



**UFMG**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

CLÁUDIO JOSÉ CHAGAS

**O USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
DESCARGA DE AQUÍFEROS AO LONGO DO CÓRREGO DA MATINHA, MG**

BELO HORIZONTE  
2017

CLÁUDIO JOSÉ CHAGAS

O USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR PARA IDENTIFICAÇÃO DE DESCARGA DE  
AQUÍFEROS AO LONGO DO CÓRREGO DA MATINHA, MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e  
Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em  
Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Ciências das Radiações

Orientador: Maria Ângela de Barros Correia Menezes

Coorientador: Vinícius Verna Magalhães Ferreira

BELO HORIZONTE  
2017

C433u	<p>Chagas, Cláudio José. O uso do Radônio como traçador para identificação de descarga de aquíferos ao longo do córrego da Matinha, MG [manuscrito] / Cláudio José Chagas. – 2017. 151 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Maria Ângela de Barros Correia Menezes. Coorientador: Vinícius Verna Magalhães Ferreira.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos e apêndices: f. 124-151. Bibliografia: f. 118-123.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Águas subterrâneas - Teses. 3. Isótopos - Teses. 4. Radon - Teses. 5. Traçadores radioativos - Teses. I. Menezes, Maria Ângela de Barros Correia. II. Ferreira, Vinícius Verna Magalhães. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.039(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES



## FOLHA DE APROVAÇÃO

O USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR PARA IDENTIFICAÇÃO DE  
DESCARGA DE AQUÍFEROS AO LONGO DO CÓRREGO DA MATINHA, MG

### CLAUDIO JOSÉ CHAGAS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES.

Aprovada em 13 de fevereiro de 2017, pela banca constituída pelos membros:

Dra. Maria Ângela de Barros Correia Menezes - Orientadora  
PCTN/UFMG - CDTN/CNEN

Dr. Vinicius Verna Magalhaes Ferreira – Co-orientador  
CDTN/CNEN

Dr. Alberto Avellar Barreto  
(CNEN-CDTN)

Profa. Talita de Oliveira Santos  
Departamento de Anatomia e Imagem - UFMG

Prof. Clarysson Alberto Mello da Silva  
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Belo Horizonte, 13 de fevereiro de 2017.

## **DEDICATÓRIA**

*Peço licença a Ele e dedico aos meus pais, Wilson e Maria Helena, minha  
companheira Anastásia e aos nossos filhos Cauã e Caio.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CDTN e à CNEN, nas pessoas do Diretor Waldemar Augusto Macedo, e da chefe da Divisão de Meio Ambiente e Rejeito, Amenônia Maria Ferreira Pinto, por permitirem que eu transformasse uma das minhas atividades no SEMAM em minha dissertação de mestrado.

Ao Virgílio Bomtempo, ex-chefe do Serviço de Meio Ambiente, pela permissão para concluir os estudos e ao Alberto Barreto, atual chefe do Serviço de Meio Ambiente, pela continuidade da permissão, pelo grande incentivo e confiança na divulgação de nosso progresso acadêmico.

Aos colegas do Projeto Radônio coordenado por Vinícius Verna e executado também pelos colegas Nayron Presley, Rubens Moreira, Raquel Mageste, Talita Santos e, em especial ao Zildete Rocha e toda sua equipe do Laboratório de Radioatividade Natural, pela orientação e apoio.

Aos colegas do Serviço de Meio Ambiente do CDTN: Cláudia Peixoto, Vanusa, Rosália, Raquel Mingote, Carlos Alberto, Lécio H. Salim, Jefferson Bandeira, que, com muita paciência, me mostraram o caminho das pedras para a prática do conhecimento.

Ao Paulo C. H. Rodrigues pelo carinho e competência com a qual tratou os dados no LABGEO.

Ao colega do SEMAM, agora aposentado, Marcos Machado Drumond pelo pontapé inicial e confiança depositada.

A todos os colegas do CDTN que colaboraram no decorrer das atividades do projeto: Joir Genaro, Liessi Santos, Elenísio Fonseca, Wellington Mônico, Herculis Bernardes, Geraldo Kastner, Carlos Alberto Carvalho, Denison Lima, Thaís Ferraz, Amanda Lafetá, Eugênio Miranda, Aline Fabiane e Pedro Dutra, Igor Moura.

A Ana e Otávio Custódio pelo carinho que nos receberam em sua casa com os deliciosos quitutes dela e a experiência dele como leiturista e construtor.

Aos meus orientadores Maria Ângela e Vinícius Verna que pavimentaram a estrada permitindo que meu aprendizado se tornasse seguro e tranquilo.

À minha esposa Anastásia e a nossos filhos Cauã e Caio pela paciência que me dispensaram durante os muitos dias e noites dedicadas à escrita desta dissertação, bem como, pela compreensão de minhas ausências pelos dias trabalhados em campo.

Aos meus pais Wilson Chagas e Maria Helena Chagas que nunca deixaram de sonhar e pela concreta base familiar com a qual me formaram.

Aos meandros do córrego da Matinha, que ao formar um ponto de interrogação ao longo de seus caminhos, nos desafiou a descobrir seus segredos.

Ao Departamento de Engenharia Nuclear, UFMG, por tornar realidade o meu sonho de continuar os meus estudos com o mestrado.

À FAPEMIG pelo financiamento do projeto.

*Quando a ciência se deixa claramente  
cooptar por uma tecnologia cujos objetivos  
são mais econômicos que sociais, ela [...]  
renuncia a toda vocação de servir à  
sociedade.*

Milton Santos, 1984.

## RESUMO

Dentro do arcabouço das “Técnicas Nucleares” está o uso de isótopos naturais e artificiais como traçadores para o estudo do meio ambiente. O uso de traçadores naturais na hidrologia se mostra uma ferramenta bastante útil, que vem sendo utilizada em vários cenários. Um destes traçadores é o isótopo de radônio,  $^{222}\text{Rn}$ , um gás nobre oriundo de fontes naturais por consequência do decaimento alfa do  $^{226}\text{Ra}$ . O radônio pode ser encontrado, em maior ou menor grau de concentração, em toda água subterrânea, assim como em solos e rochas de onde exala para a atmosfera através dos espaços decorrentes de fissuras e ou nanoporos presentes. Ele pode emergir para os corpos hídricos pela lixiviação das águas ou outros líquidos através desses interstícios. Nesta pesquisa, o gás  $^{222}\text{Rn}$  diluído naturalmente pela lixiviação da água que se infiltrou nos solos e rochas dos aquíferos, foi utilizado como traçador no intuito de serem identificadas seções de descarga desses aquíferos ao longo do Córrego da Matinha. A área de estudo dista cerca de 70 km de Belo Horizonte e fica na cidade de Itaúna, MG. O córrego da Matinha tem cerca de 2.200 m de extensão e compõe a rede de afluentes do reservatório de água denominado Serra Azul, na Bacia do rio Juatuba, MG. Os resultados apresentados exprimem os estudos ocorridos entre o segundo semestre de 2014 e o primeiro semestre de 2016, em dez campanhas para amostragem de água, medidas de vazão e de radiação gama natural. As amostras de água foram coletadas junto ao fundo e bem próximo ao talvegue na calha do córrego usando seringa e/ou bomba peristáltica de sucção em baixa vazão para evitar o escapamento do gás. As análises de  $^{222}\text{Rn}$  foram efetuadas em campo durante as coletas, e no laboratório do CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, tendo sido todas realizadas com o detector de radônio RAD 7. As medidas de vazão contaram com o uso da técnica de traçadores fluorescentes: rodamina e fluoresceína para injeção em pontos de montante e jusante de seções com maiores atividades de  $^{222}\text{Rn}$ . O fluorímetro usado para recuperação da massa de traçador fluorescente injetado foi o GGUN FL-30 ligado a um notebook para que se pudesse acompanhar a passagem da nuvem de traçador. As medidas de radiação gama contaram com o detector AT6101C instalado dentro de uma mochila para que se pudessem fazer varredura ao longo do talvegue e nas margens do córrego. Os resultados mostraram a presença de quantidades significativas do radioisótopo em diversas seções do córrego da Matinha, o que indica a interconexão entre as águas subterrâneas e as superficiais. Essa interconexão com os aquíferos justifica o aumento das vazões encontradas entre montante e jusante das seções com maiores atividades de  $^{222}\text{Rn}$ , uma vez que não existiam outras contribuições superficiais ao longo do trecho estudado. A radiação gama encontrada denota proximidade com a rocha base juntamente com os minerais trazidos pela água subterrânea e sedimentados nas superfícies de inundação.

**Palavras-chave:** Interconexão de águas subterrâneas-superficiais, traçadores, isótopos ambientais,  $^{222}\text{Rn}$ .

## ABSTRACT

Within the framework of "Nuclear Techniques" is the use of natural and artificial isotopes as tracers for the study of the environment. The use of natural tracers in hydrology is a very useful tool that has been used in several scenarios. One such tracer is the isotope of radon,  $^{222}\text{Rn}$ , a noble gas from natural sources as a consequence of alpha decay of  $^{226}\text{Ra}$ . Radon can be found, to a greater or lesser degree, in all groundwater, as well as in soils and rocks from where it exudes into the atmosphere through spaces arising from fissures and or nanopores present. It can emerge into the water bodies by the leaching of water or other liquids through these interstices. In this research, the  $^{222}\text{Rn}$  gas diluted naturally by the leaching of the water that infiltrated the soils and rocks of the aquifers was used as a tracer in order to identify sections of discharge of these aquifers along the Stream of Matinha. The study area is about 70 km from Belo Horizonte and is in the city of Itaúna, MG. The Matinha stream is about 2,200 m in length and is part of the network of tributaries of the water reservoir called Serra Azul, in the Juatuba River Basin, MG. The results presented express the studies that occurred between the second half of 2014 and the first half of 2016, in ten campaigns for water sampling, flow and natural gamma radiation measurements. Water samples were collected near the bottom and very close to the thalweg in the watercourse using syringe and or peristaltic suction pump at low flow to avoid gas leakage. The  $^{222}\text{Rn}$  analyzes were performed in the field during the collections and in the laboratory of the CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, all of which were carried out with the radon detector RAD 7. The flow measurements counted on the use of the fluorescent tracer's technique: rhodamine and fluorescein were used for injection at points upstream and downstream of sections with higher  $^{222}\text{Rn}$  activities. The fluorimeter used to recover the mass of injected fluorescence tracer was the GGUN FL-30 connected to a notebook so that it could follow the tracer cloud passage. The gamma radiation measurements were fitted with AT6101C detector installed inside a backpack so that they could be scanned along the thalweg and along the banks of the stream. The results showed the presence of significant amounts of the radioisotope in several sections of Matinha stream, which indicates the interconnection between the groundwater and the surface waters. This interconnection with aquifers justifies the increase of the flows found between upstream and downstream of the sections with larger activities of  $^{222}\text{Rn}$ , since there were no other superficial contributions along the section studied. The gamma radiation found denotes proximity to the base rock along with the minerals brought by the groundwater and sedimented on the flood surfaces.

**Keywords:** Groundwater-surface interconnection, tracers, environmental isotopes,  $^{222}\text{Rn}$ .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Séries de decaimento natural.....	24
Figura 2 – Emissão, emersão e exalação do radônio .....	32
Figura 3 – Equilíbrio secular entre o $^{226}\text{Ra}$ e o $^{222}\text{Rn}$ . .....	33
Figura 4 – Tipos de aquíferos quanto à litologia.....	35
Figura 5 – Tipos de aquífero quanto à posição. ....	35
Figura 6 – Sequência de decaimento do $^{222}\text{Rn}$ .....	42
Figura 7 – "Backpack" Espectrômetro portátil de radiações. ....	45
Figura 8 – Mapa de localização do córrego da Matinha. ....	48
Figura 9 – Localização do Córrego da Matinha em relação à Fazenda Laranjeiras. ....	50
Figura 10 – Mapa litológico do Córrego da Matinha. ....	51
Figura 11 – Relevo da microbacia do Córrego da Matinha. ....	53
Figura 12 – Histograma da chuva anual na Estação Fazenda Laranjeiras.....	54
Figura 13 – Coleta com seringa. ....	55
Figura 14 – Acondicionamento da amostra. ....	55
Figura 15 – Bomba peristáltica. ....	56
Figura 16 – Tubo coletor.....	57
Figura 17 – Kit RAD H <sub>2</sub> O conectado ao RAD7. ....	58
Figura 18 – Fluorímetro GGUN-FL30.....	60
Figura 19 – Calibração, injeção e leitura com o fluorímetro.....	62
Figura 20 – Pontos de coleta da Campanha #1. ....	64
Figura 21 – Preparação da solução do traçador Rodamina .....	65
Figura 22 – Diluição de traçador no campo.....	66
Figura 23 – Injeção da solução de Rodamina. ....	67
Figura 24 – Acompanhamento da passagem do traçador Rodamina.....	67
Figura 25 – Análise de $^{222}\text{Rn}$ próximo ao local de coleta.....	68
Figura 26 – Pontos de coleta da Campanha #3. ....	69
Figura 27 – Sistema coletor de amostras.....	70
Figura 28 – Preenchimento do frasco com água.....	71
Figura 29 – Pontos de coleta da Campanha #4 .....	72
Figura 30 – Movimentação da equipe no córrego. ....	72
Figura 31 – Pontos de coleta da varredura V1a e V2a da Campanha #5.....	74
Figura 32 – Tubo coletor e bomba peristáltica. ....	75
Figura 33 – Trechos amostrados na Campanha #6. ....	76
Figura 34 – Detecção de radiação gama no córrego da Matinha. ....	77
Figura 35 – Queda d'água no Córrego da Matinha. ....	78
Figura 36 – Trechos amostrados na Campanha #9. ....	79

Figura 37 – Gráfico das atividades determinadas nos pontos do córrego da Matinha, Campanha #1. ....	81
Figura 38 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ determinadas nos pontos do córrego da Matinha, Campanha #3 e seções A, B e C. ....	83
Figura 39 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas, Varredura 1, Campanha #4, entre os pontos 4 e 5. ....	84
Figura 40 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas no Varredura 2, Campanha #4 ....	85
Figura 41 – Recuperação de massa a jusante da seção V1 – vazão de $2,03 \text{ L.s}^{-1}$ . (14/07/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #5. ....	86
Figura 42 – Recuperação de massa a montante da seção V1 – vazão de $2,19 \text{ L.s}^{-1}$ . (14/07/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #5. ....	87
Figura 43 – Recuperação de massa a montante da seção V2 – vazão de $1,75 \text{ L.s}^{-1}$ . (15/07/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #5. ....	88
Figura 44 – Recuperação de massa a jusante da seção V2 – vazão de $2,10 \text{ L.s}^{-1}$ . (15/07/2015) – traçador: rodamina, Campanha #5. ....	88
Figura 45 – Recuperação de massa a jusante da seção V1 – vazão de $2,8 \text{ L.s}^{-1}$ . (03/08/2015) – traçador: rodamina, Campanha #5. ....	89
Figura 46 – Recuperação de massa a montante da seção V1 – vazão de $2,4 \text{ L.s}^{-1}$ . (03/08/2015) – traçador: rodamina, Campanha #5. ....	89
Figura 47 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas na Varredura 1a da Campanha #5. ....	91
Figura 48 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas na Varredura 2a da Campanha #5. ....	92
Figura 49 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas no Trecho 1 da Campanha #6. ....	93
Figura 50 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas no Trecho 2 da Campanha #6. ....	94
Figura 51 – Gráfico das atividades de $^{222}\text{Rn}$ encontradas no Trecho 3 da Campanha #6. ....	95
Figura 52 – Excesso de turbidez na água de calibração do fluorímetro. ....	96
Figura 53 – Recuperação de massa no meio da seção V1 – vazão de $2,1 \text{ L.s}^{-1}$ . (15/12/2015) traçador: fluoresceína, Campanha #6. ....	96
Figura 54 – Recuperação de massa no exutório – vazão de $3,54 \text{ L.s}^{-1}$ . (15/12/2015) traçador: fluoresceína, Campanha #6. ....	97
Figura 55 – Recuperação de massa a montante da seção V2 – vazão de $1,13 \text{ L.s}^{-1}$ . (16/12/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #6. ....	97
Figura 56 – Recuperação de massa a jusante da seção V2 – vazão de $1,19 \text{ L.s}^{-1}$ . (16/12/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #6. ....	98
Figura 57 – Histograma da frequência relativa das radiações registradas no córrego da Matinha, Campanha #7. ....	99
Figura 58 – Gráfico da distribuição normal das radiações registradas no Córrego da Matinha Campanha #7. ....	99

