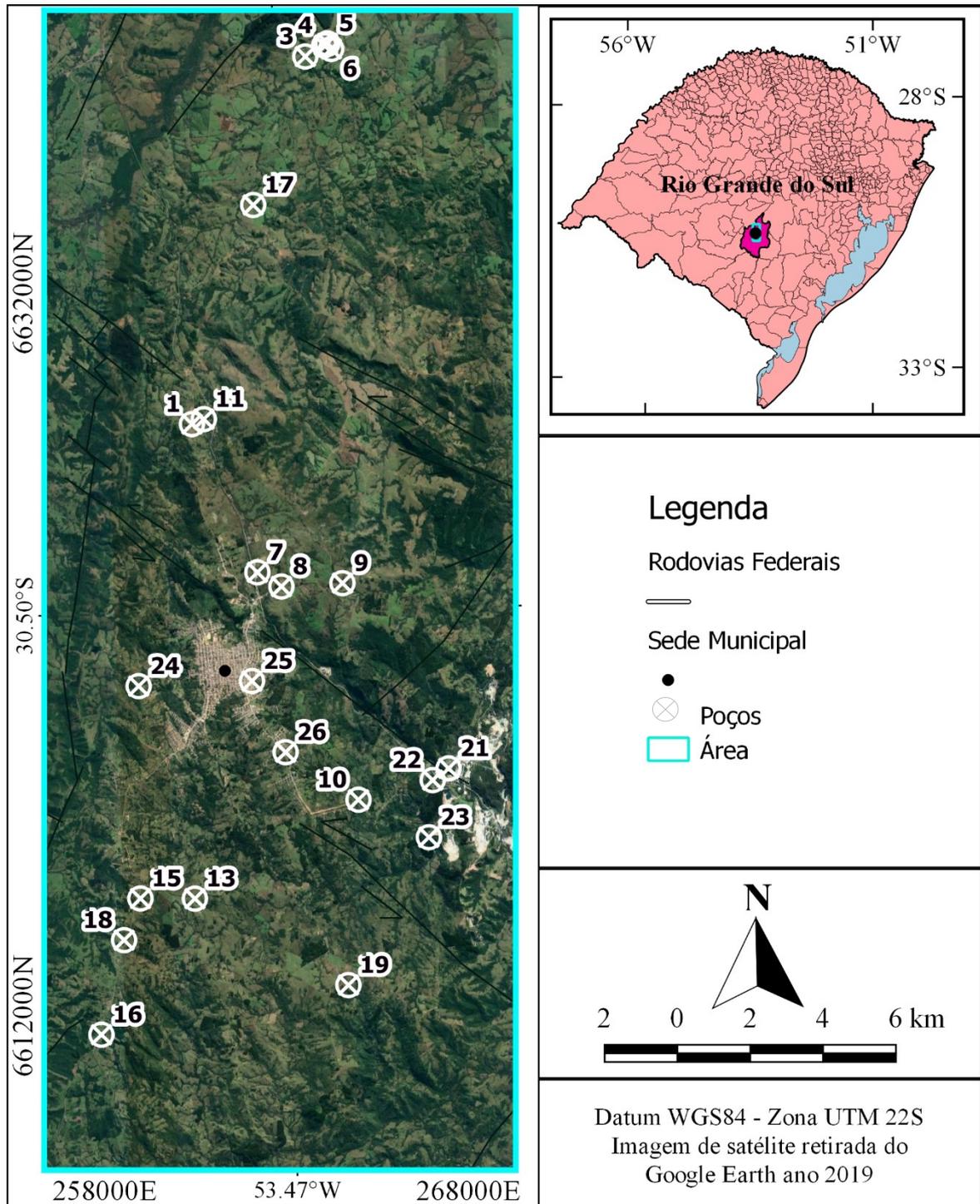
Foram retirados do trabalho da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências, mestrado 2011, da Ana Clara Fianco (Orientador Ari Roisenberg), os valores de concentrações de Rn^{222} em águas subterrâneas dos poços em Porto Alegre – RS, para realizar um mapa de isocontorno dos dados sobre a área de estudo, e comparar o meu resultado com o resultado obtido dos valores retirados do referido trabalho.

5 ÁREA DE ESTUDO

5.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo Figura-3 localiza-se no município de Caçapava do Sul localizado na porção centro sul do estado do Rio Grande do Sul com latitude $30^{\circ} 30' 44''$ S, longitude $53^{\circ} 29' 29''$ W e altitude: 444 metros, encontra-se a 260 km da capital Porto Alegre, com acesso pelas rodovias BR-290 e BR-392.

Figura 3- Mapa de localização da área de estudo (datum: WGS84)



Fonte: shapefiles disponíveis no geobank, CPRM(2018) ano da imagem do Google Earth 2019

6 GEOLOGIA

As principais unidades geológicas representadas na área de estudo são: Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS), Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF) e Grupo Maricá (GM). A figura 4 traz estas informações e mais detalhes (BITENCOURT,1983).

Complexo Granítico Caçapava do Sul - O CGCS intruiu as rochas supracrustais do CMPF há 562 ± 8 Ma e forma um corpo alongado na direção N-S, constituído predominantemente por leucogranitos, monzogranitos e granodioritos com magma formador derivado da fusão de rochas crustais do embasamento, que ocorreu durante o período de soerguimento regional em regime transtensivo (REMUS et al., 2000). A intrusão do granito é sintectônica a uma zona de cisalhamento transcorrente, gerando estruturas de deformação planares e lineares nas unidades CMPF e Alogrupo Bom Jardim (REMUS et al., 1999).

O Complexo Granítico de Caçapava do Sul é formado por três fácies principais, reconhecíveis por petrografia e geoquimicamente.

Fácies Biotita Granitoides (fbg) - constituídas por granodioritos a monzogranito de textura heterogranular a porfiritica com matriz heterogranular, teor de máfico superior a 10% com ampla predominância de biotita sobre anfibólio, alanita como acessório característico ocorrência subordinada de termos equigranulares finos, raros corpos de dioríticos lenticulares de dimensões métricas e contatos difusos, são rochas de coloração cinza, tornando-se róseas quando intemperizadas. Predominam nas porções sul, sudoeste e oeste do complexo (BITENCOURT,1983).

Fácies Leucogranitóides (flg) - de contato transicional ou intrusivo nas demais constituída por monzagranitos predominantes sofre sienogranitos de textura equigranular a heterogranular média teor de biotita inferior a 5%, contendo localizadamente granada e/ou muscovita termos de granulação fina de ocorrência subordinada são rochas de coloração rósea, predominam na porção norte-nordeste do corpo (BITENCOURT,1983).

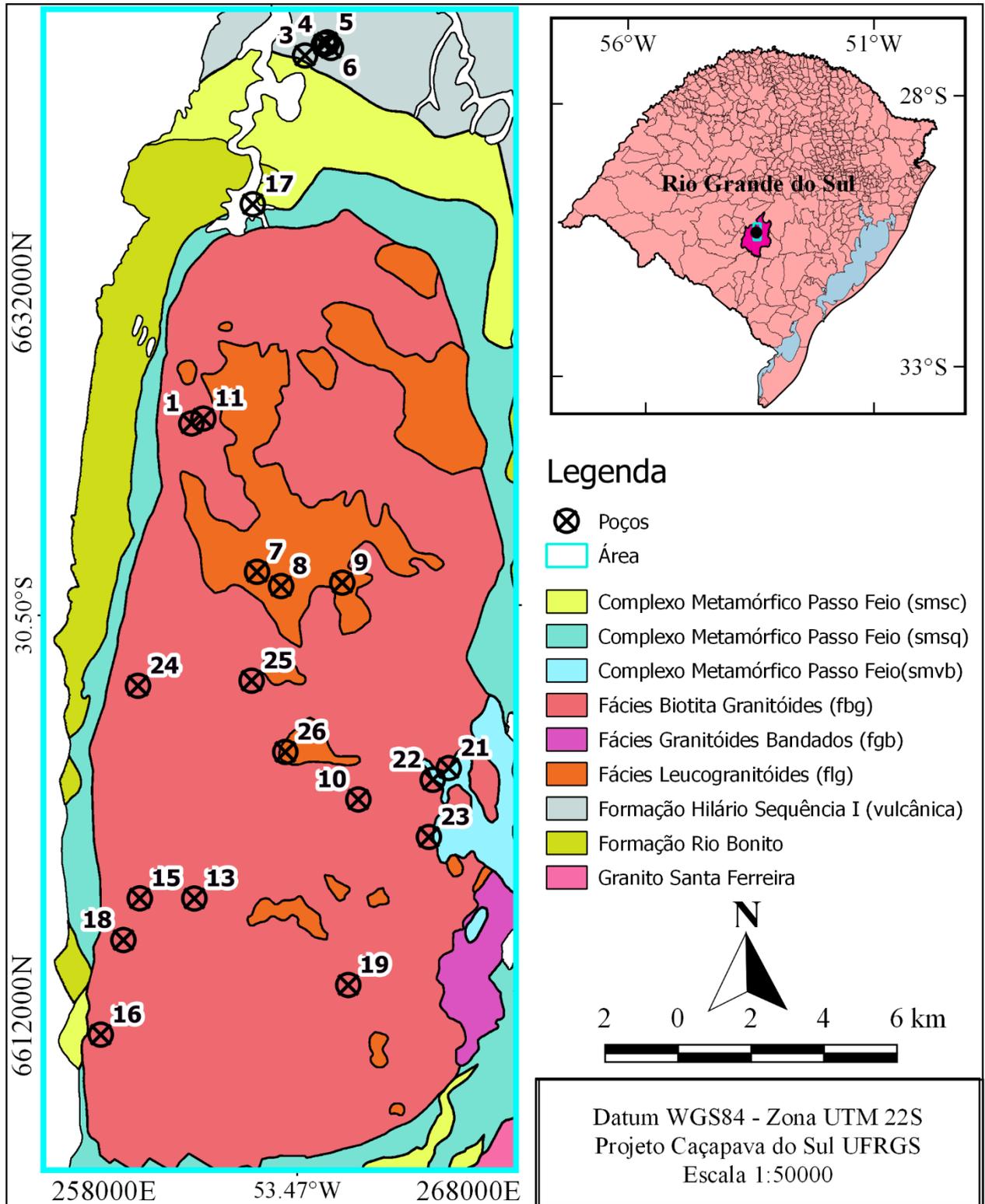
Fácies Granitoides Bandados (fgb) - composta por biotita granodioritos a monzogranitos, leucogranitóides e raros termos tonalíticos e dioríticos que se alternam ao longo do bandamento em escala mesoscópica foliação milonítica paralela a alternância composicional com graus de desenvolvimento variável, ocorrem preferencialmente na porção central e leste

do complexo e apresentam característica intermediárias entre os dois primeiros tipos (BITENCOURT, 1983).

Complexo Metamórfico Passo Feio - O CMPF é uma sequência vulcano-sedimentar metamorfisada que também é associada ao Complexo Vacacaí (GASTAL & FERREIRA, 2013). Este é composto de metapelitos, anfibolitos, metavulcanoclásticas, metavulcânicas, mármore dolomíticos (e calcíticos subordinados), quartzitos, rochas cálcio-silicáticas, xistos magnesianos e rochas quartzofeldspáticas que foram submetidas a dois eventos metamórficos regionais principais. O primeiro evento ocorreu em aproximadamente 700 Ma, metamorfizando as rochas na fácies anfibolito, enquanto o segundo, retrogressivo, provocou o metamorfismo em fácies xisto verde (BITENCOURT, 1983). O metamorfismo de contato, restrito às bordas das apófises de granito, também afetou essas rochas, sendo caracterizado por recristalização (REMUS et al., 2000). Este complexo forma uma antiforme alongada na direção N-S, com mergulho para NW e núcleo ocupado pelo CGCS (BITENCOURT, 1983).