Figura 59 – Recuperação de massa na queda d'água – vazão de 3,06 L.s <sup>-1</sup> . (10/05/2016) traçador: fluoresceína, Campanha #8. ....	100
Figura 60 – Recuperação de massa no trecho V1 – vazão de 2,59 L.s <sup>-1</sup> . (10/05/2016) traçador: fluoresceína, Campanha #8. ....	100
Figura 61 – Gráfico das atividades encontradas na Campanha #9. ....	101
Figura 62 – Recuperação de massa no exutório – vazão de 4,76 L.s <sup>-1</sup> . (24/05/2016) traçador: fluoresceína, Campanha #10. ....	102
Figura 63 – Recuperação de massa na seção V2 – vazão de 1,83 litros/seg. (24/05/2016) traçador: fluoresceína, Campanha #10. ....	103
Figura 64 – Histograma da chuva mensal na microbacia do córrego da Matinha.....	104
Figura 65 – Mapa radiométrico do talvegue e entorno do córrego da Matinha. ....	107
Figura 66 – Gráfico das atividades de <sup>222</sup> Rn determinadas ao longo do córrego da Matinha. ....	109
Figura 67 – Atividades de <sup>222</sup> Rn ao longo do córrego da Matinha. ....	111
Figura 68 – Gráfico das atividades de <sup>222</sup> Rn e vazões ao longo do córrego da Matinha. ....	112
Figura 69 – Gráfico das atividades de <sup>222</sup> Rn <i>versus</i> radiação gama natural. ....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas <sup>a,b</sup> e média das concentrações de atividade de <sup>40</sup> K, <sup>232</sup> Th e <sup>238</sup> U em rochas e solos típicos <sup>c</sup> .....	27
Tabela 2 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas nos pontos do córrego da Matinha, Campanha #1. ....	80
Tabela 3 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas na Campanha #3.....	82
Tabela 4 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas em locais próximos aos pontos 4 e 5, Varredura 1, córrego da Matinha, Campanha #4. ....	84
Tabela 5 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas, Varredura 2, Campanha #4. ....	85
Tabela 6 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas no trecho Varredura 1a, Campanha #5.....	90
Tabela 7 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas no detalhamento da Varredura 2a, Campanha #5. ....	91
Tabela 8 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas na Campanha #6, trecho 1. ....	93
Tabela 9 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas na Campanha #6, Trecho 2. ....	94
Tabela 10 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas na Campanha #6, Trecho 3. ....	94
Tabela 11 – Atividades de <sup>222</sup> Rn medidas na Campanha #9. ....	101

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades do radônio.....	30
Quadro 2 – Classificação do relevo. ....	52
Quadro 3 – Vazões representativas ao longo do córrego da Matinha. ....	105
Quadro 4 – Atividades médias de <sup>222</sup> Rn nos principais trechos do córrego da Matinha. ....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	–	Agência Nacional de Águas
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
CDTN	–	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CETEC-MG	–	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CNEN	–	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNTP	–	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CPRM	–	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
DNAEE	–	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNPM	–	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
EPA	–	<i>US Environmental Protection Agency</i>
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LABGEO	–	Laboratório de Geoprocessamento e Cartografia Digital
LRN	–	Laboratório de Radioatividade Natural
RAD-7	–	Detector de radônio fabricado pela DurrIDGE
SEMAM	–	Serviço de Meio Ambiente do CDTN
UFMG	–	Universidade Federal de Minas Gerais
UNESCO	–	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNSCEAR	–	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
USGS	–	<i>United States Geological Survey</i>
WHO	–	<i>World Health Organization</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1.JUSTIFICATIVA.....	19
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
2.1.OBJETIVO GERAL .....	21
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
<b>3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>4. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
4.1.RADIAÇÃO E RADIOATIVIDADE AMBIENTAL .....	23
4.2.ISÓTOPOS .....	26
4.2.1. Urânio .....	27
4.2.2. Tório.....	29
4.2.3. Radônio .....	29
4.3.CONCEITOS RELEVANTES EM HIDROLOGIA .....	34
4.3.1. Aquífero .....	34
4.3.2. Águas superficiais.....	35
4.3.3. Águas subterrâneas.....	36
4.4.TRAÇADORES EM HIDROLOGIA .....	36
4.4.1. Estudos utilizando traçadores na Bacia Representativa de Juatuba - MG .....	37
4.5.O USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR PARA CONHECIMENTO DAS INTERAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E DE SUPERFÍCIE.....	39
4.6.DETECTOR DE RADÔNIO RAD-7.....	41
4.7.O USO DE TRAÇADORES FLUORESCENTES PARA MEDIÇÃO DA VAZÃO DO CURSO DE ÁGUA.....	43
4.8. MONITOR DE RADIAÇÃO GAMA.....	44

<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
5.1.ÁREA DE ESTUDO .....	46
5.1.1. Aspectos geográficos.....	46
5.1.2. Aspectos geológicos e geomorfológicos.....	49
5.1.3. Relevo e vegetação .....	52
5.1.4. Aspectos climáticos durante os experimentos .....	54
5.2.COLETA DE AMOSTRAS.....	55
5.2.1. Coleta com seringa.....	55
5.2.2. Coleta com bomba peristáltica.....	55
5.2.3. Tubo Coletor.....	56
5.3.MEDIDAS DE <sup>222</sup> RN EM ÁGUA .....	57
5.3.1. Modo de operação.....	59
5.4.MEDIDAS DE VAZÃO.....	60
5.4.1. Modo de operação.....	61
5.5.LEVANTAMENTO DA RADIAÇÃO GAMA NATURAL.....	62
5.6.CAMPANHAS .....	63
5.6.1. Campanha #1 – 16 e 17/09/2014 .....	63
5.6.2. Campanha #2 – 16 e 17/09/2014 .....	65
5.6.3. Campanha #3 – 18 a 20/11/2014 .....	68
5.6.4. Campanha #4 – 10 e 11/02/2015 .....	70
5.6.5. Campanha #5 – 14 e 15/07/2015 .....	73
5.6.6. Campanha #6 – 28 a 29/09/2015 .....	75
5.6.7. Campanha #7 – 21 a 23/03/2016 .....	76
5.6.8. Campanha #8 – 10/05/2016 .....	77
5.6.9. Campanha #9 – 16 e 17/05/2016 .....	78
5.6.10. Campanha #10 – 24/05/2016.....	79
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
6.1.RESULTADOS DA CAMPANHA#1 – 16 E 17/09/2014 .....	80
6.2.RESULTADOS DA CAMPANHA #2 – 05 E 06/11/2014 .....	81

6.3. RESULTADOS DA CAMPANHA #3 – 18 A 20/11/2014 .....	81
6.4. RESULTADOS DA CAMPANHA #4 – 10 E 11/02/2015 .....	83
6.4.1. Varredura 1 (V1) .....	83
6.4.2. Varredura 2 (V2) .....	84
6.5. RESULTADOS DA CAMPANHA #5 – 14 E 15/07/2015 .....	86
6.5.1. Vazão.....	86
6.5.2. Atividade de <sup>222</sup> Rn. ....	90
6.6. RESULTADOS DA CAMPANHA #6 – 28 A 29/09/2015 .....	92
6.6.1. Atividade de <sup>222</sup> Rn. ....	92
6.6.2. Vazão.....	95
6.7. RESULTADOS DA CAMPANHA #7 – 21 A 23/03/2016 .....	98
6.8. RESULTADOS DA CAMPANHA #8 – 10/05/2016.....	100
6.9. RESULTADOS DA CAMPANHA #9 – 16 E 17/05/2016 .....	101
6.10. RESULTADOS DA CAMPANHA #10 – 24/05/2016 .....	102
<b>7. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>104</b>
7.1. PLUVIOSIDADE .....	104
7.2. VAZÃO.....	105
7.3. RADIOATIVIDADE GAMA NATURAL .....	106
7.4. ATIVIDADE DO <sup>222</sup> RN.....	108
7.5. ATIVIDADE DE <sup>222</sup> RN <i>VERSUS</i> VAZÕES E RADIAÇÃO GAMA .....	112
<b>8. CONCLUSÕES.....</b>	<b>114</b>
8.1. O CÓRREGO DA MATINHA.....	114
8.2. CONCLUSÕES SOBRE O MÉTODO .....	115
8.3. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	117
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE A – TRABALHOS PUBLICADOS DURANTE A PESQUISA.....</b>	<b>124</b>

<b>APÊNDICE B – TABELA COM TODAS AMOSTRAGENS DE ATIVIDADE DE <sup>222</sup>RN.....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE C – RELATÓRIOS DE VAZÃO DO GGUN FL-30.....</b>	<b>130</b>
<b>ANEXO A – PERFIL LITOLÓGICO DO POÇO, FAZENDA LARANJEIRAS.....</b>	<b>150</b>
<b>ANEXO B – MAPA GEOLÓGICO DE IGARAPÉ .....</b>	<b>151</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez hídrica provocada pela baixa pluviosidade ocorrida nos últimos anos na área mais populosa do Brasil, a região sudeste, chamou a atenção para que estudos fossem realizados visando solucionar os problemas acarretados. Isso não poderia ser diferente devido à água ser um bem essencial à vida e estar presente, em cerca de 60%, na matriz energética brasileira (ANEEL, 2016).

Muitos problemas hidrológicos relatados na agricultura, abastecimento, indústria e áreas de saneamento e habitação, entre outros, puderam ser resolvidos de diversas formas, como, por exemplo, com a aplicação da técnica de traçadores (Singh & Kumar, 2005). No entanto, vários processos relacionados com a distribuição de água ainda necessitam de investigações precisas, tais como os que envolvem água de superfície, o vapor de água na atmosfera, a água do subsolo em zonas insaturado-saturadas e a inter-relação entre a água superficial e subterrânea (Singh & Kumar, 2005).

Dentro do arcabouço das “Técnicas Nucleares” está o uso de isótopos naturais e artificiais como traçadores para o estudo do meio ambiente. Um traçador é qualquer substância ou partícula (químico-biológica), que pode ser usada para seguir, de forma pontual ou contínua, o comportamento de um determinado sistema, como por exemplo, volume de água em ambiente aberto ou subterrâneo (Ferreira, et al., 2015b). Davis e colaboradores (1980) definem que um traçador para o estudo das águas deve apresentar as seguintes características: ser atóxico, de baixo custo, apresentar detecção inequívoca e quantificação em concentrações mínimas, mover-se com a água, não perturbar o sistema em estudo, ser quimicamente estável, não estar presente em quantidades grandes na água estudada e não ser absorvido ou filtrado pelo meio sólido através do qual a água se move.

O uso de isótopos estáveis e radioativos como traçadores utilizados para a compreensão do comportamento hidrológico ampliou-se nos últimos anos, quando instrumentações adequadas para a detecção/medida desses traçadores tornaram-se disponíveis no mercado. Os isótopos são elementos quimicamente idênticos, mas com o número de massa diferente, que estão presentes naturalmente na hidrosfera/atmosfera, assim podem ser chamados de traçadores isotópicos ambientais. Quando são aplicados intencionalmente à água para investigações específicas, são chamados traçadores isotópicos artificiais. Em muitos casos os processos estudados, inclusive na área de estudo deste projeto, abrangem água utilizada para abastecimento público não sendo, portanto, desejada a descarga de altas taxas de substâncias artificiais nos sistemas -

rios, lagos, aquíferos, oceanos, etc. Sendo assim, traçadores isotópicos ambientais muitas vezes são mais recomendados para aplicações em hidrologia (Giap, 2003).

Neste contexto, a utilização do radônio como traçador merece destaque. O radônio possui dois isótopos aplicáveis ao estudo de águas: o  $^{222}\text{Rn}$  (meia vida de 3,82 dias), produzido pelo decaimento alfa do  $^{226}\text{Ra}$  na série do  $^{238}\text{U}$ , e o  $^{220}\text{Rn}$  (meia vida de 56 segundos), também conhecido como torônio, produzido pelo decaimento alfa do  $^{224}\text{Ra}$  na série do  $^{232}\text{Th}$ . Devido ao maior tempo de meia vida, o  $^{222}\text{Rn}$  é um isótopo amplamente utilizado como traçador de águas subterrâneas e superficiais (Silva, *et al.*, 2009). É quimicamente inerte, não ocorrendo reações biogeoquímicas indesejáveis, o que não altera suas características físicas. Além disso, o radônio é enriquecido em águas subterrâneas quando comparado a águas de superfície (Burnett, *et al.*, 2008). Esta característica decorre do fato de a água subterrânea estar em contato direto com grãos minerais que contêm rádio – exercendo o papel de transportador do gás radônio – e de a água de superfície estar sujeita à turbulência promovida por fatores ambientais, o que permite a fuga desse gás (Cook, *et al.*, 2003). O enriquecimento de radônio em águas subterrâneas dependerá dos teores de seu progenitor, rádio, existente nos diversos tipos de rochas que possam compor o aquífero onde reside essa água. Embora haja exceções à regra e em relação à presença do elemento rádio, os granitos têm alto teor, rochas metamórficas e sedimentares contêm nível intermediário, enquanto que o calcário possui níveis baixos desse progenitor de radônio (UNSCEAR, 2000).

Sendo assim, com o uso de técnicas nucleares, esta pesquisa visou localizar as seções de descarga dos aquíferos ao longo do córrego da Matinha, afluente do córrego Mato Frio, na cidade de Itaúna, MG, pertencente à bacia experimental do rio Juatuba. Para tanto, utilizou-se do gás radônio como traçador da existência das descargas dos aquíferos.

## 1.1. Justificativa

Desde a sedentarização do homem, por volta de onze mil anos atrás, que as cidades foram formadas às margens de rios, tais como Nilo (Egito), Jordão (Israel/Palestina), Tigre e Eufrates (Mesopotâmia, atual Iraque e Kuwait), na região do Crescente Fértil. Isto ocorreu também em outras regiões importantes na formação das primeiras cidades, tais como os rios Indo e Ganges (Índia), Amarelo e Azul (China) e tantas outras. O acesso à água potável foi fundamental para o surgimento das cidades e tal comportamento social já seria suficiente para justificar o estudo dos corpos hídricos (Faber, 2011).