Grupo Maricá - O GM tem predominância de sedimentos fluviais a marinhos datados em (620-580 Ma). Inclui arenitos depositados em sistema fluvial entrelaçado e contribuição de material do embasamento granítico-gnaissico. Seguido por um sistema marinho de siltitos e folhelhos com camadas de turbiditos e por fim novos sistemas fluviais entrelaçados com material vulcânico e granítico-gnaissico. Registros vulcânicos são compostos por fluxos de lavas riolíticas e camadas piroclásticas, (BORBA, MARASCHIN e MIZUSAKI, 2004). Paim, Chemale Jr. e Wildner (2014) descrevem a deposição do Alogruppo Bom Jardim como sendo siliciclástica e vulcanoclástica, fluxos piroclásticos e de lava, e intrusões hipabissais. Estimam idades entre 593 ± 6 e $580 \pm 3,6$ Ma. Composto litoestratigraficamente pelas Formações Cerro da Angélica, Hilário e Picada das Graças. A formação (Fm.) Cerro da Angélica consiste em arenitos finos, pelitos e arenitos conglomeráticos. A Fm. Hilário apresenta riolitos, tufos, brechas vulcânicas e rochas vulcânicas de composição predominantemente básica. A Fm. Picada das Graças é composta por conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos além de intrusões rasas (sills) de vulcânicas básicas e tufos (JANIKIAN et al., 2003).

Figura 4- Mapa geológico da área de estudo



Fonte: adaptado da carta geológica Folha UFRGS 1.50.000 CPRM

6.1 GEOLOGIA LOCAL

DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

As descrições das amostras foram realizadas no laboratório da Unipampa, utilizando uma lupa uma folha e uma caneta, as amostras 1,2,3 e 4 foram cortadas em diâmetros menores para serem melhores descritas, os critérios de coleta das amostras foram para poços que tinham furo de sondagem e afloramentos próximos, figura 5.

Figura 5- Amostras de campo



Fonte: autora

Amostra 1 possui 13,5 cm de comprimento 3 cm de diâmetro, com a coloração da superfície fresca cinza chumbo e coloração da superfície alterada amarelo queimado pouco grau de alteração e a mineralogia que a compõe 35% plagioclásio, 20% quartzo, 25% feldspato- alcalino, 15% biotita e 5% mica sua classificação- Monzogranito.

A amostra 2 possui 16 cm de comprimento 4,9 cm de diâmetro, com a coloração da superfície fresca cinza chumbo, e a coloração da superfície alterada amarelo queimado com pouco grau de alteração, mas possui maior grau de alteração comparado com a amostra 1 a mineralogia que a compõem é 35% plagioclásio, 20% quartzo, 25% feldspato- alcalino, 15% biotita e 5% mica sua classificação- Monzogranito.

A amostra 3 possui 20 cm de comprimento 5 cm de diâmetro, com a coloração da superfície fresca cinza chumbo, e a coloração da superfície alterada amarelo queimado pouco grau de alteração a mineralogia que a compõem 30% plagioclásio, 25% quartzo, 25% feldspato- alcalino, 15% biotita e 5% mica, sua classificação- Monzogranito.

A amostra 4 possui 3 cm de comprimento 6 cm de diâmetro, com a coloração da superfície fresca cinza esverdeado pouco grau de alteração a mineralogia que a compõem 70% plagioclásio, 20% clorita e 10% piroxênio sua classificação- Diabásio.

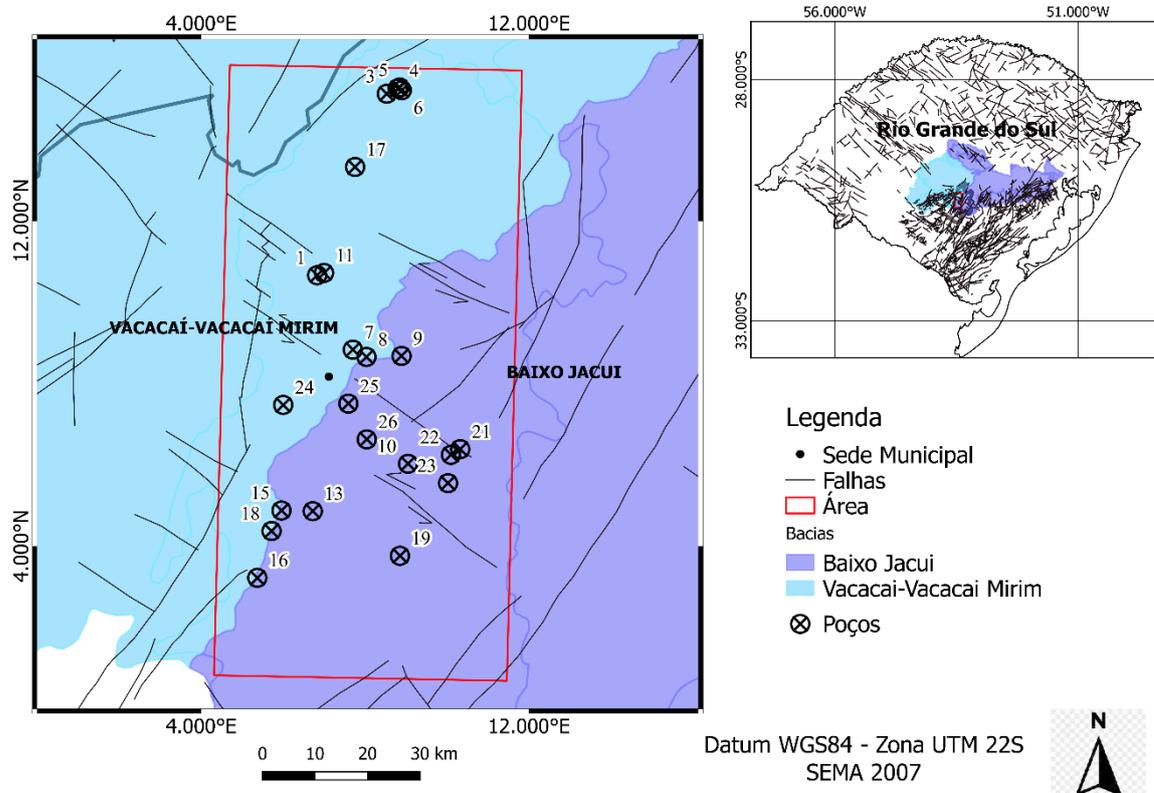
A amostra 5 possui 7 cm x 3,5cm x 6 cm, com coloração da superfície fresca branco rosado, a coloração da superfície alterada marrom claro pouco grau de alteração a mineralogia que a compõem 70% plagioclásio, 20% feldspato e 10% biotita, sua classificação- Monzonito.

A amostra 6 possui 6 cm x 2 cm x 7 cm, com a coloração da superfície fresca rosado para branco, e a coloração da superfície alterada- cinza, pouco grau de alteração e a mineralogia que a compõem 40% plagioclásio, 5% quartzo, 45% feldspato e 10% biotita sua classificação- Sienogranito.

7 DOMÍNÍOS HIDROGEOLÓGICOS E SISTEMAS AQUÍFEROS EM CAÇAPAVA DO SUL

Caçapava do Sul compreende as bacias hidrográficas do Rio Camaquã, Baixo Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim sendo que a área de estudo (Figura 6) abrange somente duas das bacias hidrográficas (SEMA, 2007).

Figura 6 - Bacias hidrográficas do município de Caçapava do Sul



Fonte: Modificado de SEMA, (2007)

No município de Caçapava do Sul, conforme o Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, realizado pela CPRM (2007), são descritos seis domínios hidrogeológicos (Figura 7): Domínio Formações Cenozóicas, Domínio Bacias Sedimentares, Domínio Poroso/Fissural, Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas, Domínio Vulcânicas e Domínio Cristalino. Sendo que os principais domínios representados na área de estudo são: Domínio Bacias Sedimentares, Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas, Domínio Vulcânicas e Domínio Cristalino.

O Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas, cujo, comportamento é de aquífero fissural, os litotipos associados reúnem xistos, filitos, metarenitos, metassiltitos, anfíbolitos, quartzitos, ardósias, metagrauvacas e metavulcânicas diversas. Estão relacionadas ao aquífero fissural, devido à ausência de porosidade primária, a ocorrência de água subterrânea nestas rochas está condicionada a porosidade secundária. A água circula através de fraturas e fendas que foram abertas devido a eventos tectônicos. Este tipo de aquífero caracteriza-se por apresentar baixas vazões e geralmente salinizado (BOMFIM, 2010).

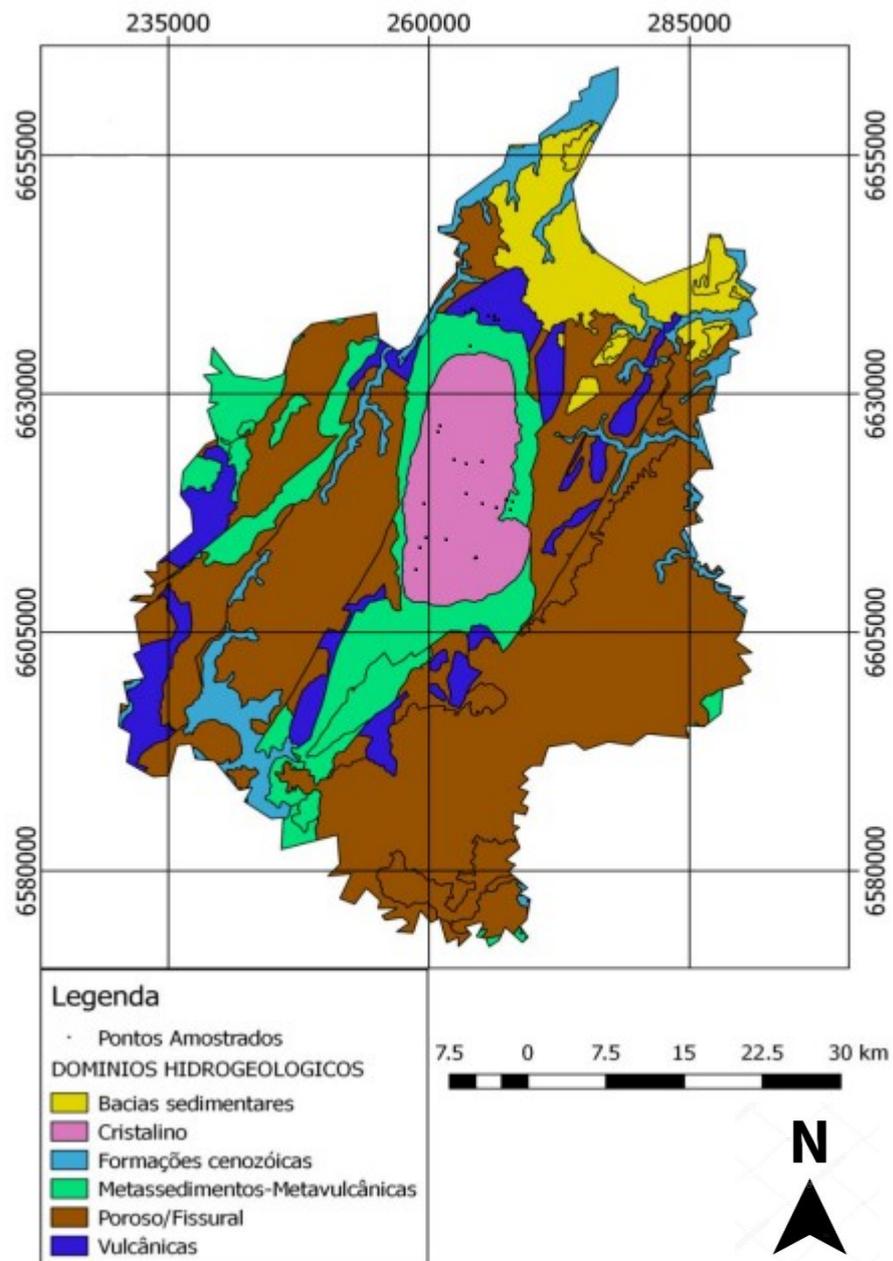
O Domínio Vulcânicas está relacionado a aquíferos fissurais e compreende rochas vulcânicas e metavulcânicas de baixo grau metamórfico. De natureza ácida a básica, apresentam comportamento fissural e porosidade secundária (fendas e fraturas). Com estruturação acentuada de foliação e/ou acamadamento. Apresenta potencial hidrogeológico maior que o presente no domínio dos metassedimentos/metavulcânicas (BOMFIM, 2010).

O Domínio Cristalino é denominado como aquífero fissural com porosidade secundária. A litologia deste domínio é constituído por granitoides, gnaisses, granulitos, migmatitos e rochas básicas e ultrabásicas. A ocorrência da água subterrânea está condicionada a presença de fraturas e fendas. O domínio apresenta reservatórios aleatórios e descontínuos de pequena extensão com baixo potencial hidrogeológico de baixas vazões e geralmente salinizados (BOMFIM, 2010).

De acordo com Machado (2005), os principais Sistemas Aquíferos que compreendem a bacia hidrográfica do Rio Camaquã são Embasamento Cristalino II e Aquíclode Eopaleozoico. Na bacia hidrográfica do Baixo Jacuí encontram-se o Embasamento Cristalino II, Aquíclode Eopaleozoico e Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito, na Bacia Vacacaí/Vacacaí Mirim os Sistemas Aquíferos aflorantes são Embasamento Cristalino II, Aquíclode Eopaleozoico, Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito e Aquíclode Permiano. Estão presentes no município de Caçapava do Sul unidades do embasamento, Bacia do Camaquã e Bacia do Paraná. O

Embasamento é composto por metavulcânicas, metassedimentares e cristalinas, pertencentes à Província Mantiqueira. Na Bacia do Camaquã são encontradas rochas vulcânicas, vulcano-sedimentares e seqüências sedimentares de idades ediacaranas até ordoviciano inferior. Na Bacia do Paraná estão presentes arenitos, siltitos, conglomerados e folhelhos carbonosos (CPRM, 2008).

Figura 7- Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos



Fonte: Modificado de CPRM (2007) e Bomfim (2010)

No município de Caçapava do Sul são observados quatro sistemas aquíferos, segundo Roisenberg (2007).

Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II – Compõe aquíferos limitados de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas. Relacionados às rochas graníticas, gnáissicas, andesitos, xistos, filitos e calcários metamorfizados, que estão localmente afetados por fraturas e falhas. Apresentam capacidades específicas inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h/m}$. A salinidade nas áreas não cobertas por sedimentos de origem marinha é inferior a 300 mg/L.

Sistema Aquífero Aquiclude Eo-Paleozóico – Corresponde a aquíferos praticamente improdutivos em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas. Representam os piores reservatórios de águas subterrâneas. São constituídos por arenitos finos a médios, bastante endurecidos por cimentação ferruginosa, calcítica e silicosa que conferem a este sistema porosidade muito baixa.

Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito – São aquíferos de média a baixa possibilidade para águas. Localiza-se em rochas e sedimentos com porosidade intergranular. Representados por arenitos finos a médios e intercalados com camadas de siltitos argilosos e carbonosos. As 23 capacidades específicas desse aquífero são inferiores a $0,5 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e a salinidade varia entre 800 e 1500 mg/L. Em grandes profundidades as águas são salinas e com sólidos totais dissolvidos superiores a 10.000 mg/L.

Sistema Aquífero Aquitardo Permiano – Aquíferos de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas. Trata-se de siltitos argilosos, argilitos, folhelhos pirobetuminosos e pequenas camadas de margas e arenitos. Apresenta capacidade específica inferior a $0,1 \text{ m}^3/\text{h/m}$, contém elevados cálcio e magnésio.

8 MATÉRIAS E MÉTODOS

8.1 METODOLOGIA APLICADA

A concentração de Rn^{222} nas águas subterrâneas do município de Caçapava do Sul foi medida em 22 poços (Tabela 3), distribuídos sobre o granito-Caçapava do Sul, Complexo Metamórfico Passo Feio e Metavulcânica (REMUS et al., 2000), utilizando o equipamento *AlphaGUARD*.

Tabela - 3 Localização e características dos pontos de amostra Siagas e *Google Earth* datum WGS84 em coordenadas projetadas fuso 22S.

Nº P	LONG	LATI	LITOLOGIA	POÇO
1	260384	6628377	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
3	263501	6638557	VULCANICA	TUBULAR
4	264021	6638867	VULCANICA	TUBULAR
5	264109	6638921	VULCANICA	TUBULAR
6	264212	6638767	VULCANICA	TUBULAR
7	262183	6624271	CRISTALINO (flg)	TUBULAR
8	262844	6623878	CRISTALINO (flg)	TUBULAR
9	264522	6623971	CRISTALINO (flg)	TUBULAR
10	264962	6617973	CRISTALINO (fbg)	FREÁTICO
11	260712	6628514	CRISTALINO (fbg)	FREÁTICO
13	260465	6615233	CRISTALINO (fbg)	FREÁTICO
15	258968	6615237	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
16	257897	6611465	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
17	262068	6634445	METAMORFICO (smsq)	TUBULAR
18	258519	6614084	CRISTALINO (fbg)	FREÁTICO
19	264687	6612840	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
21	267441	6618841	METAMORFICO (smsq)	TUBULAR
22	267004	6618516	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
23	266899	6616935	METAMORFICO (smsq)	TUBULAR
24	258919	6621119	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
25	262035	6621260	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR
26	262959	6619289	CRISTALINO (fbg)	TUBULAR

Fonte: autora

8.1.1 EQUIPAMENTO *AlphaGUARD PQ2000PRO*

O *AlphaGUARD PQ2000PRO* (figura 8) é um equipamento portátil, sendo um detector de estado sólido, que contém uma câmara de ionização, pulso-ionizante, onde verifica as medidas de concentração de Rn^{222} no ar, solo água e matérias de construções, assim gravando dados como: a umidade relativa; a temperatura ambiental e a pressão atmosférica (GENITRON,2007).

Figura 8- Equipamento *AlphaGUARD PQ2000PRO*



Fonte: autora

A câmara de ionização é cilíndrica, com volume de 0,56 litros e uma diferença de potencial de +750V (quando ligado). Devido aos filtros de fibra de vidro acoplados nesse equipamento outras matérias como poeira e produtos de decaimento do Rn^{222} , não penetram no mesmo (GENITRON, 2007).

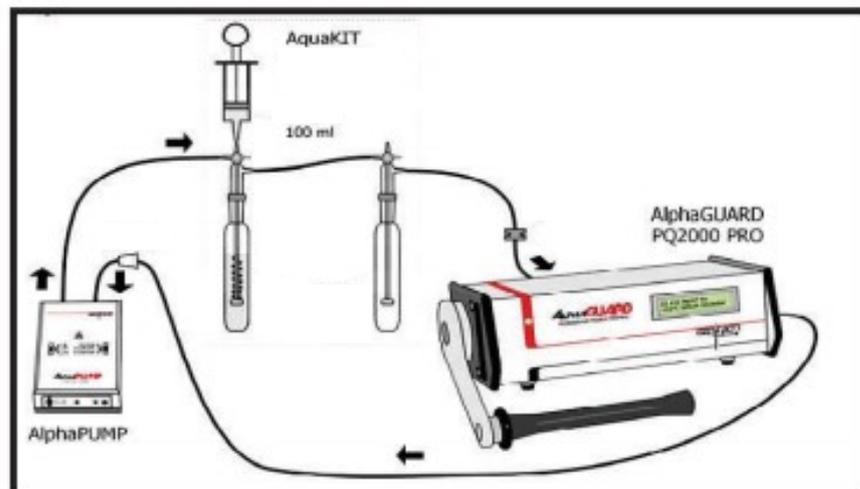
O *AlphaGUARD* possui equipamentos acessórios como unidade do multisensor, *AlphaPUMP* (figura 9) é uma bomba de ar na qual bombeia o gás para câmara de ionização, cerca de 0,03 a 11 minutos (GENITRON,2007).

Figura 9- *AlphaPUMP*



Para realização das medidas de Rn^{222} na água é utilizado o *Aquakit* (Figura 10) que contém: uma espuma de apoio; filtro de segurança; tubo de degaseificação (100ml); tubo de segurança (100ml), seringa plástica e três e três mangueiras (GENITRON,2007).

Figura 10- *Aquakit*



Fonte: GENITRON,2007

A análise é realizada através de amostra de 100 ml diretamente injetadas na unidade de degaseificação do *AphaGUARD*, medindo a concentração a cada minuto. Os teores de Rn^{222} serão medidos em 2 intervalos de 3 minutos para verificar a estabilidade da concentração

medida pelo aparelho. São 10 minutos com o *AlphaPUMP* (bomba de ar) ligado para extrair o Rn^{222} da água e circular no sistema, depois 10 minutos com o *AlphaPUMP* desligado para anotar as medidas efetivas. A determinação de Rn^{222} na água é baseada na concentração indicada no monitor do aparelho (concentração em Bq/m^3). No entanto, este valor ainda não corresponde à concentração real de Rn^{222} na amostra, pois este gás encontra-se diluído no interior do aparelho, estando apenas uma pequena parte diluída na fase aquosa. Para quantificar o efeito da diluição uma abordagem geral é utilizada a seguinte Equação 4:

$$C_W = \frac{C_L * [(V_S - V_a)/V_a + k] - C_0}{1000} \quad (4)$$

Fonte: *AphaGUARD Portable Radon Monitor, User manual 08/2012*.

Onde:

C_W é a concentração de Rn^{222} na amostra de água em Bq/L ,

C_L é a concentração de Rn^{222} em Bq/m^3 no aparelho após a expulsão do gás (Medição final indicada no aparelho)

V_S é o volume total do interior do aparelho (1122 ml)

V_a é o volume de amostra

k é o coeficiente de distribuição do Rn^{222} dado pela temperatura (geralmente utiliza-se $k=0,26$ para temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$, conforme o manual)

C_0 é a concentração de Rn^{222} no aparelho antes da medição

8.1.2 MEDIDAS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA

As amostras de água subterrâneas foram coletadas de poços tubulares e poços freáticos. Os primeiros contêm uma bomba para levar a água do fundo até a superfície, são poços mais profundos. Já os poços freáticos (cacimba) não necessitam de equipamento de bombeamento para a retirada da água, são mais rasos.

Todas as coletas das amostras ocorreram através dos seguintes procedimentos:

1. O registro foi aberto para deixar a água fluir por alguns minutos, tempo necessário para que se tenha certeza que a água venha do fundo e não a que esteja nas tubulações;

2. Foram coletadas amostras de 100 ml, evitando movimentar a água, verificando se não havia muito ar no interior do recipiente, e sempre verificando o fechamento do recipiente para que não ocorresse a liberação do Rn^{222} a partir dele.

3. Anotados os dados em uma planilha, como a data, o horário, temperatura do ar e da água, coordenadas do local do poço da retirada das amostras e o valores de concentração de Rn^{222} .

Para realizar a montagem do *AphaGuard* e do *AquaKit* foram seguidos os procedimentos:

1. O bocal inferior do tubo de desgaseificação foi unido ao bocal inferior do tubo de segurança. Esta conexão é composta por duas mangueiras de 150mm com o dispositivo de ferramenta rápido.
2. O bocal superior do tubo de segurança foi conectado ao bocal “IN” do *AphaGUARD* com a mangueira de 400 mm.
3. O bocal “OUT” do *AphaPUMP* foi conectado com o adaptador ativo localizado na lateral do *AphaGUARD* (comprimento da mangueira de 500 mm).
4. O bocal do adaptador de fluxo no de trás do *AphaGUARD* foi conectado com o bocal superior do tubo de desgaseificação (comprimento da mangueira de 600 mm).

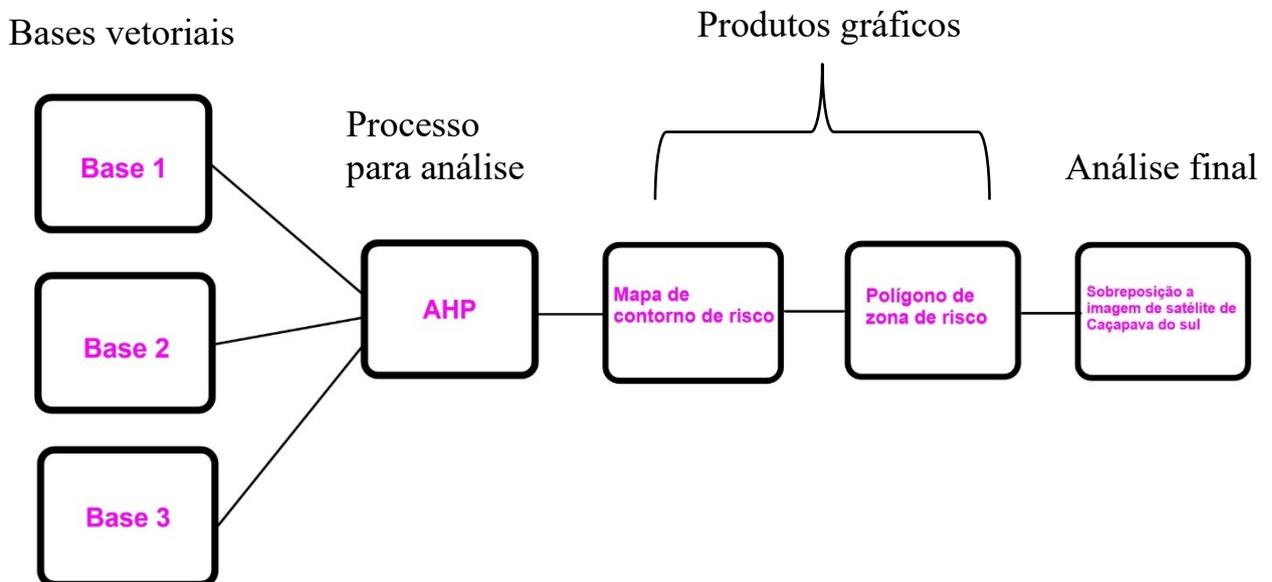
Ao manter o fluxo de gás do *AphaPUMP* dessa maneira, a total segurança do aparelho foi assegurada contra a invasão de água por meio de filtro interno contra água. O material das mangueiras não permitiram que o Rn^{222} saísse do sistema, as conexões e os anéis de fechamento adjacentes foram mantidos longe de partículas de sujeiras, ou seja, foram limpos antes da medição.