Contudo, o adensamento populacional trouxe consigo a exploração de produtos primários, tais como madeira, carvão mineral, minério de ferro, ouro, dentre outros, que modificaram e ainda modificam as características geomorfológicas, principalmente nas proximidades dos corpos hídricos, causando a descontinuidade do fornecimento de água proveniente dos aquíferos para os corpos hídricos. Portanto, o conhecimento do comportamento dos aquíferos ao longo dos corpos hídricos serve como base para os estudos de preservação ambiental. Podendo-se demonstrar que a perenização dos leitos de rios e córregos não se resume à preservação das nascentes, mas inclui também a preservação dos aquíferos que são os responsáveis pela intercomunicação das águas subterrâneas com as superficiais.

A bacia do rio Juatuba está situada em área rural, nas proximidades da Região Metropolitana de Belo Horizonte e foi escolhida pelo então DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, a atual ANA – Agência Nacional de Águas, para servir de modelo, do ponto de vista hidrológico, de uma enorme região situada no centro do Estado de Minas Gerais com características geomorfológicas e climatológicas semelhantes. Esse fato somado à quantidade de dados ali registrados desde o final dos anos 1970 são o melhor acervo de informações hidrológicas de pequenas bacias atualmente disponíveis em Minas Gerais (Drumond, *et al.*, 2001; Drumond, 2004; Chagas, *et al.*, 2010).

Dada a sua importância hidrológica e por conter muitos dados históricos disponíveis assim como facilidade de acesso, esta região foi a escolhida como objeto de pesquisa deste estudo, visando contribuir com informações que ainda eram desconhecidas. Esse estudo se apropria das técnicas de medida da atividade de  $^{222}\text{Rn}$  em água associado às medidas de vazão, para identificar seções de intercomunicação das águas subterrâneas com as águas superficiais. Também irá contribuir para o aprofundamento de conhecimentos do sistema hídrico envolvido no suporte à vida, servir de parâmetro para identificação de trechos responsáveis pela perenização de corpos hídricos e, de forma interdisciplinar, contribuir para determinar a capacidade de resiliência de um corpo hídrico após sua contaminação.

No escopo das ideias apresentadas acima, foi realizada uma pesquisa entre 2014 e 2016, em uma área contida dentro da bacia experimental do rio Juatuba. Esta região tem sido objeto de estudos há vários anos e foi escolhida como objeto de pesquisa deste estudo por conter muitos dados históricos disponíveis e pela facilidade de acesso. A pesquisa foi coordenada por pesquisadores do CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, que desenvolve projetos na Bacia Representativa de Juatuba desde 1997.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Estudar a inter-relação entre as águas de superfície e subterrâneas na microbacia do córrego da Matinha, da bacia do rio Juatuba.

### 2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Utilizar o radionuclídeo  $^{222}\text{Rn}$  como traçador, para identificar a inter-relação entre as águas de superfície e subterrâneas no corpo hídrico escolhido;
- Conhecer os processos que envolvem a inter-relação entre águas subterrâneas e de superfície nesse contexto;
- Identificar seções de intercomunicação do aquífero com o córrego da Matinha afluente do córrego Mato Frio;
- Levantar dados de radiação gama natural na área de estudo para correlacionar com as seções de intercomunicação;
- Ampliar o conhecimento hidrogeológico por meio de novas aplicações do radônio como traçador natural na bacia de Juatuba;
- Desenvolver a técnica de amostragem e medição da concentração do isótopo do radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) em águas de superfície;
- Validar a metodologia analítica de aplicação do isótopo de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) como traçador de água subterrânea com uso de traçadores fluorescentes;
- Estabelecer uma base de dados que contribua para ampliar o emprego de radionuclídeos naturais como traçadores.

### 3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está constituída em oito capítulos que se desenvolvem da seguinte forma:

A introdução contendo o problema e os motivos que levaram ao desenvolvimento desta pesquisa está no capítulo 1.

O objetivo geral e os específicos estão no segundo capítulo.

O terceiro capítulo corresponde a esta descrição da estrutura, enquanto que o capítulo 4, Referencial Teórico, se subdivide em oito seções e traz uma revisão bibliográfica sobre conceitos de radiação, radioatividade, hidrologia, a aplicação de traçadores na área de estudo, o uso do  $^{222}\text{Rn}$  como traçador ambiental pela comunidade científica internacional, bem como, pelos pesquisadores no Brasil e a descrição dos detectores e traçadores utilizados.

O capítulo 5 está dividido em seis seções principais: na primeira se apresenta a área de estudo com seus aspectos físicos, demográficos, de vegetação e climáticos; a evolução no sistema de coleta d'água para amostragem é discutida na segunda seção; a terceira seção apresenta os procedimentos operacionais para medir a atividade  $^{222}\text{Rn}$  nas amostras; a quarta seção explica a operação para medidas de vazão e descreve o modo de operação do fluorímetro; o levantamento da radiação gama natural é explicado na quinta seção e; a última seção descreve o procedimento nas dez campanhas realizadas.

O capítulo 6 traz os resultados de cada uma das dez campanhas, seguido pelo capítulo 7 que apresenta uma análise desses resultados sob a influência da pluviosidade e das medidas de vazão. Sobre o papel da radioatividade gama natural na microbacia, sobre isotopia baseada na atividade de  $^{222}\text{Rn}$  encontrada nas águas e, por último, essa atividade frente às vazões e radiação gama encontrada.

As conclusões da pesquisa se encontram no capítulo 8, que se divide em três seções. A primeira seção fala sobre o córrego da Matinha, a segunda seção sobre o método aplicado e a terceira sugere alguns estudos que podem ser feitos no local de estudo.

Ao final da dissertação são encontradas as referências bibliográficas utilizadas nesta pesquisa. Os relatórios e tabelas complementares aos resultados se encontram nos apêndices, enquanto os anexos trazem alguns documentos de terceiros usados na pesquisa.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

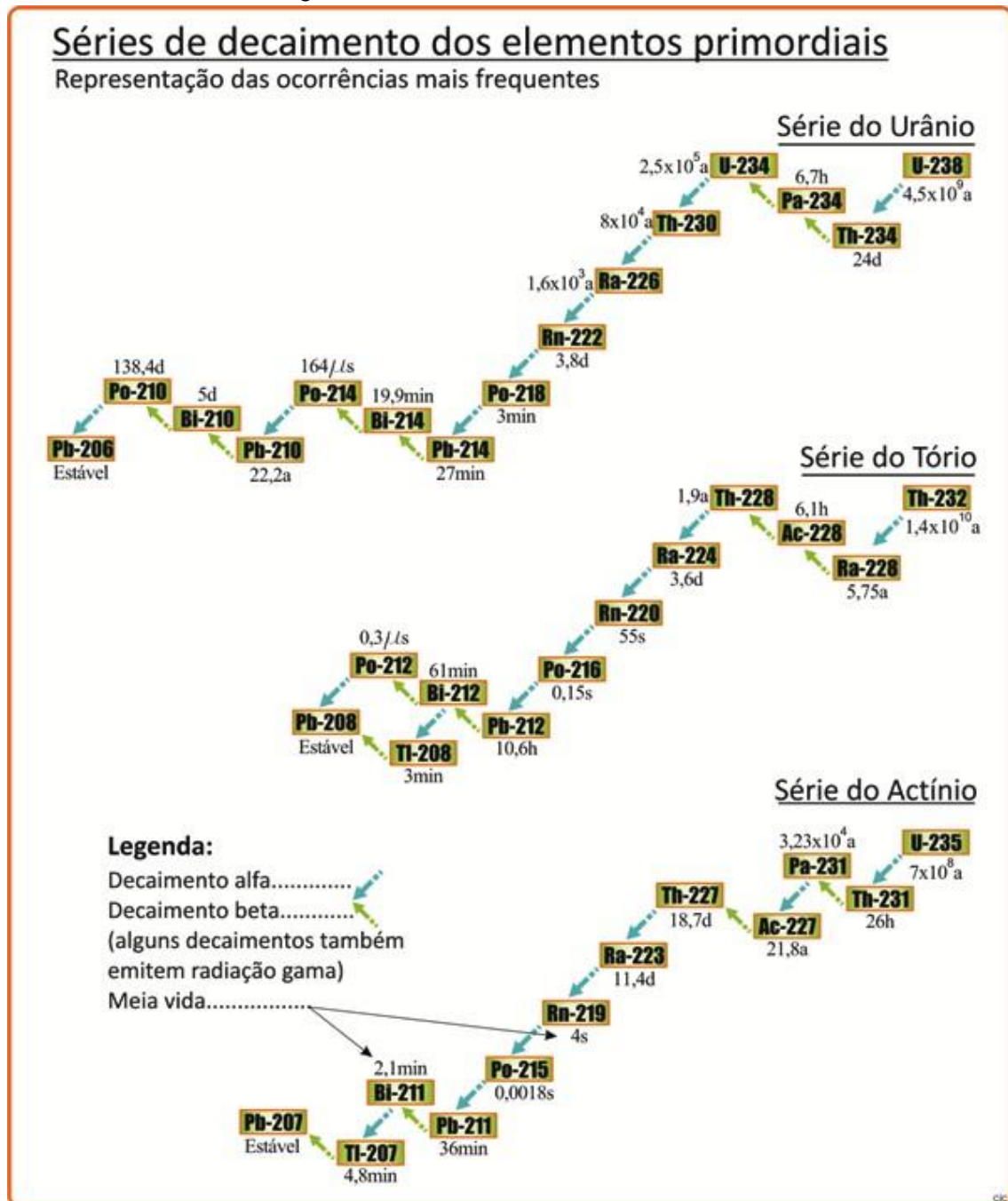
Neste capítulo, uma revisão bibliográfica dos conceitos sobre radiação, radioatividade, hidrologia, aplicação de traçadores na área de estudo são apresentados.

### 4.1. Radiação e Radioatividade Ambiental

Radiação é um termo amplo que inclui o calor, a luz, as ondas de rádio, as micro-ondas, outras formas de energia (Sanchez, 2001) e, também, a radioatividade. Pouco antes do final do século XIX o francês Antoine Henri Becquerel descobriu o fenômeno da radioatividade natural ao guardar sais de urânio junto com um filme fotográfico dentro da gaveta. Os experimentos clássicos que foram realizados logo depois, pelos Curies e outros, causaram impactos profundos na ciência, na tecnologia e na sociedade (Eisenbud, 1973). O fenômeno da radioatividade foi usado, dentre outras aplicações, para estimar a idade da Terra e medir a taxa de sedimentação no fundo dos oceanos (Dalrymple, 2004).

Todos os elementos químicos encontrados na natureza com número atômico maior que 83 ( $Z > 83$ ) são radioativos e decaem por emissão alfa ou beta e em alguns casos emitem também a radiação gama. São elementos que emitem radiação por conter o “fenômeno da radioatividade natural” descoberta por Becquerel. Esses radionuclídeos decaem sucessivamente em produtos instáveis até se transformar em um nuclídeo estável. As famílias radioativas naturais são constituídas pela série do urânio, que se inicia com o  $^{238}\text{U}$  e se encerra com o chumbo estável  $^{206}\text{Pb}$ , pela série do tório que se inicia com o  $^{232}\text{Th}$  e se estabiliza com  $^{208}\text{Pb}$ , e pela série do actínio – antigamente acreditava-se que a série se iniciava no actínio – que se inicia com  $^{235}\text{U}$  e se encerra com o  $^{207}\text{Pb}$ . Essa transformação ou decaimento depende da atividade de cada radionuclídeo cuja unidade é o becquerel (Bq) que é definida como uma desintegração por segundo, ou seja, 1Bq é igual ao decaimento de um átomo por segundo (Eisenbud, 1973; Turner, 2007). A Figura 1 mostra as séries ou famílias de decaimento natural.

Figura 1 – Séries de decaimento natural



Elaborado pelo autor.

Fonte: (IAEA - Nuclear Data Section, 2015; Eisenbud, 1973).

Muitas vezes estas transformações deixam o núcleo com excesso de energia que a perde emitindo raios gama – fótons de alta energia, que são parcelas discretas de energia sem massa ou carga. A transformação espontânea de um núcleo é chamada radioatividade e o excesso de energia emitido é uma radiação (ionizante). Assim, o elemento químico cujo

núcleo promove um ato de transformação denominado decaimento do nuclídeo, que muda e emite radiação, é chamado radionuclídeo ou nuclídeo radioativo (Turner, 2007).

Meyerhof (1967) explica que o nuclídeo radioativo inicial do decaimento é chamado “pai”, e o nuclídeo do produto é chamado “filha” ou “*daughter*”, sendo que aqui no Brasil convencionou-se chamá-lo de “filho”. Quando não ocorre mais decaimento pode-se dizer que o filho de determinado radionuclídeo pai é estável. Quando há uma sucessão de vários decaimentos de filhos radioativos denomina-se “cadeia de decaimentos radioativos”, como pode ser visto na Figura 1 (Meyerhof, 1967).

A radiação ionizante natural, ou seja, proveniente de nuclídeos instáveis, permeia todo o ambiente. Raios cósmicos atingem a Terra sendo inclusive radioativos devido aos radionuclídeos presentes. A atividade natural está presente nos alimentos, na bebida e no ar. Toda a população da Terra está exposta à radiação em maior ou menor grau, não obstante, os seres humanos, animais e plantas estão envolvidos em um background natural de radiação que, de modo geral e com poucas exceções não significa riscos para a saúde (IAEA, 2004; Chagas, *et al.*, 2013).

Além da radiação natural, somam-se a essa, as radiações produzidas nas atividades humanas que envolvem o uso de substâncias radioativas. Algumas dessas atividades podem simplesmente aumentar a exposição a fontes de radiação natural, como por exemplo, as atividades mineradoras de substâncias naturalmente radioativas que as concentram durante o processo de separação do minério da canga ou rejeito.

O relatório geral da UNSCEAR (2000) cita vários exemplos desse tipo de interferência antrópica na radiação natural do meio ambiente: a produção de energia pela queima de carvão que contém essas substâncias radioativas; a contaminação ambiental por resíduos radioativos resultantes de testes de armas nucleares; as centrais nucleares e outras instalações que liberam materiais e resíduos radioativos no ambiente.

Ainda existem as radiações artificiais provenientes da produção de radiofármacos, da produção de energia nuclear e, dentre outros, da produção de raios X. Esse último, bastante utilizado pela medicina e indústria, foi descoberto por Wilhelm Conrad Roentgen em 1895 e, de acordo com Eisberg & Resnick (1979), quando um feixe de elétrons de alta energia acelerado por uma diferença de potencial de alguns milhares de volts é freado ao atingir o material do alvo, causando uma desaceleração desses elétrons, há a emissão de um espectro característico de radiação eletromagnética conhecida como raios X.

Portanto, pode-se dizer que o meio ambiente convive com a radioatividade desde a formação do planeta Terra há aproximadamente 4,54 bilhões de anos (Dalrymple, 2004). Os seres humanos, bem como, animais e plantas convivem com essas radiações em graus diversos, que podem ser de origem natural e ou artificial.

## 4.2. Isótopos

Os diferentes elementos químicos são caracterizados pelo número de prótons contidos em seu núcleo, o que lhes confere propriedades únicas. Os átomos de um mesmo elemento químico têm o mesmo número de prótons, mas podem possuir diferente número de nêutrons. Estes elementos com diferentes números de nêutrons denominam-se de isótopos (Custodio & Llamas, 1976). O dicionário Houaiss (2009) descreve os isótopos como sendo cada um de dois ou mais átomos de um mesmo elemento, cujo núcleo atômico possui o mesmo número de prótons, mas números de nêutrons diferentes (Instituto Antônio Houaiss, 2009).