Foram realizados os seguintes passos para a medição das amostras:

1. Todas as vezes ao ligar o monitor do *AphaGUARD* foram selecionado o modo de medição “1 min FLOW”;
2. As torneiras tripartidas dos tubos de desgaseificação e de segurança foram deixadas na posição vertical (aberta) para aeração do tubo;
3. Com o tubo de desgaseificador (100 ml) foi coletada a amostra de água evitando fazer bolhas ao coletar as amostras;
4. As torneiras tripartidas dos tubos de desgaseificação foram deixadas na posição horizontal (fechada) para o modo de medição, com isso o ciclo do gás ficou fechado;
5. Escolhido o nível de fluxo do *AphaPUMP* para a escala de 0,5L/min; colocado o interruptor de operação de *AphaPUMP* na posição “ON” (= começando a medição da amostragem);

6. Realizado a medição durante minutos ou horas e desligar o equipamento;
7. Removido a amostra de água medida da unidade de desgaseificação;
8. Desconectando o tubo do adaptador ativo na parte traseira do *AphaGUARD*;
9. Escolhido o nível de fluxo do *AphaPUMP* para a escala de 1L/min e deixado o interruptor na posição “ON” (limpeza da instalação de medição com ar ambiente).
10. E foram anotados os dados na folha de medição para serem analisados.

8.1.3 FLUXOGRAMA DE TRATAMENTO DE DADOS



1º Base vetorial- Adquirir os dados. Interpolar os dados para gerar o mapa de contorno utilizando o método de *Thin Plate Spline (TIN)*. Vetorizar os rasters, (o raster contém um range de variações de emissão de Rn^{222}) durante esse procedimento é necessário delimitar os intervalos usando a base de critérios de variação de valores e informações de trabalhos anteriores.

2º Base vetorial- A partir do mapa geológico desenhar os polígonos em diferentes da área de estudo.

3º Base vetorial- Base de dados do IBGE do município de Caçapava do Sul para ter a distribuição espacial da população e dos poços.

A partir dessas três bases de dados vetoriais utilizar o processo análises hierárquica (populacional) para atribuir peso as variáveis, litologia, quantidade de Rn^{222} , distribuição da população. Para gerar o mapa final de risco de exposição que a partir dele será gerado o mapa de polígono de zona de risco, que por final será sobreposto a imagem de satélite (*Google Earth*) de Caçapava do Sul.

8.1.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os resultados de concentrações de Rn^{222} em águas subterrâneas foram analisados e processados com o auxílio do *Software SAGA GIS (2.3.2) System for Automated Geoscientific Analyses* (www.saga-gis.org), usado para interpolação e edição dos dados espaciais. Também foi utilizado o *Software QGIS (2.18) Sistema de Informação Geográfica* (www.qgis.org), que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Ambos são *softwares* livres com código-fonte aberto.

A *Thin Plate Spline* é uma função de base radial poli-harmônica espacial (Equação 5) onde ϕ é número real cujos valores dependem apenas da distância a partir da origem, tal que $\phi(x) = \phi(\|x\|)$, funções de base radial usados comumente incluem dado que $r = \|x - x_i\|$.

$$\phi(r) = r^2 \ln(r) \quad (5)$$

Foi utilizado o *Thin Plate Spline (TIN)* como método de interpolação geoestatística. Esse método fornece uma interpolação suavizada entre um conjunto de pontos de controle, criando uma função '*Spline* de placa fina' para cada três pontos (triângulo) e usando-a para construir a grade subsequente. O *TIN* é criado internamente a partir da entrada de pontos de dados espalhados. A opção '*Vizinhança*' determina o número de pontos usados para a geração de *spline*. '*Vizinhança imediata*' inclui os pontos do triângulo, bem como os pontos vizinhos imediatos, nível 1 adiciona os vizinhos da vizinhança imediata e 'nível 2' acrescenta os vizinhos de 'nível 1' também. Um grau de vizinhança maior reduz as quebras acentuadas, mas também aumenta o tempo de computação e prejudica a predição global do modelo (SPRINGER-VERLAG HEIDELBER, 2002).

A análise de estatística descritiva dos dados de concentração de Rn^{222} foi realizada com a finalidade de obter os valores máximos, mínimos para cada litologia da área.

8.1.5 O MÉTODO PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICO (AHP)

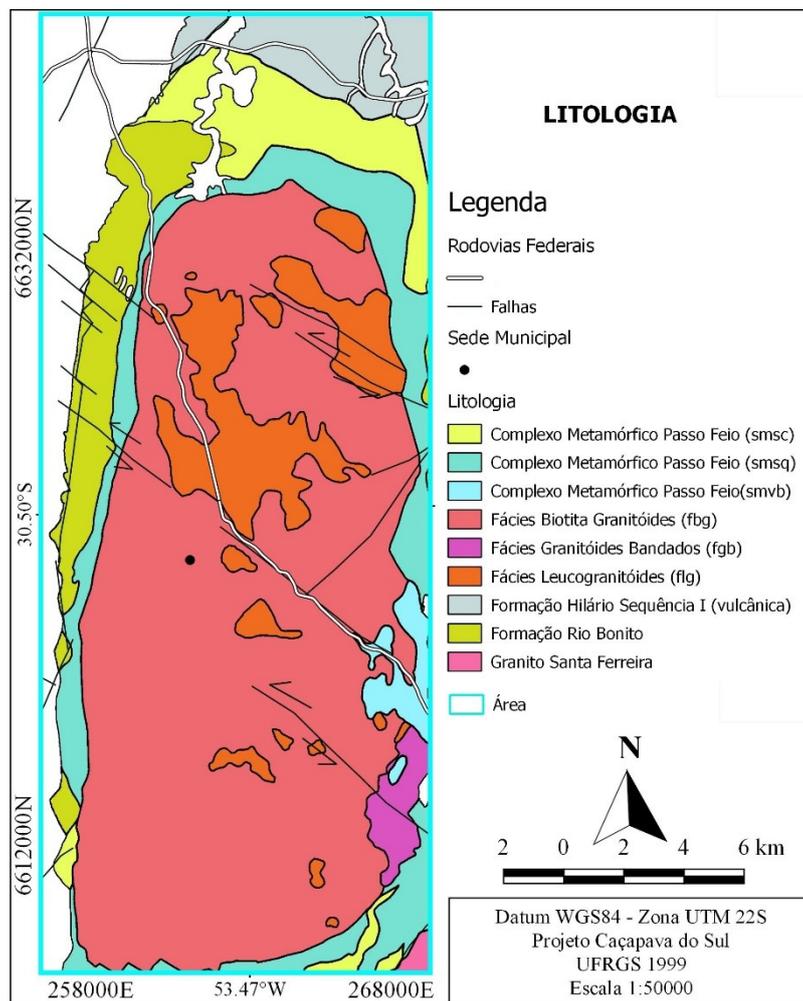
O AHP é um dos métodos de apoio multicritério à decisão, amplamente utilizado na avaliação de objetivos e critérios múltiplos em problemas caracterizados pela complexidade e subjetividade (Shimizu, 2006). Criado por Thomas L. Saaty na década de 1970, esse método consiste na elaboração de um modelo que reflita o funcionamento da mente humana na avaliação das alternativas diante de um problema de decisão complexo. Além disso, o método permite lidar com problemas que envolvem tanto os valores tangíveis como os intangíveis, graças a sua capacidade de criar pesos para as variáveis qualitativas com base em julgamentos subjetivos emitidos pelos decisores (Saaty, 1991). O método AHP permite tratar problemas complexos de forma simples (Costa et Moll, 1999).

De acordo com Saaty (1991), a aplicação do AHP contempla as seguintes fases: estruturação dos critérios e alternativas; coleta de julgamentos; cálculo de prioridades; verificação da consistência do julgamento; e, por último, o cálculo das prioridades globais das alternativas. A estruturação dos critérios consiste em modelar o problema de decisão numa estrutura hierárquica, a qual, partindo do objetivo principal, decompõe-se em vários critérios necessários ao alcance do objetivo, formando uma camada de critérios. Cada elemento desta camada, por sua vez, pode ser decomposto em dois ou mais critérios, e assim sucessivamente, tornando mais fáceis o tratamento e a compreensão do problema. Os resultados da análise hierárquica de peso serão discutidos a seguir.

As variáveis utilizadas para a classificação de risco foram quatro, litologia, quantidade de Rn²²², distribuição da população e quantidade de poços, as variáveis foram classificadas em uma classificação de risco de exposição de 1, 2 e 3 sendo que 1 é menor risco de exposição e 3 é maior risco de exposição. Nas Figuras 11, 12, 13 e 14 mostram as variáveis antes das classificações de riscos e os intervalos de valores utilizados.

A primeira variável a ser classificada é a litologia, a área de estudo compreende rocha plutônica, metamórfica, sedimentar e vulcânica, sendo que a rocha plutônica foi classificada em 3, a rocha metamórfica foi classificada em 2, a rocha sedimentar foi classificada em 1 e a rocha vulcânica foi classificada em 1, Figura 11.

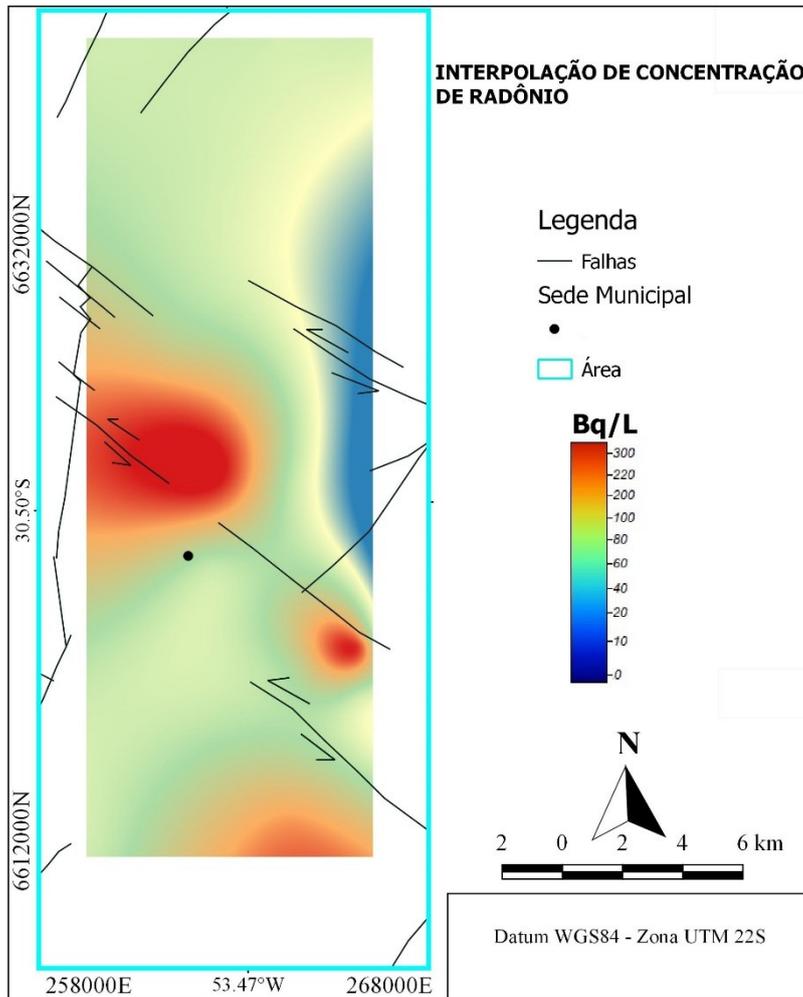
Figura 11- Mapa geológico



Fonte: adaptado da carta geológica Folha UFRGS 1.50.000 CPRM

A segunda variável a ser classificada é a concentração de Rn^{222} , utilizando os intervalos do IPEN (2002), o intervalo de 0.6 á 28 Bq/L foi classificado em 1, o intervalo de 29 á 99 Bq/L foi classificado em 2 e o intervalo de 100 á 400 Bq/L foi classificado em 3, Figura 12.

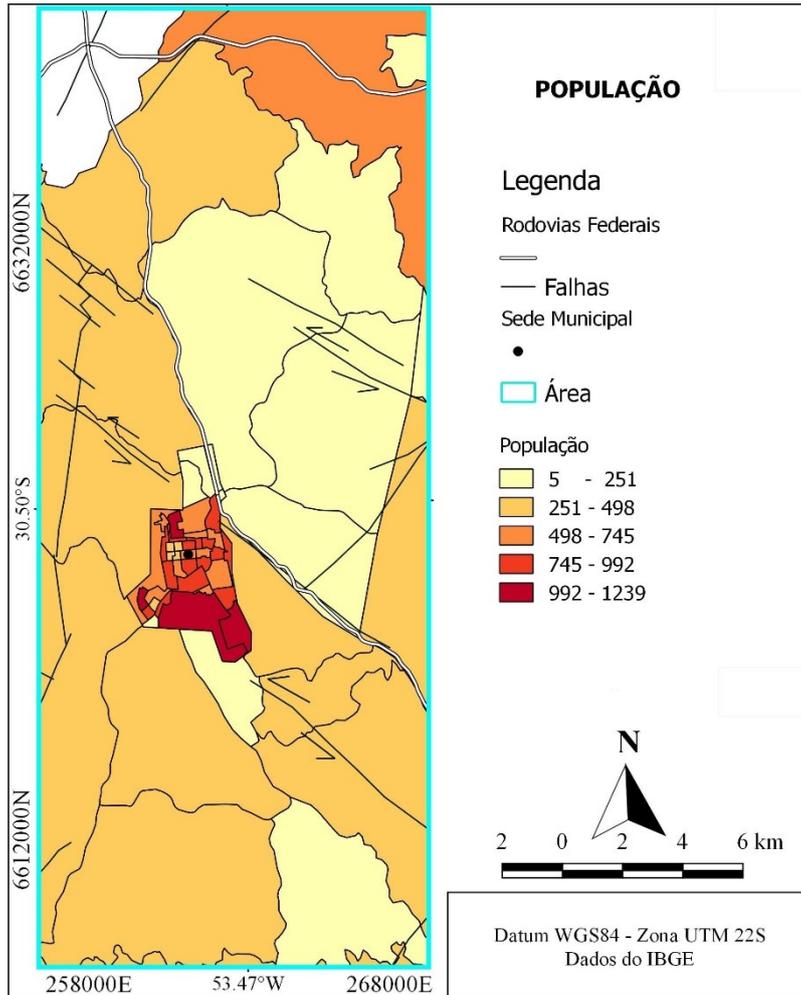
Figura 12- Mapa de isocontorno de concentração de Rn^{222}



Fonte: autora

A terceira variável a ser classificada é a distribuição da população, utilizando os dados do censo do IBGE, o intervalo de 0 a 299 pessoas foi classificado em 1, o intervalo de 300 a 799 pessoas foi classificado em 2 e o intervalo de 800 a 1300 pessoas foi classificado em 3. Figura 13.

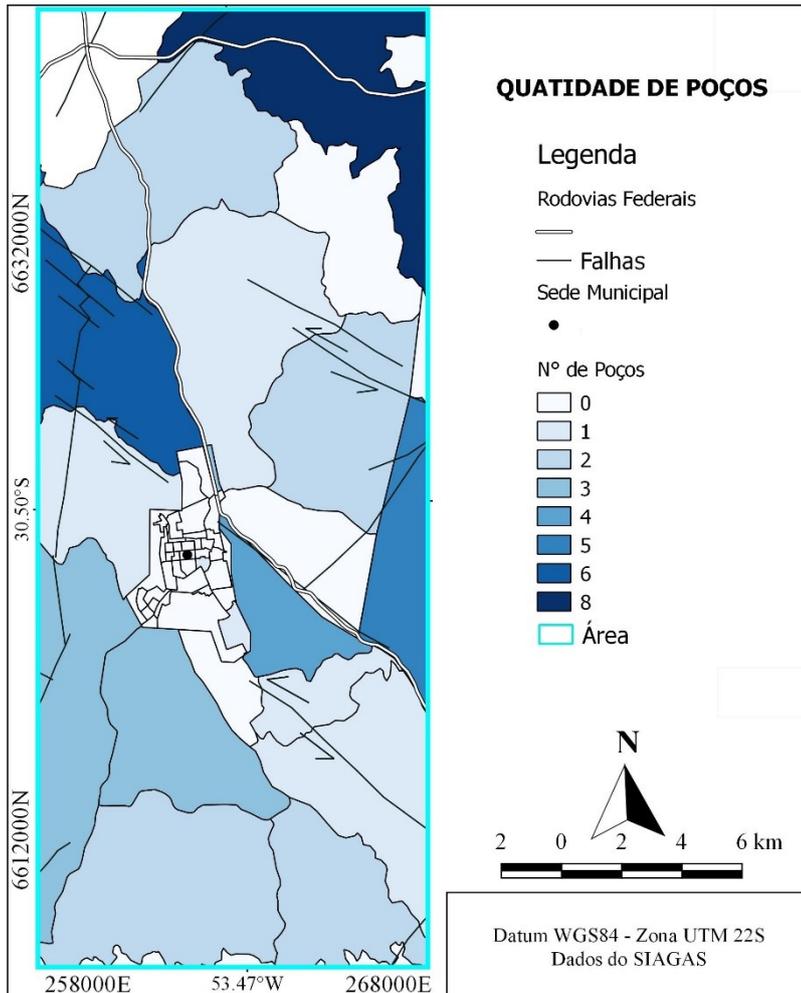
Figura 13- Mapa da distribuição da população



Fonte: IBGE

A quarta variável a ser classificada é a quantidade de poços, utilizando os dados do SIAGAS e acrescentando os meus poços amostrados o intervalo de 0 á 1 poço foi classificado em 1, o intervalo de 2 á de 3 poços foi classificado em 2 e o intervalo de 4 á 8 poços foi classificado em 3. Figura 14.

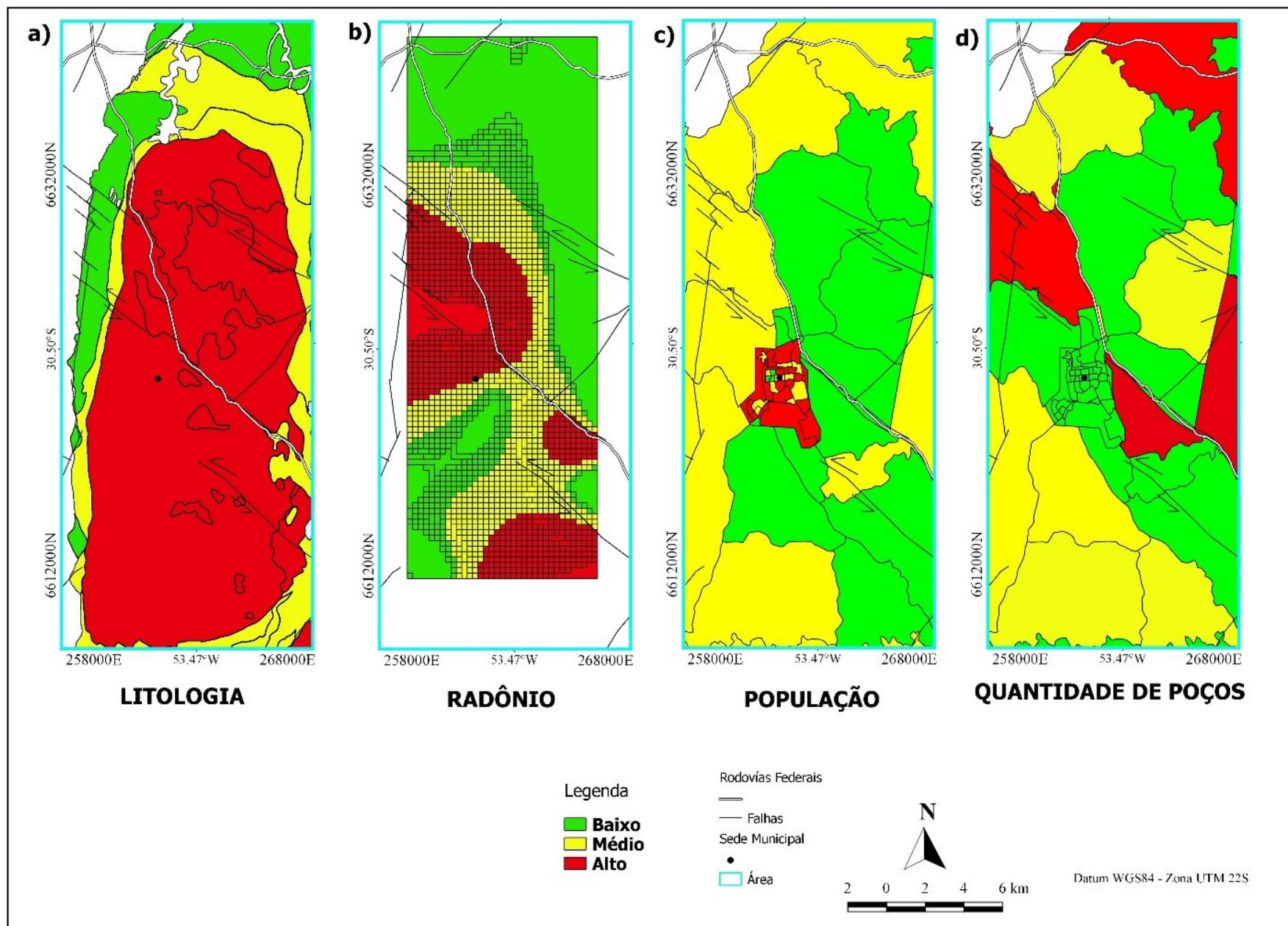
Figura 14 – Imagem de quantidade de poços



Fonte: SIAGAS

A figura 15 mostra os mapas de classificações de risco com cada variável acima citada após a classificação utilizando os valores 1,2 e 3. O intervalo dos valores escolhidos para a classificação depende de cada variável. Foi utilizado o esquema de cor padrão de risco, isto é, a cor vermelha é para alto risco, a cor amarela é para intermediário risco e a cor verde é para baixo risco.

Figura 15- Mapa da classificação de risco. Fonte: autora



Utilizado os *rasteres* das variáveis e o método AHP foi atribuído peso para cada variável, o julgamento para esses pesos foi baseado na tabela de escala de Saaty (1991).

Atribuindo peso 1 para as variáveis litologia e quantidade de Rn²²², atribuindo peso 5 para as variáveis litologia e distribuição da população sendo selecionado a distribuição da população como a variável mais importante, atribuindo peso 5 para as variáveis litologia e quantidade de poços sendo selecionado a quantidade de poços como a variável mais importante, atribuindo o peso 1 para quantidade de Rn²²² e distribuição da população, atribuindo o peso 1 para as variáveis quantidade de Rn²²² e quantidade de poços e atribuindo peso 1 para as variáveis distribuição da população e quantidade de poços. As variáveis que receberam o peso 1 ambas quando comparadas contribuem igualmente para o objetivo, então não importa qual variável será selecionada. Na figura 16 tem-se uma amostra da Tabela do software utilizado para calcular o modelo.

Figura 16- Tabela dos cálculos de prioridade AHP

With respect to AHP priorities, which criterion is more important, and how much more on a scale 1 to 9?