Os isótopos tendem a se transformar em uma estrutura mais estável por meio da conversão de um nêutron ou de um próton. O processo de conversão de um nêutron em próton é conhecido como decaimento beta,  $\beta^-$ , resulta na emissão de um elétron e um antineutrino. Já núcleos com excesso de prótons promovem a transformação desses para nêutrons no decaimento beta, conhecido como  $\beta^+$ , perdendo a carga positiva através da emissão de um pósitron, que é uma partícula de carga positiva com a mesma massa de um elétron, mais a emissão de um neutrino (Aramburu & Bisbal, 1994).

Alguns isótopos com núcleos pesados decaem através da produção de uma partícula alfa que consiste em dois prótons e dois nêutrons. Idêntico a um núcleo de hélio, a partícula alfa é muito mais pesada do que a partícula beta e transporta duas unidades de carga positiva (IAEA, 2004; Turner, 2007).

Nem sempre os decaimentos resultam em núcleos estáveis, e esses emitem partículas e/ou radiação eletromagnética para liberar energia. Esse fenômeno chamado radioatividade é inerente aos isótopos. Os isótopos que possuem núcleos radioativos são chamados de radionuclídeos, isótopos radioativos ou radioisótopos (Custodio & Llamas, 1976). A radiação emitida por esses elementos pode atravessar a matéria ou, até mesmo, interagir com ela, possibilitando múltiplas aplicações.

Conforme Pinto (2012) a radioatividade natural se deve principalmente aos radioisótopos primordiais presentes em nosso planeta desde a sua formação, cujas meias vidas, são

suficientemente longas para permitir que suas atividades permaneçam existindo até os dias de hoje. É o caso do potássio-40, do urânio-238, do urânio-235 e do tório-232, cujas concentrações de atividade na rocha e no solo estão representadas na Tabela 1.

O potássio-40 ( $^{40}\text{K}$ ) é um isótopo radioativo do potássio que tem uma meia vida de  $1,248 \times 10^9$  anos. Ele sofre os três tipos de decaimento: pouco mais de 89% decai pela emissão de uma partícula beta (-) e um antineutrino formando o cálcio-40 ( $^{40}\text{Ca}$ ); ou por captura eletrônica, onde menos de 11%, decai para formação do argônio-40 ( $^{40}\text{Ar}$ ); muito raramente ele poderá decair para o mesmo argônio-40 pela emissão de uma partícula beta (+) e um neutrino (Eisenbud & Gessell, 1997; Pinto, 2012; IAEA - Nuclear Data Section, 2015). Em todos os casos do decaimento surgem elementos estáveis, portanto não há a formação de uma série de decaimento como as séries naturais de decaimento.

Tabela 1 – Faixas<sup>a,b</sup> e média das concentrações de atividade de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  em rochas e solos típicos<sup>c</sup>

Material	Potássio-40		Tório-232		Urânio-238	
	% total K	Bq.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	Bq.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	Bq.kg <sup>-1</sup>
Rocha Ígnea						
Basalto (média na superfície)	0,8	300	3-4	10-15	0,5-1	7-10
Máfico	0,3-1,1	70-400	1,6 e 2,7 <sup>d</sup>	7 e 10 <sup>d</sup>	0,5 e 0,9 <sup>d</sup>	7 e 10 <sup>d</sup>
Sáfico	4,5	1100-1500	16 e 20 <sup>d</sup>	60 e 80 <sup>d</sup>	3,9 e 4,7 <sup>d</sup>	50 e 60 <sup>d</sup>
Granítico (média na superfície)	>4	>1000	17	70	3	40
Rocha sedimentar						
Arenito de xisto	2,7	800	12	50	3,7	40
Quartzo puro	<1	<300	<2	<8	<1	<10
Areia de praia	<1	<300	6	25	3	40
Rocha carbonática	0,3	70	2	8	2	25
Faixa para toda rocha	0,3-4,5	70-1500	1,6-20	7-80	0,5-4,7	7-60
Crosta Continental (média)	2,8	850	10,7	44	2,8	36
Solo (média)	1,5	400	9	37	1,8	22

a – Exemplos de materiais fora dos limites podem ser encontrados, mas em quantidades relativamente pequenas.

b – Um Bq.kg<sup>-1</sup> = 0,027pCi.g<sup>-1</sup>.

c – Adaptado de NCRP (1987<sup>a</sup>).

d – Média e mediana, respectivamente

Fonte: Adaptado de (Eisenbud & Gessell, 1997)

#### 4.2.1. Urânio

A literatura sobre o urânio é vasta, principalmente após o advento da descoberta da energia nuclear, quando esse elemento passou a ser usado como combustível para os reatores nucleares.

De acordo com Bonotto & Silveira (2006) a migração e a distribuição do urânio na crosta terrestre têm sua mobilidade influenciada pelas atividades magmáticas desde a formação do que ele chama de Terra Primordial. O urânio está retido nos minerais formadores de rochas, associado aos minerais secundários e, em altas concentrações, formando seu próprio mineral, até os dias de hoje.

Baseando-se na literatura especializada pode-se afirmar que o urânio em estado natural encontra-se distribuído de forma ubíqua em toda crosta terrestre (Turner, 2007). As concentrações típicas de urânio para as classes mais predominantes de rocha, a média da crosta e as concentrações no solo estão listados na Tabela 1, o que demonstra que as concentrações de urânio variam de 0,5 a 4,7 mg.kg<sup>-1</sup> em todo tipo de rocha ígnea e sedimentar. O efeito disto no desenvolvimento do solo resulta em concentração média de urânio menor do que a concentração média na rocha. No entanto, pela complexidade da formação, o comportamento do urânio em rochas metamórficas é pouco conhecido (Eisenbud & Gessell, 1997; Pires, 2013).

Trata-se do elemento natural mais pesado e por causa de sua grande massa, todos os seus isótopos são radioativos, pois o tamanho do núcleo desses átomos é grande suficiente para não suportar a repulsão entre os prótons que, em períodos de meia vida, desintegra o átomo. Esse elemento é um metal branco-níquel, pouco menos duro que o aço.

O urânio consiste, basicamente, de três isótopos naturais, o mais estável e dominante é o <sup>238</sup>U que em termo de abundância isotópica representa 99,274% de todo urânio natural. O isótopo <sup>235</sup>U ocorre em percentual bem menor, 0,720% e o <sup>234</sup>U tem abundância isotópica ínfima de 0,0057% e é produto do decaimento do <sup>238</sup>U nas séries de decaimento natural (Figura 1). O urânio ocorre naturalmente em concentrações na faixa de 0,008 a 8,2 mg.kg<sup>-1</sup>. Pode ser encontrado em rochas, solos e corpos hídricos em geral. Nas águas, está presente em concentrações entre 0,01 a 500 µg.kg<sup>-1</sup> e, eventualmente, em 1 mg.kg<sup>-1</sup>. Pode estar na forma dissolvida, adsorvida ou absorvida. Seu transporte e mobilidade dependem de quatro fatores principais: potencial de oxirredução, pH, agentes complexantes e materiais adsorventes presentes na água [Camargo, 1994 *apud* (Santos, 2010)].

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de urânio. Tal fato permite suprir suas necessidades internas durante longo prazo, além de uma possível disponibilização do excedente para distribuição no mercado externo (INB - Indústrias Nucleares do Brasil, 2016).

#### 4.2.2. Tório

O tório natural é composto de um isótopo primordial, o  $^{232}\text{Th}$ , cuja abundância é bem próximo de 100%. Ele possui mais 25 radioisótopos identificados e menos abundantes, tais como,  $^{230}\text{Th}$  com meia-vida de  $7,538 \times 10^4$  anos,  $^{229}\text{Th}$  com meia vida de  $7,34 \times 10^3$  anos, e  $^{228}\text{Th}$  com meia vida de 1,92 anos. Os demais radioisótopos do tório possuem meias-vidas abaixo de 30 dias, sendo que a maioria desses com meias-vidas inferiores a 10 minutos (Eisenbud, 1973; IAEA - Nuclear Data Section, 2015).

O tório é encontrado em pequena proporção de massa, 1,6 a 20  $\text{mg.kg}^{-1}$ , na maioria das rochas e solos, aproximadamente quatro vezes a abundância do urânio nas rochas ígneas. Geralmente o solo contém em média 9  $\text{mg.kg}^{-1}$  de tório (Tabela 1).

Apesar de sua abundância em relação ao  $^{238}\text{U}$  ser maior, o mesmo não ocorre para a atividade mediana no solo encontrada no  $^{232}\text{Th}$  que é de 30  $\text{Bq.kg}^{-1}$  contra 35  $\text{Bq.kg}^{-1}$  do  $^{238}\text{U}$  (UNSCEAR, 2000).

Os compostos de tório não são facilmente solúveis em água e não evaporam do solo ou da água para a atmosfera. Seu transporte ocorre principalmente por sorção nas partículas e depende do fenômeno de ressuspensão ou de mistura do sedimento na água. Devido a essa relativa insolubilidade e baixa atividade específica o  $^{232}\text{Th}$  está pouco presente ou em quantidades insignificantes em materiais biológicos [CAMARGO, 1994 *apud* (Santos, 2010)]; (Eisenbud & Gessell, 1997).

Assim como o  $^{222}\text{Rn}$  é um dos filhos do  $^{238}\text{U}$ , o decaimento da série do  $^{232}\text{Th}$  passa pelo  $^{220}\text{Rn}$  que é outro isótopo do radônio de grande destaque nos estudos hidrológicos.

Dado o devido destaque aos dois elementos primordiais segue-se com um aprofundamento no conhecimento do radônio que é o isótopo ambiental que foi usado como base para a detecção das seções de comunicação das águas superficiais com as subterrâneas neste estudo.

#### 4.2.3. Radônio

O radônio é um gás nobre, quimicamente inerte e inodoro, possui número atômico 86, é produzido na crosta terrestre pelo decaimento do rádio e escapa da rocha por emanação. Sua densidade é de 9,73  $\text{g.L}^{-1}$  fazendo com que seja o gás nobre mais pesado sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Tem ponto de fusão e

ebulição acima da média e apresenta temperatura e pressão críticas superiores às de qualquer outro gás (Quadro 1).

Esse gás tem solubilidade média em água fria que diminui com o aumento da temperatura e essa solubilidade contribui para que ele escape da estrutura da rocha após o decaimento dos átomos de rádio (Ra), por entre fissuras ou nanoporos, até as águas superficiais (Pinto, 2012).

Ele possui três isótopos de ocorrência natural: o radônio-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ), o radônio-220 ( $^{220}\text{Rn}$ ) e o radônio-219 ( $^{219}\text{Rn}$ ). Sabendo que são gases nobres, esses radioisótopos são inertes e não combinam para formar compostos químicos, no entanto podem ser detectados por suas propriedades radioativas, tais como decaimento alfa de energia bem definida e produtos de decaimentos com meia vida curta [Bonotto, 2004 *apud* (Santos, 2015)]. Como pode ser observado na Figura 1 os isótopos do radônio estão presentes nas três séries primordiais.

Quadro 1 - Propriedades do radônio

Densidade a 0°C e 1atm	9,73g.L <sup>-1</sup>
Ponto de Ebulição	-62°C
Ponto de Fusão	-71°C
Temperatura Crítica	105°C
Pressão Crítica	62 atm
Coefficiente de difusão livre no ar	0,1 cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Viscosidade a 1atm e 20°C	229,0 µP
Solubilidade em água a 1atm e 20°C	230 cm <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> água (CNTP)

Adaptado de Pinto, (2012)

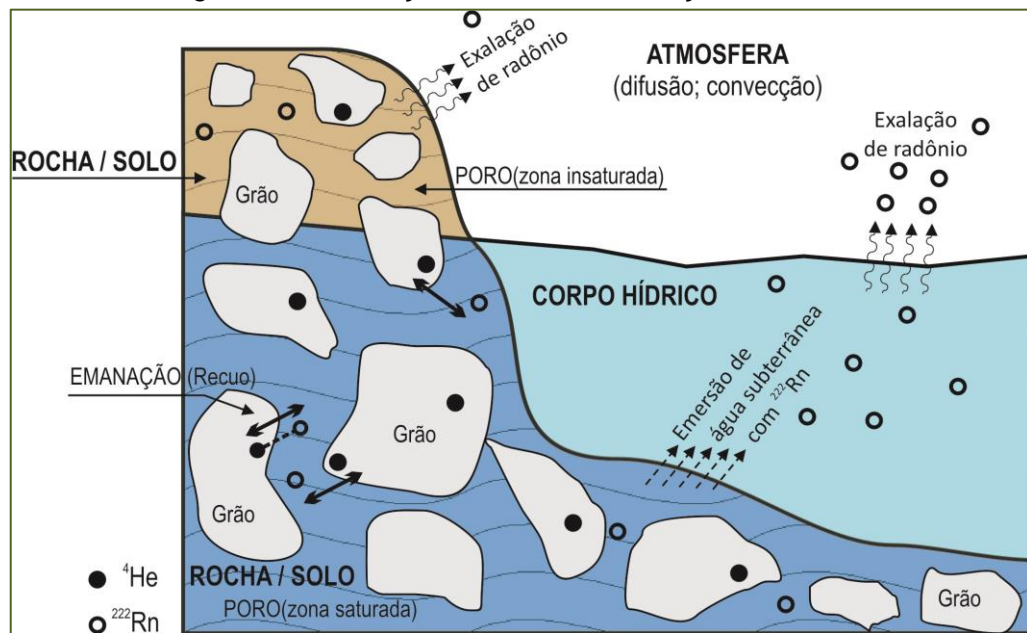
Conhecido como actinônio, o  $^{219}\text{Rn}$  é proveniente do decaimento alfa do  $^{223}\text{Ra}$  na série do actínio e possui meia vida de 3,96 segundos, havendo novo decaimento alfa para  $^{215}\text{Po}$ . Essa meia vida curta reduz a possibilidade de sua utilização como traçador nos meios aquosos.

O torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) é um isótopo do radônio que é produto do decaimento alfa do  $^{224}\text{Ra}$  na série do tório. Possui meia vida de 55,6 segundos, quando ocorre novo decaimento alfa para  $^{216}\text{Po}$ . Com essa meia vida um pouco maior do que o  $^{219}\text{Rn}$  esse elemento é bastante utilizado para medidas *in loco* (Chanyotha, *et al.*, 2010).

O mais comumente encontrado nas zonas saturadas e não saturadas é o  $^{222}\text{Rn}$  que é produto do decaimento alfa do  $^{226}\text{Ra}$  na série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ). Sua meia vida (3,82 dias) é a mais longa em relação aos três isótopos apresentados, condição que favorece sua mobilidade para escapar da rocha geradora, ser coletado e encaminhado para análises em laboratório fora da área de estudo. O decaimento alfa do  $^{222}\text{Rn}$  gera o  $^{218}\text{Po}$  que também é instável e dará continuidade à série de decaimentos até a geração de um núcleo estável do  $^{206}\text{Pb}$ . Sua maior presença está relacionada ao fato dessa meia vida mais longa e à abundância do  $^{238}\text{U}$  (99,27%) dentre os isótopos de urânio (Pinto, 2012; Santos, 2015; IAEA - Nuclear Data Section, 2015).