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> Litologia	<input type="radio"/> Quantidade de Rn-222	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2	<input type="radio"/> Litologia	<input checked="" type="radio"/> Distribuição da população	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3	<input type="radio"/> Litologia	<input checked="" type="radio"/> Quantidade de poços artesianos	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4	<input checked="" type="radio"/> Quantidade de Rn-222	<input type="radio"/> Distribuição da população	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5	<input checked="" type="radio"/> Quantidade de Rn-222	<input type="radio"/> Quantidade de poços artesianos	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6	<input checked="" type="radio"/> Distribuição da população	<input type="radio"/> Quantidade de poços artesianos	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

Fonte: *AHP Priority Calculator*

Foi utilizado a calculadora raster do Qgis para atribuir os pesos as variáveis para poder gerar o raster de risco final de exposição de Rn²²².

9 RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

9.1 MEDIDAS DE RADIAÇÃO

A Tabela 4 traz os resultados obtidos sobre a concentração das medidas de Rn²²² dissolvido na água (Bq/L) dos poços em Caçapava do Sul em três litologias distintas.

Tabela 4- Teores dissolvido na água subterrânea de Caçapava do Sul, Fonte- autora. **Em negrito**, valores acima de 100Bq/L (WHO,2004)

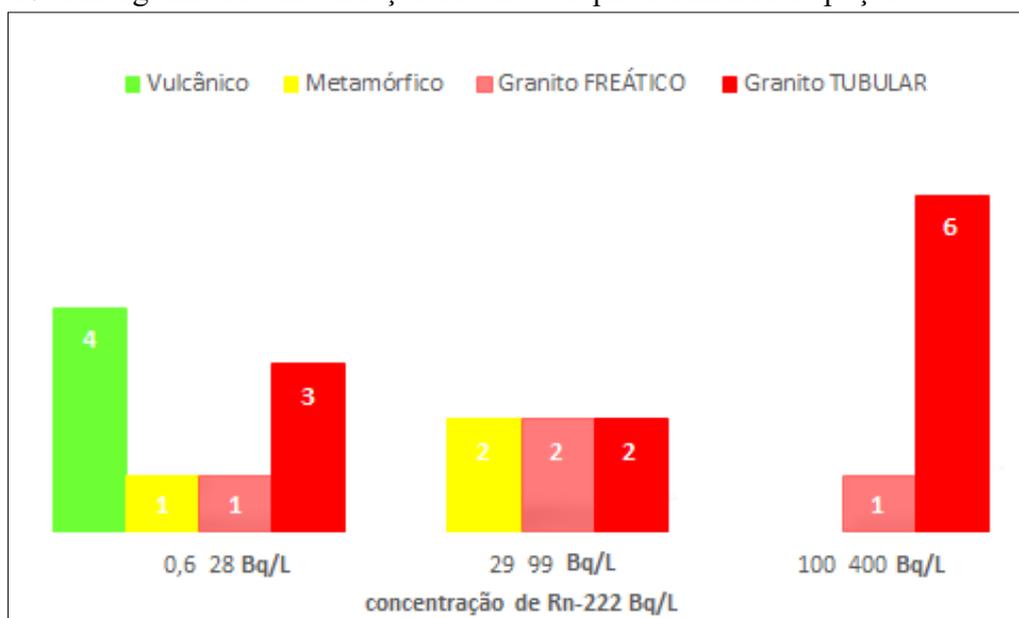
Nº do Poço	Rn (Bq/L)
1	131,67
3	14,78
4	14,14
5	12,81
6	10,50
7	322,56
8	244,23
9	51,73
10	96,88
11	111,45
13	32,98
15	16,73
16	17,26
17	12,18
18	17,77
19	198,56
21	48,73
22	267,44
23	35,11
24	129,26
25	30,60
26	25,27

De acordo com o IPEN (2002) e Tipler (2000) os valores de concentração de Rn²²² considerados baixos são de 0,6 Bq/L a 28 Bq/L os valores considerados médios são de 29 Bq/L a 99 Bq/L os valores acima de 100Bq/L são considerados altos. Dos 22 poços amostrados, 15 poços estão sobre o Granito-Caçapava do Sul sendo 11 poços tubular e 4 poços freático, 3 poços no Domínio Metamórfico sendo poços tubulares e 4 poços no Domínio Vulcânico sendo todos tubulares. Na Figura 17 podemos observar que grande número de poços para as maiores

concentrações de Rn^{222} são poços tubulares sobre o Granito-Caçapava do Sul, com picos de concentração desse elemento de 322,56 Bq/L. Porém, também foram obtidos valores baixos e médios sobre o Granito-Caçapava do Sul, em uma faixa de 16,73Bq/L a 51,73 Bq/L. Esta variação na mesma litologia, possivelmente, se dá a alguns fatores que influenciaram na hora da coleta da água, como muita aeração na amostra, canos muito longos de (50 a 70 metros) e caixa d'água com clorador. Os valores de concentração de Rn^{222} acima do limite permitido da OMS, isto é, 100Bq/L, foram encontrados, em sua maioria, em poços tubulares com profundidade de 80 metros. A única exceção foi o poço de número 24, que embora seja tubular, sua profundidade é de 25 metros, sendo que o valor estimado de 129,26 Bq/L.

Os valores de concentração de Rn^{222} nos poços freáticos foram distintos e inesperados, pois, por serem poços cacimba e rasos eles possuem maior ventilação, então os valores esperados eram baixos. Entretanto o poço 11 apresentou um valor elevado de concentração de Rn^{222} (111,45 Bq/L) com a profundidade de 10 metros, também se obteve valores baixos (17,77 Bq/L) e médios de (32,98 Bq/L) com profundidades dos poços de 9 a 10 metros, sendo que o poço de número 10 apresentou um valor próximo ao limite permitido pela OMS, com o valor de 96,88 Bq/L com profundidade de 10 metros. Os poços no Domínio Metamórfico deram valores baixos e médios de 12,18Bq/L a 48,73 Bq/L, com 40 a 50 metros de profundidades. Os poços no Domínio Vulcânico obtiveram-se valores de concentração de Rn^{222} todos baixos, com os valores de 12,81 Bq/L a 14,14 Bq/L.

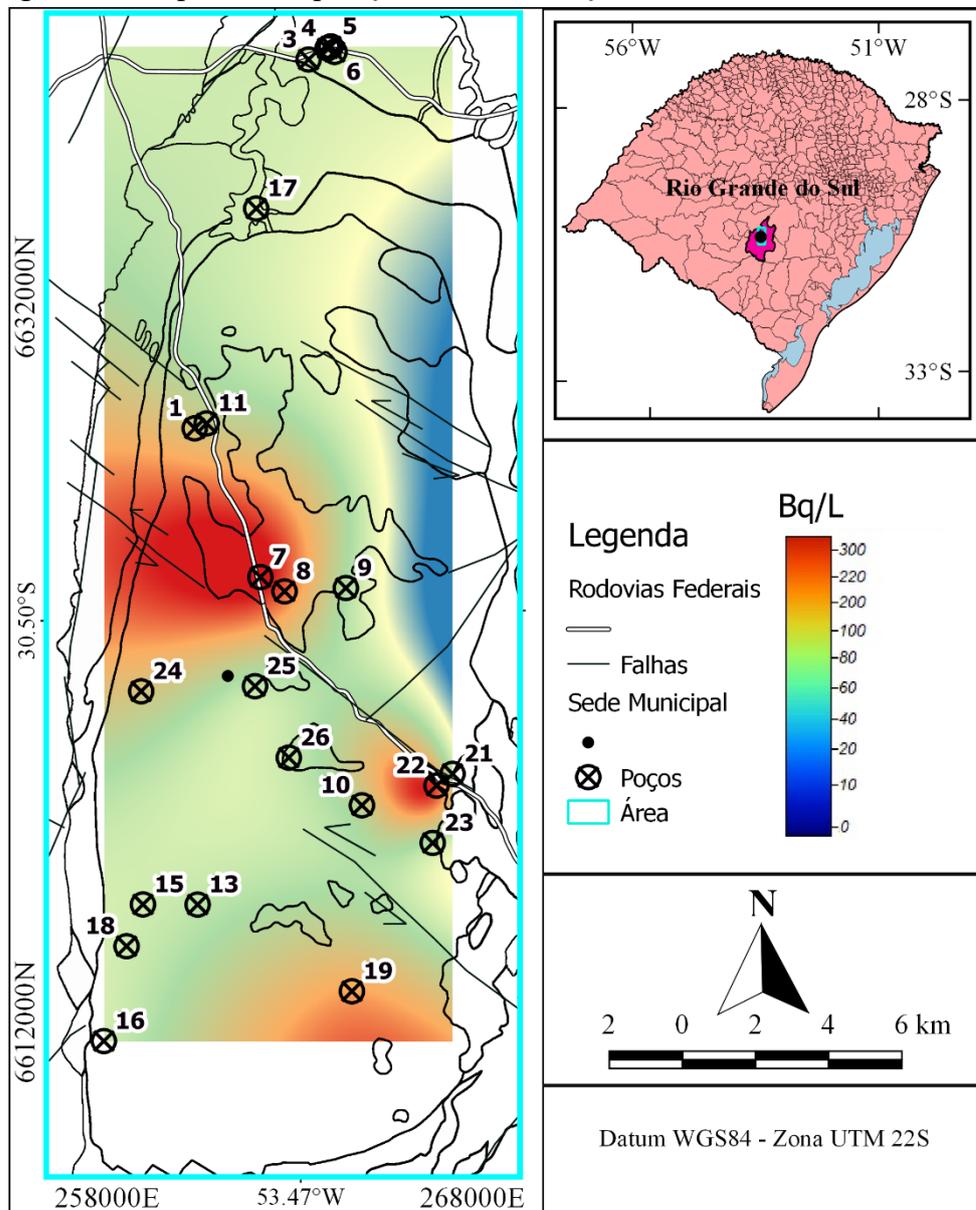
Figura 17- Histograma de concentração de Rn^{222} Bq/L e números de poços



Fonte: autora

Na Figura 18 podemos observar valores elevados em cima de uma grande falha regional transcorrente brasileira com direção SE a NW localizada na Facie Biotita Granitóide e na Facie Leucogranitóide. Os poços mais próximos a falha regional foram os poços onde foram obtidos os valores mais altos de concentração de Rn^{222} . Entretanto os poços longe da falha regional, com valores altos de emissão desse elemento, podem estar associados a falhas e fraturas menores, não podendo ser observadas por causa da escala de detalhe do mapa. Nos outros domínios Metamórfico e Vulcânico não houveram valores elevados.

Figura 18- Mapa de interpolação de concentração de Rn^{222}



Fonte: autora

O raster de zona de risco de exposição final foi vetorizado e gerado o polígono de zona de risco de exposição de Rn^{222} final e sobrepor esse polígono em cima da imagem de satélite do município de Caçapava do Sul e examinar as áreas de risco de exposição. Os valores dos pesos atribuídos foram 10,9 % para litologia, 23,0% para quantidade de Rn^{222} , 33,0% para distribuição da população e 33,0% para a quantidade de poços.

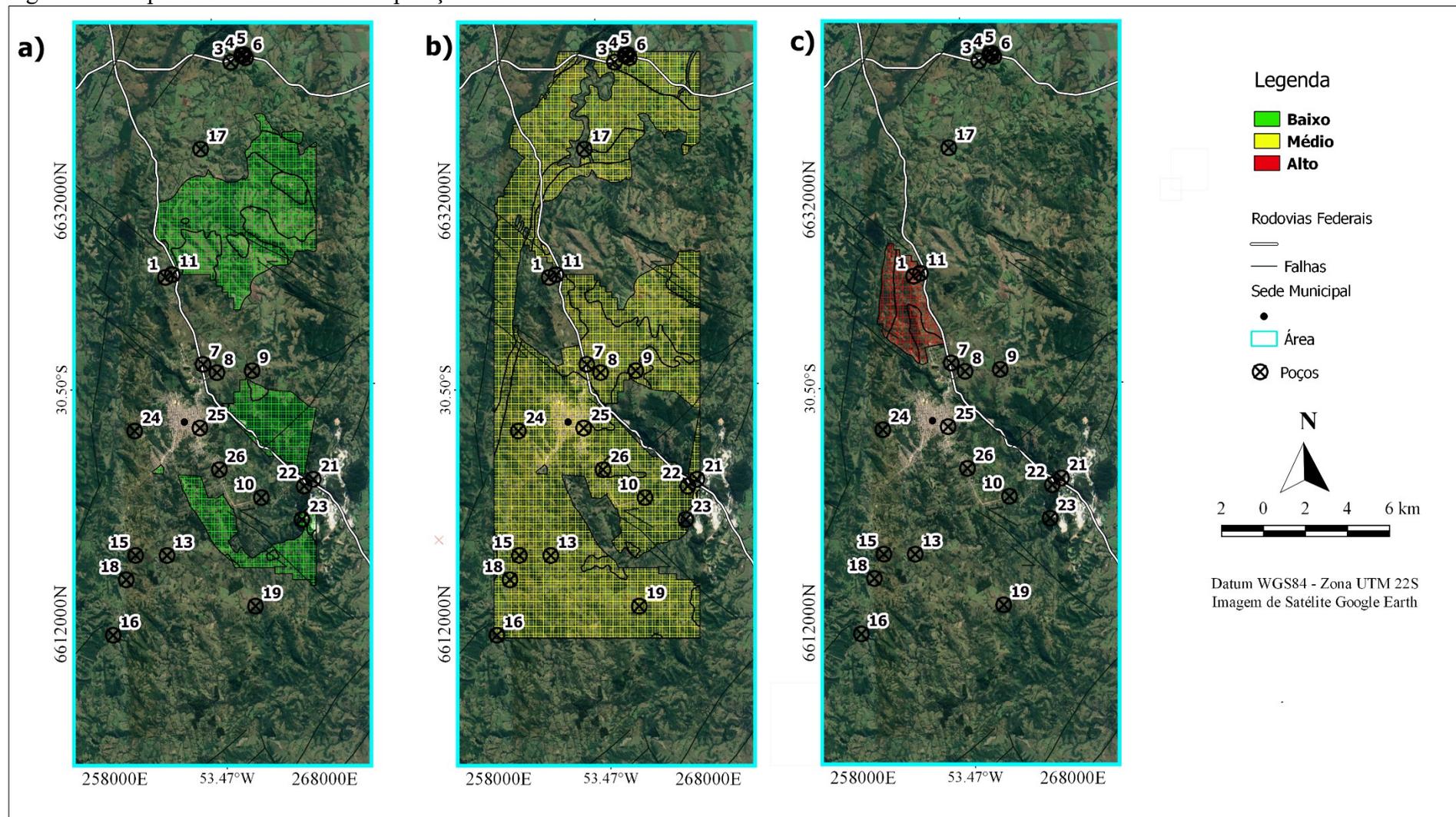
A Figura 19 mostra os mapas de polígono de zona de risco de exposição de Rn^{222} final. É possível observar que a área de alto risco de exposição (Figura 19 c), encontra-se sobre o granito-Caçapava do Sul, da facie leucogranitóide, abrangendo uma pequena parte do complexo metamórfico Passo Feio na sequência metassedimentar química (smsq) a noroeste da falha regional brasileira e do município de Caçapava do Sul. Também existe uma pequena área de alto risco de exposição na mesma litologia mudando a sequência do complexo metamórfico para metavulcanossedimentar básica (smvb) na direção sudeste.

A área intermediária, (Figura 19 b), engloba uma extensa área de risco de exposição de Rn^{222} , abrangendo todas as litologias e o município de Caçapava do Sul, em distintas direções.

A área mais extensa com baixo risco de exposição de Rn^{222} , (Figura 19 a), encontra-se na direção nordeste do município, também existem áreas mais a sudeste e a sul sobre do granito-Caçapava do Sul. No entanto, existe um fator muito importante que pode ter influenciado na área mais extensa de baixo risco pois, não houve nenhum poço amostrado sobre essa área o que implica a estimativa de concentração de Rn^{222} .

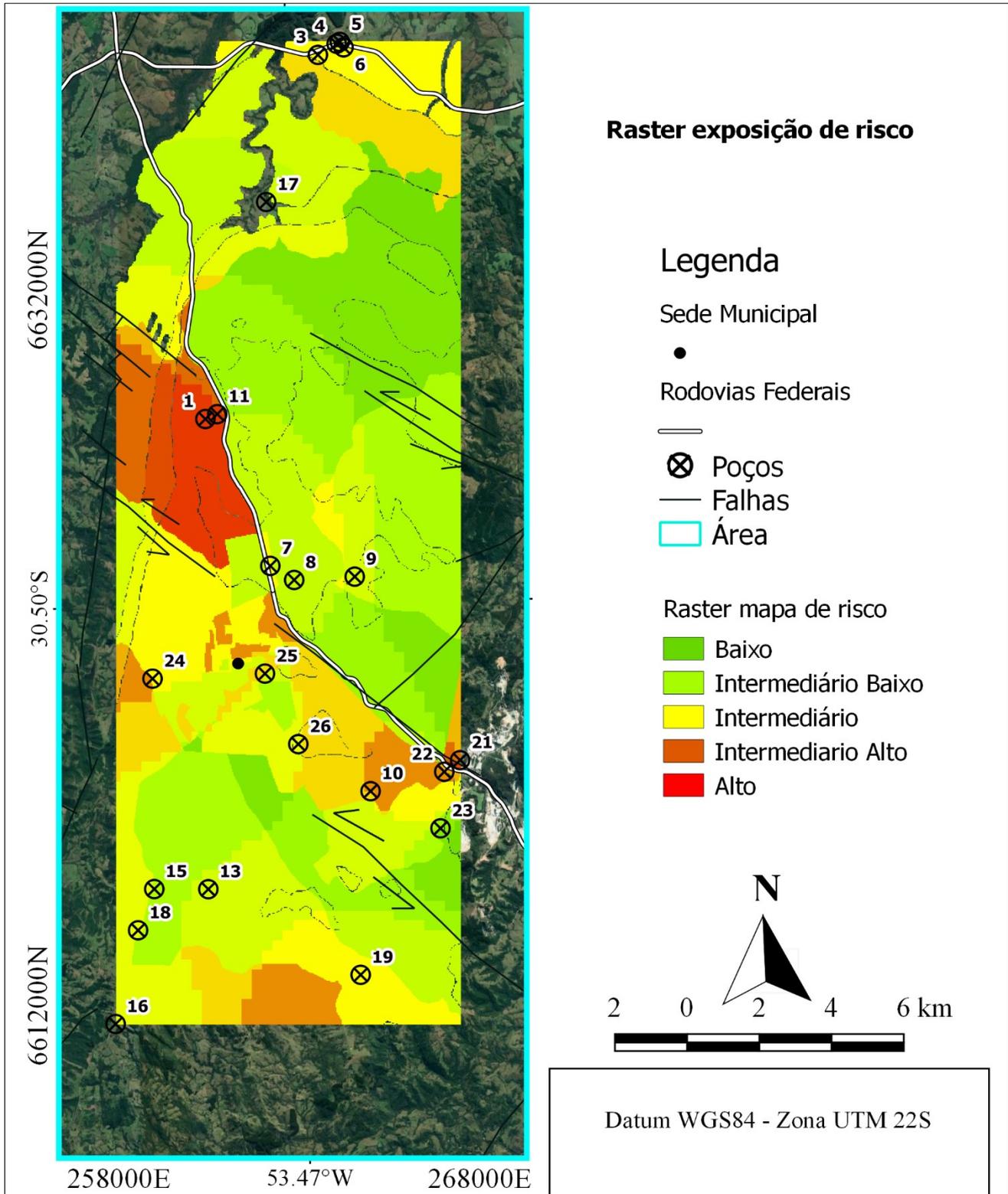
Visando um maior detalhadamente das zonas de risco de exposição, a Figura 20 traz o mapa do raster de risco de exposição final de concentração de Rn^{222} . No qual, observa-se uma área intermediária alta localizada sobre da cidade de Caçapava do Sul e no meio da falha regional brasileira.

Figura 19- Mapa de zona de risco de exposição de Rn^{222}



Fonte: autora

Figura 20- Mapa de zona de risco de exposição de Rn²²²



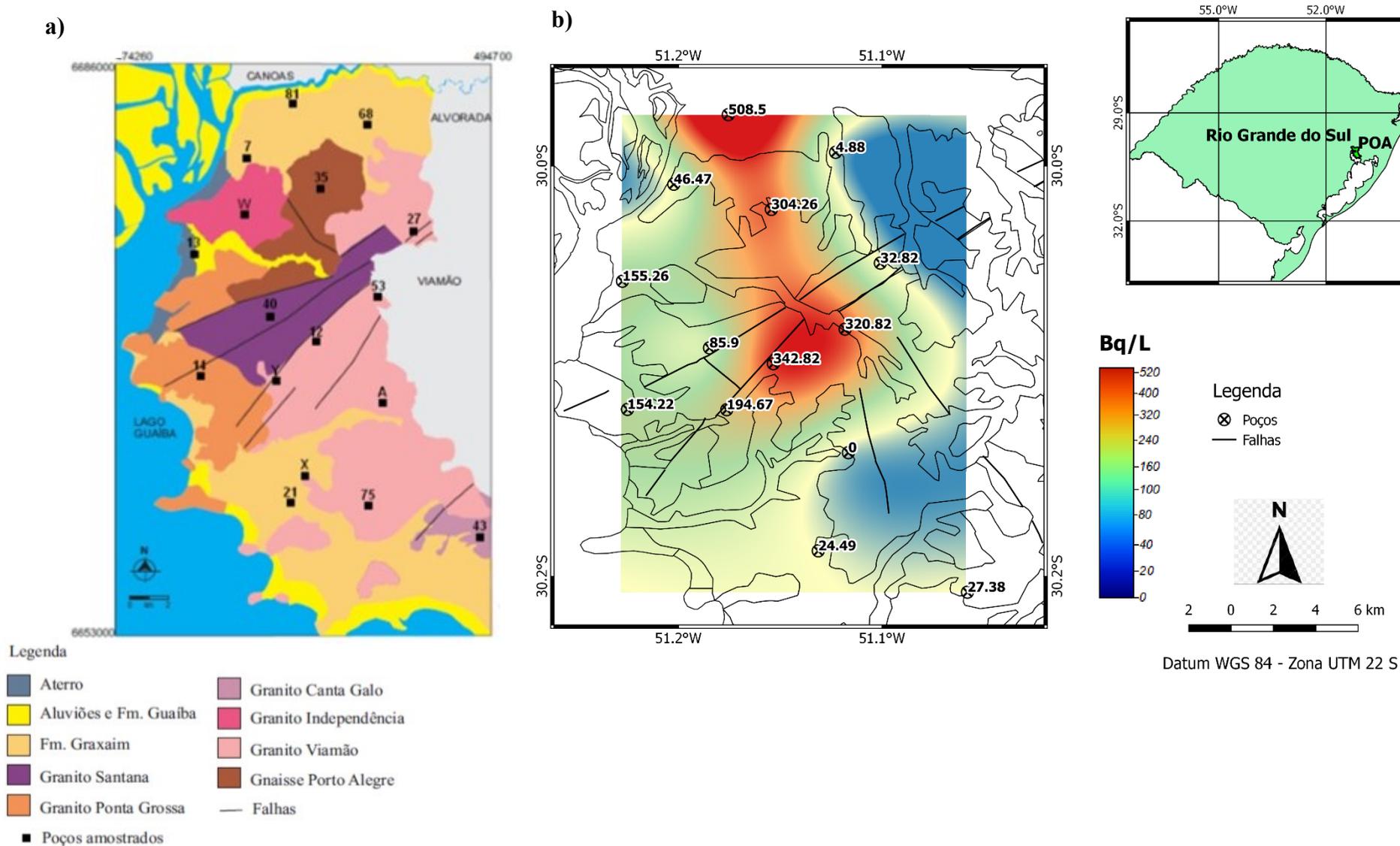
Fonte: autora

Como mencionado anteriormente, foram retirados do trabalho da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências, mestrado 2011, da Ana Clara Fianco os valores de concentrações de Rn^{222} em águas subterrâneas dos poços em Porto Alegre – RS.A (figura 21a) mostra o mapa geológico retirado da dissertação sem ser modificado, a (figura 21b) mostra o mapa de isocontorno gerado com os valores retirados do trabalho da Ana Clara Fianco, e podemos observar e os valores mais altos de concentrações de Rn^{222} foram em poços tubulares que se encontram sobre o granito Viamão, granito Santana e granito Ponta Grossa chegando a valores de 155,25 Bq/L a 342,82 Bq/L próximos as falhas regionais na direção NW.