Quando o progenitor  $^{226}\text{Ra}$  tem um decaimento alfa no solo ou na rocha e emite um núcleo de hélio,  $^4\text{He}$ , o átomo de  $^{222}\text{Rn}$  resultante sofre recuo em direção oposta à emissão alfa (Figura 2). Nesse processo conhecido como *emanação*, parte dos átomos do radônio recuados que estavam próximos à superfície dos grãos da rocha ou solo vai se instalar nos espaços capilares ou poros, fissuras ou, até mesmo, em um grão vizinho que estiver suficientemente próximo. Caso o átomo de  $^{222}\text{Rn}$  se instale nesses espaços, ele pode ser carregado pela água que percola a rocha/solo e se deslocar por difusão e/ou convecção. O mesmo pode ocorrer quando o átomo de  $^{222}\text{Rn}$  se encontra com os gases contidos nos interstícios até alcançar o gás atmosférico, quando o radônio entra em processo de exalação se tornando mais móvel (Eisenbud & Gessell, 1997). Conforme relatório (UNSCEAR, 2000) a distância percorrida pelo átomo de  $^{222}\text{Rn}$  durante o recuo é de 20-70 nm em minerais comuns, 100 nm em água e 63  $\mu\text{m}$  no ar. Na maioria dos solos a *emanação* só ocorre entre 10 e 50% do radônio produzido.

Figura 2 – Emissão, emersão e exalação do radônio



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com (Bonotto & Lima, 1997) os mecanismos que podem causar a emanação de  $^{222}\text{Rn}$  dos fragmentos de rocha – onde também incluímos os solos – e por conseguinte contribuir para o seu teor nas águas são:

- O recuo do  $^{222}\text{Rn}$  após o decaimento alfa dos átomos de  $^{226}\text{Ra}$  próximos à superfície do grão da rocha, isto é, posicionados à distância de cerca de  $0,036\ \mu\text{m}$  correspondente à distância de recuo da molécula de  $^{222}\text{Rn}$ ;
- A difusão do  $^{222}\text{Rn}$  através do retículo cristalino, a partir de locais distanciados da superfície da rocha;
- A difusão do  $^{222}\text{Rn}$  ao longo de defeitos cristalinos, contornos de grãos ou microfraturas distanciados da superfície da rocha.

#### 4.2.3.1. Radônio em equilíbrio secular

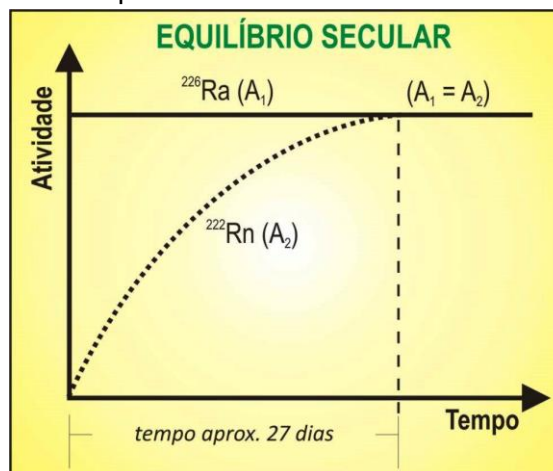
O equilíbrio secular radioativo ocorre quando o tempo de confinamento ( $t$ ) do elemento filho junto com o elemento pai é aproximadamente maior que sete meias vidas do elemento filho ( $T_2$ ), ou seja, ( $t \geq 7T_2$ ) ou ainda quando  $e^{-\lambda_2 t} \ll 1$ , onde  $\lambda_2$  é a constante de decaimento do elemento filho (Turner, 2007).

Quando a meia vida do filho ( $T_2$ ) é pequena se comparada à meia vida do pai ( $T_1$ ) considera-se que a atividade do pai ( $A_1$ ) é constante num ambiente confinado e que não ocorrem reações físico-químicas. A esse fenômeno dado por ( $T_1 \gg T_2$ ) denominou-se equilíbrio secular (Figura 3).

Como exemplo de tempo necessário para que o equilíbrio secular seja alcançado, pode ser citado o estudo feito por Drumond (2004) sobre as condutividades hidráulicas nos solos da bacia do rio Juatuba, usando trítio ( $^3\text{H}$ ) aspergido. Este estudo estimou que, para os anos hidrológicos 1999-2000 e 2001-2002, 36,3% e 38,3% da precipitação anual contribuíram para a recarga do aquífero. A taxa de infiltração da água de chuva em solo insaturado variou entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}\text{cm.s}^{-1}$ , algo entre 87 e 8,7 cm de infiltração no sentido vertical por dia. Como conclusão dessa taxa de infiltração medida, verificou-se que o tempo de percolação da água de chuva no solo até o encontro com o aquífero somado ao tempo de trânsito horizontal (não identificado no estudo) em direção às águas superficiais de um córrego, rio, lagoa e etc. é suficientemente grande, para que haja interação entre as águas e os isótopos de radônio emanados dos grãos da rocha/solo e consequente equilíbrio secular entre o  $^{222}\text{Rn}$  e o  $^{226}\text{Ra}$ .

É importante ressaltar que esse equilíbrio se deve majoritariamente à emissão do  $^{222}\text{Rn}$  diretamente da matriz mineral, conhecido como “radônio não suportado” e não devido ao “radônio suportado” pelo  $^{226}\text{Ra}$  que pode ser encontrado dissolvido na água que permeia os interstícios da rocha/solo (Pinto, 2012).

Figura 3 – Equilíbrio secular entre o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{222}\text{Rn}$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Portanto, pode-se afirmar que devido à característica do  $^{222}\text{Rn}$  de ser um gás nobre inerte que não forma compostos químicos e ao tempo de permanência do  $^{222}\text{Rn}$  – meia vida de 3,82 dias – em contato com  $^{226}\text{Ra}$  contido nos grãos da rocha/solo, cuja meia vida é de 1600 anos, esses elementos estão em equilíbrio radioativo secular nos interstícios do solo saturado até que o  $^{222}\text{Rn}$  seja emergido para o corpo hídrico junto com a água subterrânea, quando sua atividade começa a decair.

As propriedades físico-químicas do  $^{222}\text{Rn}$  apresentam vantagens adequadas para os objetivos do estudo. A oportunidade de coletar esse isótopo em plena atividade no local pesquisado faz dele um dos traçadores naturais mais importantes nos estudos hidrológicos.

### **4.3. Conceitos relevantes em Hidrologia**

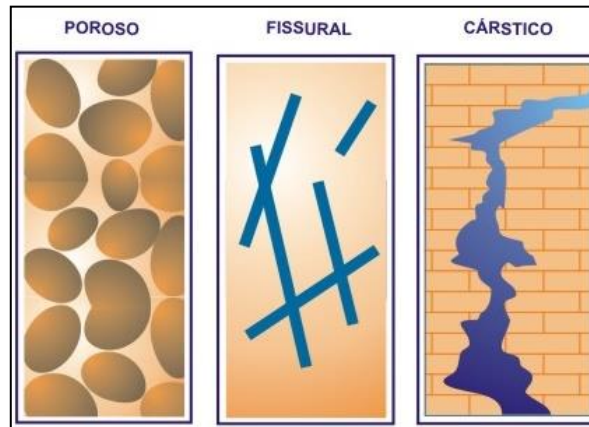
Este estudo baseia-se na interação das águas superficiais com as águas subterrâneas que estão armazenadas em diversos tipos de aquíferos. Para compreender melhor o comportamento dessas águas faz-se necessário abordar alguns conceitos hidrológicos.

#### **4.3.1. Aquífero**

Um aquífero pode ser definido como uma camada subterrânea de rocha, ou outros estratos geológicos, permeável seja por poros ou fraturas, que apresenta uma reserva permanente de água e é capaz de captar águas para armazenamento nas áreas de reabastecimento e transferir um fluxo de águas nas áreas de descarga. Quanto à litologia (Figura 4) existem três tipos de aquífero: poroso, fissural e cárstico. Quanto à sua posição em relação à superfície (Figura 5) existe o aquífero confinado ou artesiano e o não confinado, freático, livre, raso ou superior (ANA, 2015; ABAS, 2016).

O aquífero confinado ou artesiano é aquele que é constituído por uma formação geológica permeável que se encerra entre duas camadas impermeáveis ou quase impermeáveis. O aquífero livre, também chamado de não confinado, raso, freático ou superior é a formação geológica permeável cujo limite superior é a superfície de saturação que está em equilíbrio com a pressão atmosférica, ou seja, é a camada saturada logo abaixo do solo (ANA, 2015; ABAS, 2016).

Figura 4 – Tipos de aquíferos quanto à litologia.



Fonte: adaptado de BOSCARDIN BORGHETTI *et al.* (2004) *apud* (ABAS, 2016).

Figura 5 – Tipos de aquífero quanto à posição.



Fonte: adaptado de BOSCARDIN BORGHETTI *et al.* (2004) *apud* (ABAS, 2016).

#### 4.3.2. Águas superficiais

De acordo com a ANA, água superficial é toda a água que se escoou ou que é armazenada na superfície terrestre [UNESCO, 1992 *apud* (ANA, 2015)].

Em resumo, pode-se dizer que são todas as águas correntes ou armazenadas que estão em contato direto com a atmosfera, a exemplo de rios, córregos, lagos, açudes, mares, oceanos, etc.

### 4.3.3. Águas subterrâneas

É toda água que ocorre abaixo da superfície terrestre em zona não saturada ou saturada. Após a precipitação, uma parcela da água sob a ação da força de adesão ou de capilaridade fica retida nas regiões mais próximas da superfície do solo, constituindo a zona não saturada. Outra parcela se infiltra um pouco mais, sob a ação da gravidade, e atinge as zonas mais profundas do subsolo, constituindo a zona saturada (ABAS, 2016).

## 4.4. Traçadores em hidrologia

A revisão bibliográfica mostrou que nas últimas quatro décadas, tem havido um crescente interesse por parte dos pesquisadores sobre o uso de traçadores para resolver problemas geoambientais e hidrogeológicos.

O interesse científico e tecnológico no uso de traçadores em hidrologia surgiu da necessidade vital de monitorar os fluxos de água. As águas subterrâneas fornecem nutrientes e outros constituintes dissolvidos para as águas superficiais em algumas áreas, o que influencia o ciclo geoquímico da maioria dos elementos pela descarga direta de água subterrânea fresca ou pelas reações químicas que ocorrem durante a recirculação das águas superficiais através do sistema aquífero (Smith, *et al.*, 2002).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias adequadas para as medidas, o uso de isótopos estáveis e radioativos como traçadores para estudar o ciclo hidrológico vem ampliando nos últimos anos (Ferreira, *et al.*, 2015b). No entanto, a maioria dos processos estudados ocorre em água utilizada para abastecimento público não sendo, portanto, desejada a descarga de altas taxas de substâncias artificiais nos sistemas (rios, córregos, poços, lagos, aquíferos, oceanos, dentre outros) (Giap, 2003). Sendo assim, traçadores isotópicos ambientais muitas vezes parecem ser mais recomendados. Como exemplo de tais traçadores os autores Singh & Kumar (2005) citam as seguintes possibilidades:

- Espécies isotópicas da molécula de água ( $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  e  $\text{HT}^{16}\text{O}$ ) e o  $^{14}\text{N}$  e  $^{15}\text{N}$  que são as fontes primárias do nitrogênio na atmosfera;
- Isótopos produzidos pelos raios cósmicos ( $^3\text{H}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{81}\text{Kr}$ );

- Pulsos de radioatividade injetados nos sistemas hidrológicos durante os testes de equipamentos nucleares, que consiste de muitos isótopos de meia vida longa como  $^3\text{H}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{139}\text{I}$ , etc.;
- Cloro-flúor-carbono (CFC), introduzidos como propelentes de garrafas de aerossóis, como agente de limpeza de refrigeradores, solventes, etc.;
- $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  e seus produtos de decaimento, que se encontram distribuídos ao longo da crosta terrestre.

#### 4.4.1. Estudos utilizando traçadores na Bacia Representativa de Juatuba - MG

Conforme afirmado por Drumond (2004), no período 1982/83, a Fundação CETEC-MG desenvolveu investigações hidrogeológicas nessa bacia, abrangendo avaliações hidroquímicas, hidrometeorológicas e geológico-estruturais. Esse trabalho lançou mão de recursos analíticos convencionais de geologia, hidrologia, hidroquímica e de técnicas isotópicas para estabelecer a relação entre as águas superficiais e subterrâneas.

Dentre os resultados concluídos nesse estudo destacou-se que:

*“[...] a principal contribuição subterrânea aos elementos de drenagem provém da circulação subsuperficial em meios com porosidade desenvolvida no manto de alteração de rochas graníticas, básicas, xistosas e metassedimentares; nos depósitos de cobertura argilo-arenosas terciárias de talus e aluviões, cujos freáticos não ultrapassam 5 metros de profundidade. A renovação dessa água se procede substancialmente de ano para ano, sob regime pluviométrico de 1000 mm, o que assegura substancial recarga dos aquíferos, bem como a perenidade dos rios que drenam a região estudada” (CETEC, 1983).*

O uso de traçadores para a realização de estudos hidrológicos na Bacia de Juatuba pelas equipes do CDTN e da UFMG teve início com o projeto de pesquisa intitulado “Aplicação da Técnica de Traçadores ao Estudo de Hidrogramas de Cheias na Bacia Representativa de Juatuba – MG”, desenvolvido no período 1997-2000 (Drumond, 2000). Este projeto teve como principais objetivos a determinação experimental, através de medições diretas usando um traçador fluorescente, dos tempos de trânsito e de concentração das águas pluviais – parâmetros fundamentais no estudo de cheias – e uma avaliação das metodologias indiretas utilizadas para calcular estes parâmetros, de

forma a adequá-las às características das bacias locais. O traçador utilizado foi uma solução fluorescente de Rodamina WT a 20%, que apresenta uma série de vantagens, como: o fácil manuseio, o fato de não apresentar toxidez, a possibilidade de ser detectado por meio de fluorímetros em concentrações muito baixas (10 partes por trilhão) e a baixa capacidade de adsorção.

O segundo projeto desenvolvido na Bacia de Juatuba teve início no final de 1999 e visou quantificar as parcelas da chuva correspondentes à infiltração e à evapotranspiração utilizando o trítio ( $^3\text{H}$ ) como traçador artificial. No que tange ao uso de traçadores neste trabalho, foram selecionados seis lotes de  $18\text{ m}^2$  distribuídos de forma a representar as características fisiográficas da bacia, nos quais se fez injeções de trítio para acompanhar a evolução nuvem do traçador infiltrando no solo ao longo do tempo (Drumond, *et al.*, 2001).

O terceiro projeto feito pelas equipes do CDTN e da UFMG, no mesmo local, estudou o processo de formação de escoamentos utilizando características naturais das águas, como a condutividade elétrica e os isótopos estáveis oxigênio-18, deutério e trítio como traçadores. Durante o período de estiagem, em agosto de 2006, foram coletadas amostras de água em 24 pontos distribuídos na bacia, em cada um dos pontos foram coletadas seis amostras, tendo em vista a determinação de parâmetros:

Físico-químicos (pH, Condutividade, Alcalinidade à fenolftaleína, Alcalinidade à indicador misto, Dureza total,  $\text{SiO}_2$  e Sólidos dissolvidos); de íons (Fe, Mn, Mg, Ca, K, Na, Al, Cl,  $\text{NO}_3^-$ , e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) e; de isótopos ( $^{18}\text{O}$  e Trítio). Essa determinação foi feita para se identificar a origem da condutividade elétrica nas águas da bacia como o principal parâmetro utilizado na separação de escoamentos (Drumond & Nascimento, 2007).