O maior valor obtido de concentração de Rn^{222} nos poços em Porto Alegre, segundo Ana Clara Fianco (2011) foi 508,05 Bq/L esse poço tubular encontra-se localizado na região norte do município muito próximo ao rio Gravataí. A subsuperfície apresenta espessa camada de sedimentos da Formação Graxaim (argiloso-arenoso), a água subterrânea foi coletada do poço com profundidade de 202 metros, na tabela de descrição do perfil do poço explica que a partir de 108 metros de profundidade encontrasse granito de cor rosa. Também se obteve valor de (304,26 Bq/L) sobre o gnaisse de Porto Alegre. Os valores dos poços W, 21 e X não foram utilizados para interpolação devido as amostras medidas de concentração de Rn^{222} serem em solo.

Analisando os resultados do mestrado da Ana Clara Fianco (2011) e deste trabalho podemos inferir que os granitoides são influenciadores de concentrações de Rn^{222} e os valores altos se encontram em poços freáticos, mas principalmente em poços tubulares variando de 25 metros, 80 metros a 202 metros de profundidades. Obteve-se em ambos os trabalhos valores de concentrações na faixa de 300Bq/L. E ainda, poços próximos ou sobre as falhas regionais e fraturas ajudam na constante emanção desse elemento. Mesmo havendo fatores que influenciaram em algumas coletas de amostras em ambos os trabalhos podemos afirmar que os valores excederam o permitido pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Figura 21 – Mapa a) mapa geológico retirado da Pós-Graduação em Ciências, Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre- RS, Ana Clara Fianco. Mapa b) mapa de isocontorno de concentração de Rn^{222} do município de Porto Alegre- RS. Fonte: autora



10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentada nesse trabalho demonstrou dados importantes relacionados com o estudo sobre a distribuição do Rn^{222} , onde foi possível adquirir medidas de águas subterrâneas em Caçapava do Sul contribuindo com informações sobre a concentração desse gás no Brasil.

As medidas realizadas apresentaram concentrações de Rn^{222} acima do limite estabelecido pela OMS e pela USEPA (1999). Pode-se verificar que o granito as falhas e fraturas influenciam na concentração de Rn^{222} em águas subterrâneas sendo constante a emissão desse elemento. Nos outros Domínios Metamórfico e Vulcânico houve valores de concentração de Rn^{222} mas considerados médios e baixos não ultrapassando o valor permitido de 100Bq/L.

Os mapas de zona de risco de exposição final e o raster de exposição final, mostraram com detalhes as áreas de alto risco de exposição que se sugere um constante monitoramento estando próximo ao município, como também mostrou as áreas que precisam de um monitoramento com uma atenção especial, estando sobre o município.

Dificuldades foram encontradas na realização do trabalho onde, fatores como poços lacrados pelas FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz –RS), poços desativados, bombas queimadas impediram a coleta de água a ser avaliada. Esse trabalho agrega para o conhecimento e desenvolvimento de pesquisas sobre o radionúclido Rn^{222} , um gás que contribui para o desenvolvimento de câncer.

Assim sendo, as perspectivas futuras abertas aqui são diretas. Tais como aumentar a quantidade de poços a ser analisados, focando especial interesse, mas não único, em poços adjacentes a falha regional.

REFERÊNCIAS

APPLETON, O; SMEDLY, P: **Essentials of medical geology : impacts os the natural environment on public health.** Londres. NERC,P.227-262, MA:Elsevier Academic Press, 2005.

AHP OLINE SYSTEM – AHP-OS, disponível em: <https://bpmsg.com/ahp/> (Acesso em: 02 de agosto de 2019).

ANA CLARA FIANCO, A.C.F : **Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre- RS.** Programa de Pós-graduação Inst. Geociências. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ARVELA, H “**Experiences in radon-safe building in Finland.**” Science of the total environment 272.1 (2001) : 169-174.

ALDENKAMP, F. J. & Stoop, P. - **Sources and transport of indoor radon** - Measurements and Mechanisms. - Thesis of environmental radioactivity research group at the KVI, 1994.

BUSHONG, Stewart C., **Radiologic Science for technologists:** physics, biology and protection. 7. E ed. Mosby, Elsevier,2001.

_____. _____.9. ed.Mosby, Elsevier,2008.

BEIR, V . **Health effects of ezposure to low levels of ionizing radiation.** Washington, DC: National Academy of Sciences (1990).

BOMFIM L. F. C., **Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG:** Concepção e Metodologia. XVI Congresso Brasileiro de Água Subterrânea e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços p. 8-10. 2010.

BITENCOURT, M. F. Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: **geologia e relações com o corpo granítico**. Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, v. 1, p. 37-48, 1983.

COSTA, H.G. et MOLL, R.N. (1999), “**Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar**”, Gestão & Produção, Vol.6 No.3, pp.243-256, disponível em: <http://www.scielo.br> (Acesso em: 14 de outubro de 2019).

CORRÊA, J. N. **Avaliação de Concentrações de radônio em Ambiente de Convívio Humano na Região Metropolitana de Curitiba**. UTFPR, Master Degree Thesis, 2006.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil**. Sistema de Informações Geográficas de Disponibilidade Hídrica. Escala 1:2.500.000. Brasília, DF. 2007.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. Porto Alegre RS. 2008.

DUARTE, C.R: **Radioelementos naturais na área do Projeto Rio Preto (GO)**, 2002.

EPA- Environmental Protection Agency. **Radon in Drinking Water Health Risk Reduction and Cost Analysis**; Notice, Federal Register, v. 64, Washington: february 26,1999.

_____. **Radon Mitigation Research**, Washington: September, 1999.

_____. **Radon in Drinking Water: Questions and Answers**. Washington: October, 1999.

_____. **Assessment of Risks form Radon in Homes**. Washington: June, 2003.

_____. **A Citizen's Guide To Radon:** The guide to protecting yourself and your Family from Radon. Washington: January, 2009.

GESELL.P: PRICHARD.N: **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry.**,International atomic energy agency. Viena IAEA-TECDOX-1363,179p, 2003.

GASTAL, M.C.P. & FERREIRA, F. J. F. Discussão dos processos de construção do complexo granítico São Sepé, RS: **feições geológicas e petrográficas. Pesquisas em Geociências.** Porto Alegre, v. 3, n. 40, p. 233-257, 2013.

GENITRON. Instruments, AphaGUARD. **The reference in professional radon measurement.**Germany,2007.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert e KRANE, Kenneth S. Physics. v.2.15ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos (LTC), John Wiley & Sons, 2004.

IPEN – **Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares** – 2002. <
<https://www.ipen.br/sitio/index.php?idc=816>> Acesso em :agosto de 2019

JANIKIAN, L., ALMEIDA, R.P. de, FRAGOSO-CESAR, A.R.S. & FAMBRINI G.L.Redefinição do Grupo Bom Jardim (Neoproterozóico III) em sua área-tipo: **litoestratigrafia, evolução paleoambiental e contexto tectônico.** Revista Brasileira de Geociências 33(4): p 349-362. 2003.

LANL- **Los Alamos National Laboratory.** Disponível em:
<<https://www.lanl.gov/errors/service-unavailable.php>>. Acesso em: junho 2019.

MUJALLI, G.R. **Espectometria de raios gama e concentrações de radônio em solos por meio de resistividade elétrica e radiação gama.** Brazilian Journal Of Geology, v.34, n.3, p. 383-392,2008.

MARIA CELESTE; ALEX ALVES : **APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) COM A MENSURAÇÃO ABSOLUTA NUM PROBLEMA DE SELEÇÃO QUALITATIVA;** Instituto Federal Fluminense, Universidade

de São Paulo, Capa > v. 11, n. 3 (2016), disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/988/493> acessado 01 de outubro 2019 as 15:14 horas.

MACHADO, J. L. F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Tese. 2005

National Council on Radiation Protection and Measurement: **Committee on Health Risks of Exposure to Radon**. Vol.6. National Academies Press, 1999.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; JUNIOR, Farid Chemale; WILDNER, Wilson. **Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS)**. Ciência e Natura, v. 36, p. 183, 2014.

REMUS, M. V. D.; Hartmann, L. A.; McNaughton, N. J. & Fletcher, I. R. 1999. SHRIMP UPb zircon ages of volcanism from the São Gabriel Block, southern Brazil, In: **SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS**, 1., 1999. Gramado, Boletim..., Porto Alegre, UFRGS, p. 83.

ROISENBERG, A., VIERO, A. P., FREITAS, M. A., MACHADO, J. L. F. Os recursos hídricos subterrâneos no Rio Grande do Sul: **Uma visão sobre a saúde das águas e implicações na saúde das populações**. In. 50 Anos de Geologia: Instituto de Geociências, Contribuições. Editores IANNUZZI, R., FRANTZ, J. C. Ed. Comunicação e Identidade, Porto Alegre, RS. 2007.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. SEMA. **Relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul**. 2007.

SAATY, T.L. (1990), “**How to make a decision: The analytic hierarchy process**”, European Journal of Operational Research, Vol.48 No.1, pp.9-26, disponível em: <http://www.scopus.com> :Acesso em: 14 de outubro de 2019.

SAATY, T. L. (1991), “**Método de Análise Hierárquica**”, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP.

SHIMIZU, T. (2006), **Decisão nas Organizações**. 2 ed., Atlas, São Paulo, SP.

TANNER, A.B. Radon migration in the. **A supplementary review, Natural Radiation Environment III**, Symposium Proceeding, vol.1 , pp.5-56, Houton , Texas ,1978.

THE GEOLOGY OF RADON, U.S. Geological Survey to provide information about the earth sciences, natural resources, and the environment, Book and Open-File Report Sales U.S. Geological Survey Federal Center, Box 25425 Denver, CO 80225, 1992.

TIPLER, P.A. **Física: Física Moderna, Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria**. V.3.4 ed., Rio de Janeiro: LTC,2000.

UNSCEAR- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly,2000.

USEPA United States Environmental Protection Agency. **Office of groundwater and drinking water rule: technical fact sheet EPA 815-F-99-006**. Washington, DC: USEPA,1999.

VISÃO COMPUTACIONAL - ECCV 2002: 7ª Conferência Européia sobre Visão Computacional, Copenhague, Dinamarca, 28-31 de maio de 2002', Anais, Parte III, Notas de Aula em Ciência da Computação.Springer-Verlag Heidelberg; pp.21-31.

WHO – **Guidelines for drinking water quality: radiological aspects**. Vol.1: Recommendations. Third ed. Geneva: World Health Organization, 2004.

WHO. **World Health Organization. Handbook on indoor radon: a public health perspective**. Genebra, p.95.,2009.

APÊNDICE A

Foi coletada uma amostra de 500 ml de água do poço 19 que obteve um valor alto de concentração de Rn^{222} (198,56 Bq/L). Essa amostra dividida em dois recipientes de vidro distintos, sendo um com tampa (fechado) e outro sem tampa (aberto), e ambas analisadas pelo equipamento AphaGUARD 24 horas depois da coleta. Sendo que temos que levar em consideração que o recipiente foi aberto depois da coleta ao chegar em casa para a amostra ser dividida perdendo um pouco do gás.

A primeira amostra a ser analisada foi aquela do recipiente mantido aberto, o valor obtido foi de 59,35 Bq/L. Em seguida foi analisada a amostra do recipiente mantido fechado que obteve o valor 67,48 Bq/L. Observa-se que ambos os valores de concentração de radônio diminuíram em 24 horas, o que era esperado visto que a meia vida do Rn^{222} é de 3,82 dias, mesmo considerando que a água dificulta a liberação natural do elemento. Os valores obtidos nessa análise são considerados médios, sendo que o valor mais alto medido entre os dois recipientes foi o daquele mantido fechado, embora o valor do outro recipiente tenha apresentado um valor significativo.

O que nos leva a afirmar que caso se guarde a água do poço para ser consumida, ou ainda, utilizada para preparação de alimentos, horas ou poucos dias pós a coleta, ela ainda apresenta Rn^{222} dissolvido. Considerando que, segundo a OMS, para a água ser própria para uso humano deve ter atividade menor do que 100Bq/L, e para a água ser potável é necessária uma atividade menor do que 0,1 Bq/L .