Entre 2010 e 2012 foram realizadas as atividades referentes ao projeto NEEBH – Núcleo de Estudos Experimentais em Bacias Hidrográficas. O objetivo foi propiciar a integração e conjunção de universidades, centros de pesquisa, empresas públicas e privadas, em pesquisas básicas e aplicadas nas bacias hidrográficas das diferentes regiões de Minas Gerais. Durante o desenvolvimento das atividades do projeto NEEBH pela equipe do CDTN, foram levantados alguns parâmetros físicos da morfologia local, de forma a subsidiar a aplicação de modelos hidrossedimentológicos para a simulação de propagação de descargas líquidas e sólidas. Para tal, instalou-se no local uma estação fluviométrica convencional e foi efetuado um levantamento topo batimétrico de seções transversais em um trecho do Ribeirão Serra Azul. Dentro das técnicas de traçadores o  $^{99}\text{Tc}$  foi usado para o estudo da dinâmica de sedimento fino em suspensão e da água que o transporta, visando

avaliar a influência de zonas mortas do trecho do Ribeirão Serra Azul na propagação da lama em suspensão (Ferreira, *et al.*, 2012).

Ao final de 2012, no escopo do Edital Universal CNPq/MCTI – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico / Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, foi aprovada a execução do projeto intitulado “Estudos hidrossedimentológicos na sub-bacia do Córrego Mato Frio – Bacia Representativa de Juatuba”, no horizonte 2013-2015. Neste novo projeto, as equipes do CDTN e UFMG estudaram a dinâmica de sedimento fino em suspensão e da água que o transporta utilizando traçadores radioativos artificiais e fluorescentes à montante do reservatório Serra Azul da COPASA (Ferreira, *et al.*, 2015).

Tendo em vista os exemplos citados e apesar da rejeição pública que existe na sociedade frente às atividades do setor nuclear, esta se encontra presente em inúmeras áreas da atividade humana, inclusive industrial, ambiental e médica. Portanto, o uso de traçadores radioativos em diversos estudos nas áreas de hidrologia e sedimentologia constitui-se em valiosa ferramenta. Sua utilização propicia a realização de pesquisas de caráter não destrutivo, que contribuem para um melhor entendimento associados à hidrossedimentologia. Este tipo de pesquisa é bastante relevante no Brasil, visto que muitas vezes pesquisadores do País usam em seus trabalhos valores de referência internacionais, devido à ausência de pesquisas correlatas nacionais.

#### **4.5. O uso do radônio como traçador para conhecimento das interações de águas subterrâneas e de superfície**

Os isótopos que estão presentes naturalmente na hidrosfera / atmosfera podem ser chamados de traçadores isotópicos ambientais. Ou, quando são aplicados intencionalmente à água para investigações específicas, são chamados traçadores isotópicos artificiais. Contudo, os traçadores isotópicos ambientais são os mais recomendados para o uso em hidrologia (Giap, 2003).

O *Australian Journal of Earth Sciences* publicou em 2009 o artigo “*Surface water and groundwater: understanding the importance of their connections*” (Baskaran, *et al.*, 2009), onde os autores afirmam que as “águas subterrâneas e superficiais são hidraulicamente ligadas em muitas paisagens e uma melhor compreensão de sua conectividade é fundamental para a gestão eficaz dos recursos hídricos”. Destacam também que os traçadores ambientais são uma ferramenta útil para estudar essa interação entre águas subterrâneas e superficiais. Neste artigo discutem-se os resultados do uso de íons, isótopos

estáveis de deutério ( $^2\text{H}$ ) e oxigênio ( $^{18}\text{O}$ ) e o isótopo radioativo do radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) como traçadores ambientais para entender melhor as interações de água subterrâneas e de superfície na área de drenagem do rio Border, Austrália.

Nesse estudo as amostragens de água subterrânea e superficiais foram feitas entre novembro e dezembro de 2004 para coincidir com o período chuvoso da região. Os isótopos estáveis da água ( $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$ ) e o isótopo radioativo ( $^{222}\text{Rn}$ ) foram analisados pelo CSIRO *Land and Water Laboratory*, situado em Adelaide. Pode-se inferir que, devido ao período escolhido para coleta das amostras de água para análise de  $^{222}\text{Rn}$ , o período chuvoso, a variação nas concentrações de radônio (que variaram entre 0,11 e 0,39  $\text{Bq.L}^{-1}$ ) foram baixas. Haja vista que o transecto longitudinal de medições de concentração de radônio na água do rio indicou que não há nenhuma contribuição para transmitir fluxo de águas subterrâneas.

No entanto, os resultados da amostragem hidroquímica e isótopo ambiental indicaram que a área superior do rio está ligada e ativamente recarregada pelo que foi chamado de quase-corrente aluvial rasa do aquífero. Usando os dados de isótopos ambientais, também foi demonstrado que a recarga dos aquíferos aluviais por água de superfície ocorre por infiltração, com recarga difusa durante eventos de precipitação mais à montante do rio. Esta informação é útil para uma melhor compreensão da natureza e extensão dos processos hidrogeológicos na interface rio-aquífero e suas ligações com os processos biogeoquímicos e, finalmente, nas políticas de outorga de uso da água.

Chanyotha e colaboradores (2010) desenvolveram o estudo *“Experience in using radon and thoron data to solve environmental and water problems”* que teve como objetivo introduzir o torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) para a detecção da exfiltração de águas subterrâneas nos canais de Bangkok. Eles aproveitaram estudos anteriores realizados pelo grupo usando a detecção do radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) e condutividade das águas subterrâneas como traçadores, sugerindo que há águas subterrâneas rasas exfiltrando nos canais artificiais nos arredores de Bangkok. Os autores executaram os levantamentos em medições contínuas de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  utilizando o detector RAD-7 fabricado pela DurrIDGE (DurrIDGE, 2015). Eles sugerem que as fontes de torônio encontradas indicam o ponto de descargas de águas subterrâneas com bastante precisão. Além disso, a água subterrânea mostrou ser uma via importante de contaminação de nutrientes para as águas de superfície dos canais e a detecção do torônio melhora a resolução da localização desses pontos de contaminação.

Somashekar & Ravikumar (2010), com o trabalho *“Radon concentration in groundwater of Varahi and Markandeya river basins, Karnataka State, India”*, investigaram as interações

entre águas superficiais subterrâneas, através das medidas de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) feitas com o uso do RAD-7 em locais selecionados nas bacias dos rios Varahi e Markandeya. Os autores justificam que o monitoramento da qualidade da água potável é um importante fator dos estudos de saúde pública e a estimativa do radônio existente tem o objetivo de conscientizar as pessoas que residem nessas áreas sobre os riscos de ingestão de radônio dissolvido. Foram definidos 16 e 14 pontos de inspeção na área de influência da bacia dos rios Varahi e Markandeya respectivamente, e efetuada a amostragem de água durante a temporada de pós-moção – período equivalente estação seca – do ano 2008. Os poços foram purgados através de bombeamento por 10 minutos para garantir a amostragem. Toda a água amostrada foi coletada em garrafas com capacidade de 40 e 250 mL, encaminhadas para laboratório onde foi feita a degasagem para medida de radônio usando o kit para água do equipamento RAD-7 (Durrige, 2015).

O estudo mostrou que a concentração de radônio em algumas das amostras de água subterrânea, a partir do estudo das duas bacias era próxima ou ligeiramente superior ao valor máximo do nível considerado contaminante pela EPA. Contudo, “até mesmo a dose efetiva por litro e os valores anuais de dose efetivas foram variados no que diz respeito ao aumento da concentração de radônio e foram significativamente mais baixos do que o relatório UNSCEAR, a OMS e a Norma CNEN-NN-3.01 recomendam como limite para o indivíduo do público, que é de  $1 \text{ mSv.ano}^{-1}$ ”. Portanto, o risco de contaminação por ingestão de radônio dissolvido na água foi considerado baixo (UNSCEAR, 2000; CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2011).

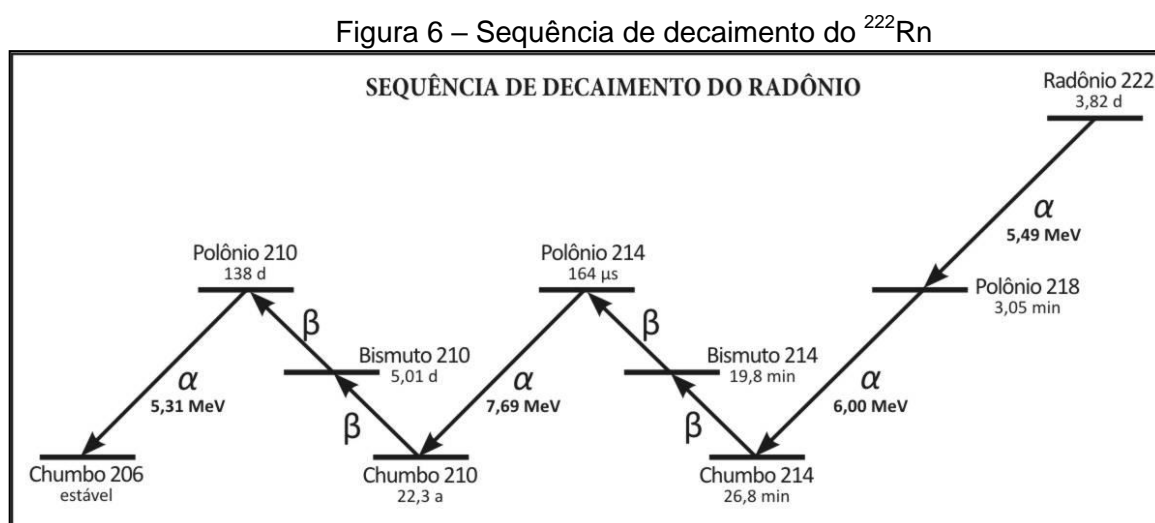
Os autores Singh *et al.* (2010) publicaram um estudo feito no noroeste do Himalaia, Índia, onde eles monitoraram continuamente o gás do solo e diariamente a água subterrânea quanto à concentração de  $^{222}\text{Rn}$  para verificar a correlação das anomalias do radônio em relação às atividades sísmicas nessa região. O monitoramento do gás de solo foi feito com a sonda Barasol, fabricada pela Algade France, e da água subterrânea com o RAD7.

#### **4.6. Detector de radônio RAD-7**

O RAD7 é um dos equipamentos utilizados para detectar o radônio em água. Neste equipamento há um detector alfa de estado sólido, ou seja, é um semicondutor que converte a radiação alfa em sinal elétrico. Este tipo de detector pode ser usado para detecção de partículas carregadas e sua principal propriedade é que possui ótima resolução para fazer distinção em radiações nucleares de energias muito próximas (Aramburu & Bisbal, 1994).

Cada núcleo de  $^{222}\text{Rn}$ , eventualmente decai na sequência:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  e etc. até chegar à estabilidade com o  $^{206}\text{Pb}$ . Em cada transformação neste decaimento (Figura 6), o núcleo emite radiações características: partículas alfa, beta, raios gama, ou combinações destes. O RAD7 foi projetado para detectar apenas partículas alfa (Durridge, 2015).

Cada partícula dessas que atravessa o semiconductor produz pares de elétron-lacuna em abundância de forma direta ou indireta. Na forma direta a partícula alfa ao interagir com os elétrons, transfere energia suficiente para que ele saia da banda de valência e ocupe lugar na banda de condução criando uma correspondente lacuna na banda de valência. A forma indireta ocorre quando a partícula alfa transfere energia suficiente para criar elétrons altamente energéticos – raios delta, que perdem sua energia produzindo pares de elétron-lacuna. À medida que essas interações vão ocorrendo, geram-se impulsos elétricos em que se medem as energias e então, identifica-se o tipo de elemento que as produziu (Durridge, 2015; Aramburu & Bisbal, 1994).



Fonte: adaptado de Durridge (2015)

No interior da célula de detecção do RAD7, quando um núcleo de  $^{222}\text{Rn}$  decai para  $^{218}\text{Po}$  deixa-o como um íon carregado positivamente. O campo elétrico dentro da célula faz esse íon se aderir à parede do detector. Quando o  $^{218}\text{Po}$  – meia vida de 3,05 min. – decai sobre a superfície ativa do detector, a sua partícula alfa tem 50% de probabilidade de entrada no detector produzindo um sinal elétrico proporcional à energia da partícula alfa. Os decaimentos subsequentes do mesmo núcleo que produzem partículas beta, ou mesmo as partículas alfa de diferentes energias, que apesar de terem os espectros apresentados em

gráfico, não são consideradas nas contagens do  $^{222}\text{Rn}$ . Assim, o RAD7 amplifica, filtra e classifica os sinais de acordo com a sua energia (DurrIDGE Radon Instrumentation, 2015).

A atividade de uma amostra de substância radioativa é o número de átomos que se desintegram por unidade de tempo. Quanto maior a atividade maior é a quantidade de átomos radioativos presentes na amostra. A unidade de atividade no SI – Sistema Internacional é o *becquerel* (Bq) onde  $1\text{Bq} = 1$  desintegração por segundo (1dps), mas frequentemente se usa a unidade *curie* (Ci),  $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{dps} = 3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$  (Aramburu & Bisbal, 1994).

O detector RAD7 opera com um kit para análise de radônio em água, conhecido como RAD H<sub>2</sub>O. Esse acessório permite medir radônio na água em uma faixa de concentração de menos de  $37 \times 10^{-5} \text{ kBq.L}^{-1}$  para mais de  $14,8 \text{ kBq.L}^{-1}$ . O equipamento é portátil e é alimentado por bateria. Pode-se ter uma leitura precisa de radônio na água após análise de 30 minutos com uma sensibilidade que corresponde ou excede a de métodos de cintilação líquida (DurrIDGE Radon Instrumentation, 2016).

#### **4.7. O uso de traçadores fluorescentes para medição da vazão do curso de água**

Para se medir a vazão de um curso de água utilizam-se também os traçadores fluorescentes que são bem adequados aos estudos hidrológicos e sedimentológicos. Isto ocorre pelo fato destes não serem adsorvidos pelos sedimentos em suspensão, pelo material sólido e pela vegetação presente no leito dos cursos de água ou nas suas margens. Além disso, esses traçadores são altamente solúveis, facilmente detectáveis e muito pouco degradáveis (Drumond, 2004).

Pode-se fazer uma inferência de que o comportamento da fluoresceína, também conhecida como uranina, é análogo ao da rodamina WT (water tracer) e relacionar ao que escreveu PLATA-BEDMAR, 1972 *apud* Bandeira (2004): “a injeção instantânea de rodamina WT possibilita, além da obtenção da curva de passagem que dá informações sobre a dispersão e a advecção da pluma formada, se calcular a vazão líquida na estação de coleta”. O gráfico da curva de passagem é obtido pela concentração de traçador medida em função do tempo de passagem desse traçador. O interesse maior do estudo é o cálculo da vazão e o autor apresenta a fórmula (1) para a obtenção dessa vazão.

$$Q = \frac{M}{\int c dt} \quad (1)$$

Onde:

$Q$  = vazão ( $m^3$ /segundo);

$M$  = massa de traçador injetada;

$C$  = concentração do traçador na água.

A expressão no denominador da fórmula (1) representa a área abaixo da curva de passagem sem normalização (Bandeira, 2004).

A quantidade de traçador a ser injetado deve ser dimensionada conforme a capacidade de leitura do fluorímetro evitando-se sua saturação. O fluorímetro é um equipamento que mede a fluorescência do traçador. A quantidade de traçador injetado, o processo de calibração e o tempo gasto durante a passagem da nuvem de traçador são parâmetros que definem a vazão do curso d'água (Albillia Co, s.d.).

#### **4.8. Monitor de radiação gama**

Para monitorar a radiação gama ambiente, há vários instrumentos, entretanto um do tipo "scanner" de radiação espectral é mais eficiente devido a sua forma contínua de medição associada ao georreferenciamento simultâneo dos pontos medidos.

O espectrômetro modelo AT6101C, fabricado pela Atomtex (Figura 7) opera conectado, via Bluetooth, a um *handheld PC*, HPC NAUTIZ X7, produzido pela Getac, que é o responsável pela interpretação imediata dos dados recebidos e o seu armazenamento através do software ATAS Scanner Mobile. Sua operação consiste em calibrar o detector gama com padrão acessório, transitar pela área em estudo e coletar os dados registrados.

O equipamento tem peso estimado de sete quilos, fica inserido em uma mochila, e tem a capacidade de detectar a presença de nêutrons, radiação gama e, quando encontra uma fonte de radiação, identifica a composição do nuclídeo (ATOMTEX, 2017).

A detecção de radiação gama é feita através de um cintilador inorgânico a base de cristal de iodeto de sódio ativado pelo tálio denominado NaI(Tl) e a detecção de nêutrons usa dois contadores proporcionais em um moderador de polyetileno (Aramburu & Bisbal, 1994; ATOMTEX, 2017).

Após a coleta de dados, os arquivos são transferidos para um PC e compilados através do software. Após o processamento desse software, o arquivo que contém as informações dos pontos fica gravado com extensão WPT que é reconhecido pelo MS Office Excel 2007.

Uma das vantagens do uso do Scanner AT6101C é a capacidade de armazenamento dos dados de dose de radiação ( $\mu\text{Sv/h}$ ) juntamente com a referência geográfica em UTM (WGS84), facilitando o trânsito de dados em softwares do tipo SIG e a visualização desses pontos no Google Earth.

Figura 7 – "Backpack" Espectrômetro portátil de radiações.



Fonte: imagem disponível em <http://devices.wolfram.com/devices/atomtexas-at6101c-spectrometer.html>, acesso em julho de 2016.

## 5. METODOLOGIA

A Bacia Representativa de Juatuba, MG, tem sido o cenário de vários estudos hidrológicos desde que o Governo Brasileiro, no contexto do Decênio Hidrológico Internacional promovido pela UNESCO entre 1965 e 1974, através do antigo DNAEE, resolveu escolher esta bacia, sob a ótica hidrológica, para representar a região central do Estado de Minas Gerais. Essa escolha se deu pelo fato dessa bacia ter formação geológica, relevo, cobertura vegetal e formas de ocupação semelhantes à maioria das bacias situadas na região central do Estado (Drumond, 2004). A escolha dessa bacia representativa se baseou na experiência do grupo envolvido em pesquisas nesse local, bem como, a grande quantidade de dados decorrentes de outros estudos existentes.

Ao final de 2013 foi aprovado o fomento da FAPEMIG para o projeto de pesquisa intitulado “Aplicação de Técnicas de Traçadores para Estudo da Inter-Relação entre as Águas Subterrâneas e Superficiais na Bacia de Juatuba”. Com os recursos oriundos deste projeto aliado à infraestrutura e apoio técnico do pessoal do CDTN e da UFMG foi possível desenvolver as atividades no escopo desta pesquisa.

Como primeira tarefa deste projeto foi feito um levantamento das pesquisas realizadas na área e, diante desses estudos, observaram-se as bases para a escolha do local para este novo estudo, tais como, morfologia adequada, histórico de chuvas, vazões pretéritas, ocupação do solo e geologia. Após a eleição de dois locais foi feita uma consulta a alguns moradores da região para verificar o acesso a esses locais. Feita a escolha partiu-se para definição dos equipamentos adequados à execução dos experimentos nesse local, de forma a satisfazer um método de análise quantitativa das amostragens.

### 5.1. Área de estudo

O córrego da Matinha localizado na área rural da cidade de Itaúna, MG foi o local definido para execução dos estudos.

#### 5.1.1. Aspectos geográficos

A bacia de Juatuba está inserida no Alto Rio São Francisco e drena uma área de 442 km<sup>2</sup>. Distante cerca de 60 km de Belo Horizonte, a bacia de Juatuba abrange os municípios de Mateus Leme, Igarapé e Itaúna, todos no oeste de Minas Gerais, Brasil. Os principais cursos

hídricos que formam o rio Juatuba são os ribeirões Serra Azul e Mateus Leme, que possuem área de drenagem de 265 e 155 km<sup>2</sup> respectivamente (Drumond, 2004).

A sub-bacia do córrego Mato Frio possui uma área aproximada de 13,5 km<sup>2</sup>, e esse córrego se une ao córrego Freitas para formar o ribeirão Serra Azul a montante do reservatório homônimo administrado pela COPASA.

A microbacia do córrego da Matinha possui área aproximada de 1,7 km<sup>2</sup> (Figura 8) e se insere na sub-bacia do córrego Mato Frio.

O córrego da Matinha mede aproximadamente 2,2 km de comprimento da nascente ao encontro com o córrego Mato Frio e se localiza em uma área que dista cerca de 10 km a leste do centro urbano da cidade de Itaúna, próximo à divisa com os distritos de Serra Azul e Azurita.

O censo demográfico 2010, feito pelo IBGE, aponta uma população rural de 5.012 pessoas, mas foram identificados apenas cinco moradias instaladas na área da microbacia do córrego da Matinha.

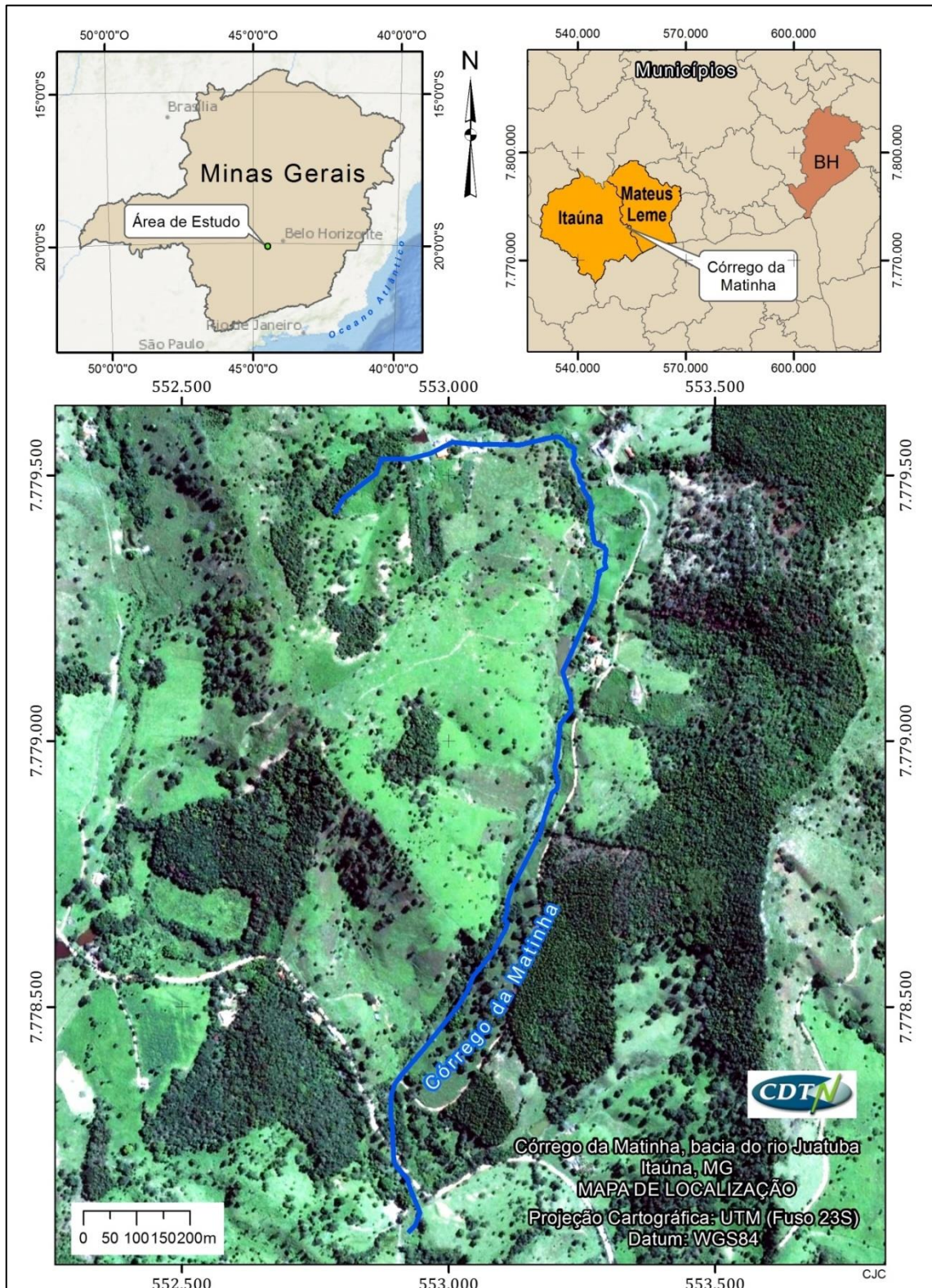
Sua paisagem é consonante com a tipologia de ambientes, classificada como Tipo 2<sup>1</sup>, cuja área já foi antropicamente alterada, mas ainda apresenta ambientes ecológicos originais relativamente mantidos (Sánchez, 2008). Essa tipologia fica evidenciada quando se identificam áreas de pastagens seguidas de matas secundárias presentes no local (Figura 8).

O clima na área em estudo é caracterizado por um verão tropical, com temperaturas médias mensais acima de 18°C, e por uma estação hibernal seca de 4 a 6 meses (Drumond, 2004).

---

<sup>1</sup> Os Tipos Básicos de Ambientes foram classificados como: 1-Ambientes de uso antrópico intensivo; 2-Ambientes de uso antrópico extensivo; 3-Ambientes conservados; 4-Tipologias especiais de ambiente. A Tipologia de ambientes faz parte do Manual para Licenciamento Ambiental do IBAMA, 2001 descrito em (Sanches, 2001).

Figura 8 – Mapa de localização do córrego da Matinha.



Fonte: elaborado pelo LABGEO do CDTN em junho de 2016

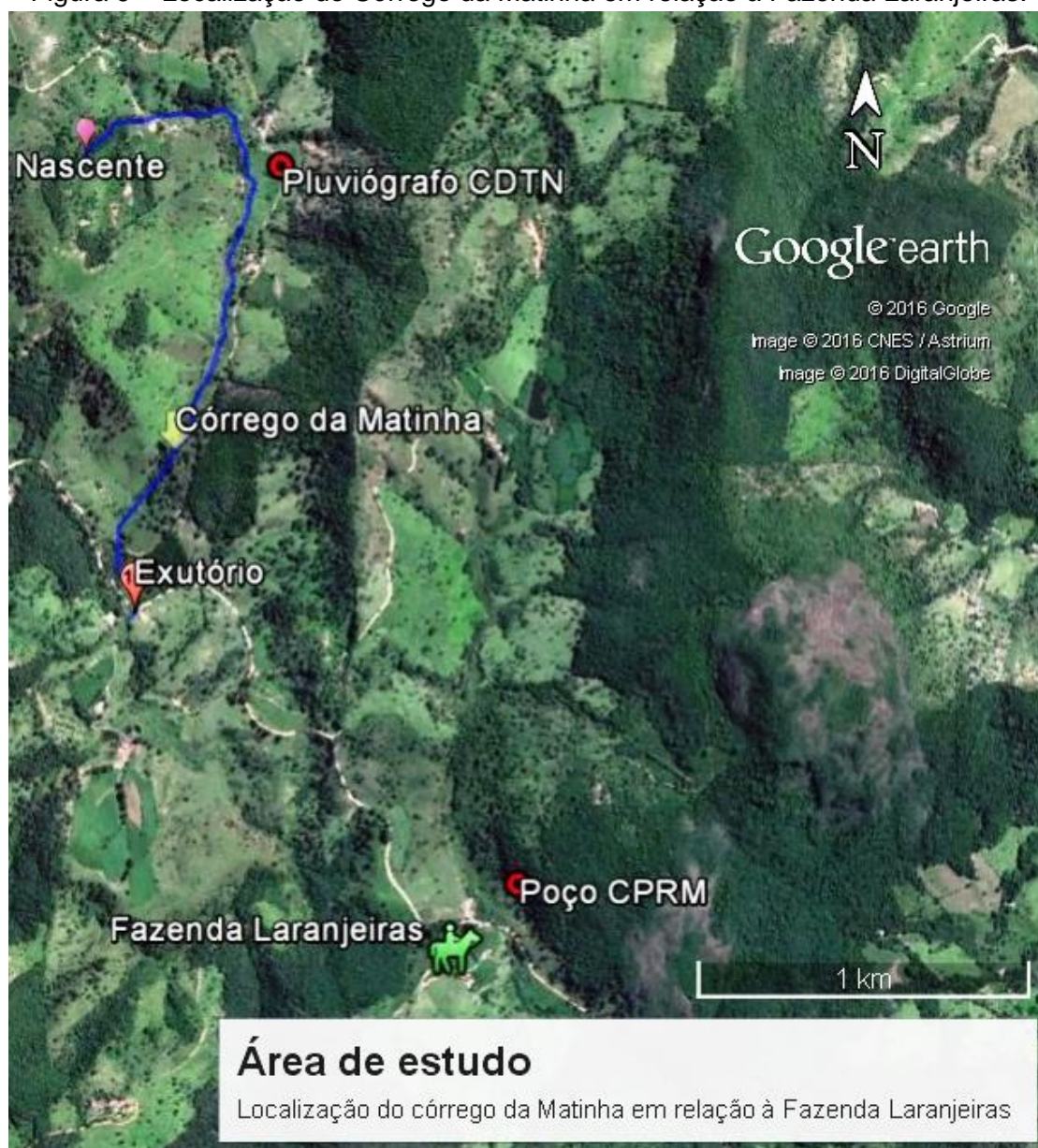
### 5.1.2. Aspectos geológicos e geomorfológicos

A área da Bacia Representativa de Juatuba se encontra adjacente ao Quadrilátero Ferrífero, margeando o seu esporão noroeste, que nessa região se chama Serra Azul – também conhecida como Serra do Itatiaiuçu. De acordo com o mapeamento geológico executado pelo IGA, a área drenada pelo ribeirão Serra Azul e seus tributários se constitui de rochas do Arqueozoico, do Proterozoico Inferior-Médio e do Cenozoico, em consonância com a estratigrafia proposta para o Quadrilátero Ferrífero em um trabalho realizado, em 1961, pelo DNPM em conjunto com o United States Geological Survey – USGS, Simmons, 1968 *apud* Drumond (2004).

A microbacia do córrego da Matinha se encontra embasada no Complexo Metamórfico Divinópolis em uma região onde o aquífero é predominantemente fissural (CPRM, 2009). Devido a pouca profundidade do córrego, credita-se a perenização de suas águas aos aquíferos livres ou rasos (CETEC, 1983).

Existe um piezômetro com profundidade de 19 m instalado na sub-bacia do córrego Mato Frio, na Fazenda Laranjeiras que é operado pela CPRM. A ficha técnica desse poço de número 3100017234 apresenta o perfil estratigráfico dessa instalação e mostra que até quatro metros de profundidade o solo é argilo-arenoso de coloração marrom, havendo uma fração areia fina, com eventuais fragmentos de quartzo seguido de material argilo arenoso de coloração amarela esbranquiçada composto por quartzo e feldspato, que vão de quatro até dez metros de profundidade. De dez a dezenove metros tem-se rocha alterada de coloração amarelo acinzentado composta por argila e quartzo (ver ANEXO A – Perfil litológico do poço, Fazenda Laranjeiras).

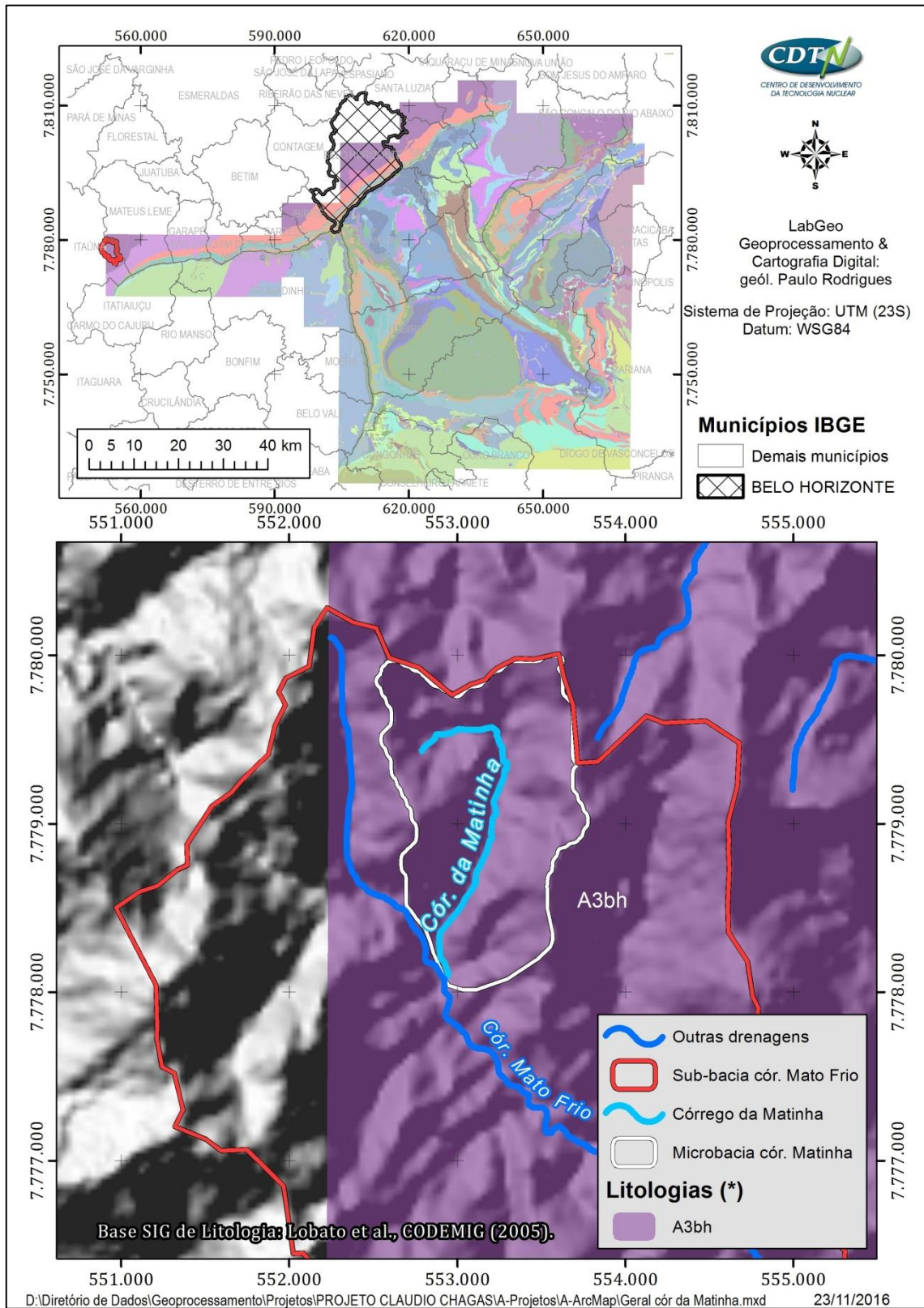
Figura 9 – Localização do Córrego da Matinha em relação à Fazenda Laranjeiras.



Fonte: adaptado de Google Earth Pro

A geologia verificada no Mapa Geológico Igarapé (Lobato, et al., 2005) em escala 1:50.000 (ver ANEXO B – Mapa geológico de Igarapé) apresenta predominância de gnaiss, rocha granítica cinza, equigranular a ligeiramente porfirítica, composta de plagioclásio, quartzo, ortoclásio, moscovita, biotita e epidoto; minerais máficos, concentrados em faixas pouco visíveis. Esse embasamento Mesoarqueano é do Supergrupo Rio das Velhas no Complexo Belo Horizonte (Figura 10).

Figura 10 – Mapa litológico do Córrego da Matinha.



Fonte: elaborado pelo LABGEO do CDTN em novembro de 2016.

### 5.1.3. Relevo e vegetação

A microbacia do córrego da Matinha apresenta um relevo predominantemente Forte-ondulado e Ondulado (Quadro 2), segundo a classificação da EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, que chega até Forte-montanhoso, embora a região de estudo não apresente declividades maiores que 70%.

Quadro 2 – Classificação do relevo.

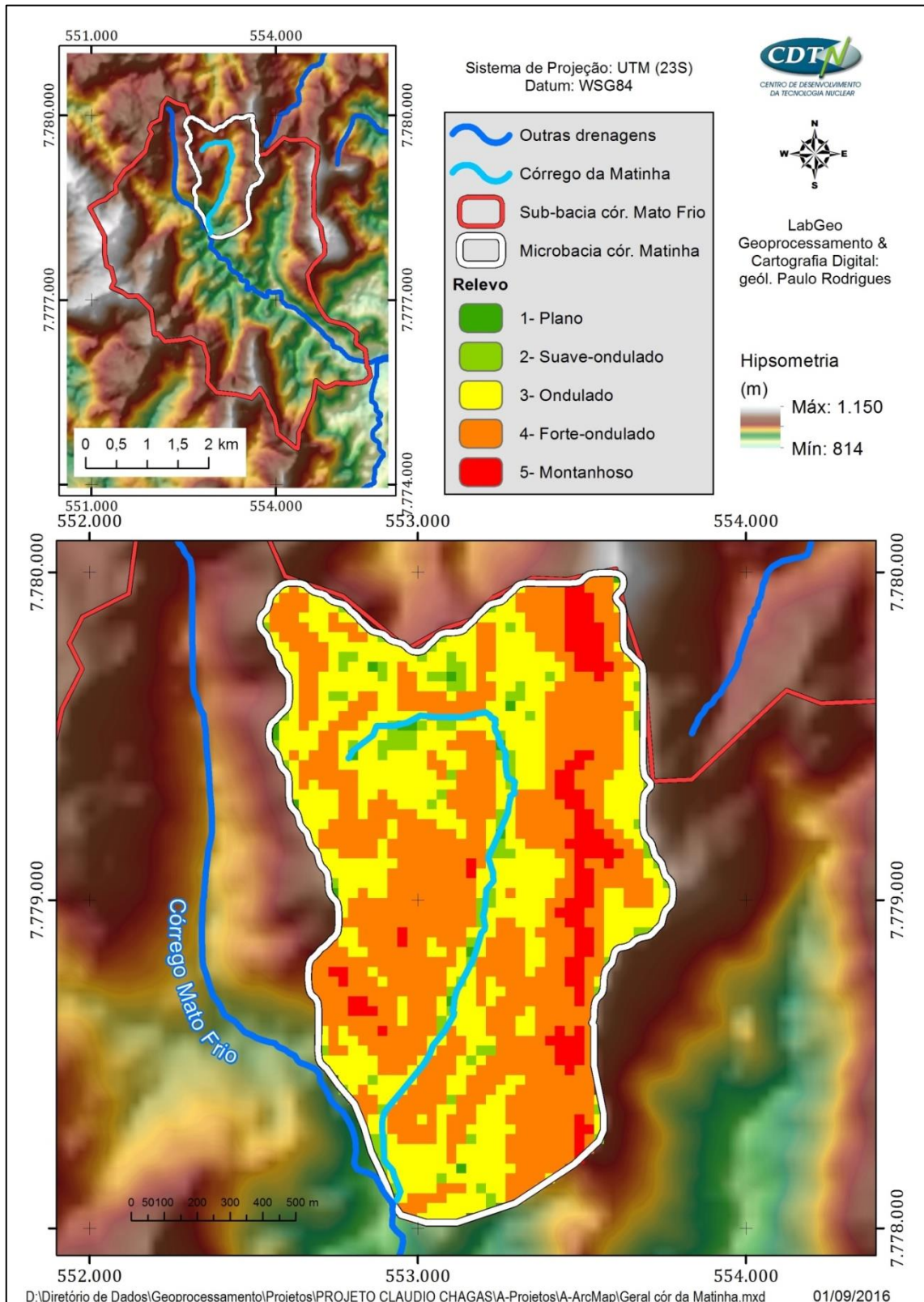
<b>Declividade (%)</b>	<b>Relevo</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
0-3	Plano	15.472	0,9
3-8	Suave-ondulado	96.272	5,6
8-20	Ondulado	625.766	36,8
20-45	Forte-ondulado	871.602	50,7
45-70	Montanhoso	110.025	6,4
<b>TOTAL</b>		<b>1.719.137</b>	<b>100</b>

Fonte: classificação feita conforme documento EMBRAPA-SNLCS (1979).

Até então composto por águas cristalinas, o córrego da Matinha nasce na base de uma encosta de rastejamento do tipo convexo – em forma de anfiteatro, conforme classificação de Troeh (1965) *apud* Casseti (2005) para modelos geométricos de vertentes, a uma altitude de 950m acima do nível do mar. Saindo dessa base pantanosa ele forma meandros por entre lagoas artificiais, áreas de pastagens e matas secundárias que misturam resquícios de mata atlântica, cerrado e alguns eucaliptos adultos que foram plantados no passado como uma breve tentativa de prover as indústrias siderúrgicas que se instalaram na região centro oeste. O Bioma, segundo o IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, está representado pelo Cerrado e Mata Atlântica. A 1500 metros da nascente, em elevação de 930 m, o córrego da Matinha desliza por uma queda d'água de aproximadamente trinta metros de altura formando degraus de granitos gnaisse bandados aflorados, depois se encaixa sulcando o solo de outra área de pastagem. Passa por baixo de uma estrada de terra pela manilha, caminha do lado esquerdo de uma vertente média alta, com declividade aproximada de 30%, até se espalhar em nova planície formando área pantanosa, onde as águas se concentram novamente para usar uma manilha que atravessa outra estrada e se encontra finalmente com a margem esquerda do córrego Mato Frio, numa altitude de 888 m.

Como pode ser observado na Figura 11 – Relevo da microbacia do Córrego da Matinha, sua linha de contorno, de forma curiosa, lembra um ponto de interrogação.

Figura 11 – Relevo da microbacia do Córrego da Matinha.



Fonte: elaborado pelo LABGEO do CDTN em setembro de 2016

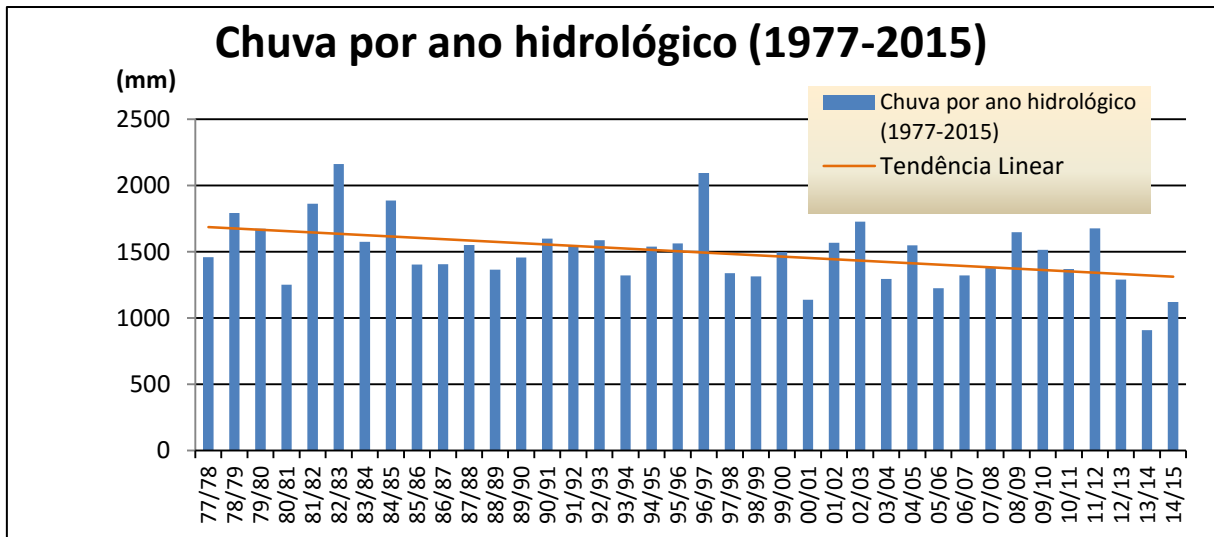
#### 5.1.4. Aspectos climáticos durante os experimentos

O período de coleta de dados coincidiu com um período de baixa pluviosidade na região, como se pode observar pelas chuvas registradas entre os anos hidrológicos<sup>2</sup> 1977-2015 na estação Fazenda Laranjeiras, num. CPRM 02044041 (Figura 12), quando o acumulado no período – 2014/2015 – ficou abaixo da linha de tendência linear. Nota-se uma tendência de queda na pluviosidade nos últimos vinte anos, excetuando-se os anos hidrológicos 82/83 e 96/97, quando a chuva ultrapassou os 2000 mm.

Esta estação foi instalada pelo DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, hoje de propriedade da ANA – Agência Nacional de Águas é operada pela CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais e mantém pluviômetro instalado na Fazenda Laranjeiras (Figura 9) para representar a pluviosidade da sub-bacia do córrego Mato Frio.

A estação denominada Fazenda Laranjeiras está distante cerca de 2500 metros do pluviógrafo instalado pelo CDTN na microbacia do córrego da Matinha.

Figura 12 – Histograma da chuva anual na Estação Fazenda Laranjeiras.



Fonte: Hidroweb (ANA, 2016)

<sup>2</sup> Anos hidrológicos – Período de 12 meses começando no início da estação de chuvas, até o fim da estação seca seguinte (ANA, 2015). Neste caso considerou-se de Outubro a Setembro do ano seguinte.

## 5.2. Coleta de amostras

O processo de coleta de amostras de água para medidas de  $^{222}\text{Rn}$  no córrego da Matinha foi evoluindo conforme as dificuldades encontradas a partir das idas a campo, doravante denominadas “campanhas”.

### 5.2.1. Coleta com seringa

Em cada ponto se coletou água lentamente no fundo do leito e próximo ao talvegue (Figura 13). Nas primeiras duas campanhas para coleta de água usou-se uma mangueira flexível fabricada pela Tygon® conectada a uma seringa plástica hipodérmica de 100 mL. Eram extraídos 500 mL de água em cinco etapas de 100 mL cada e injetados dentro do frasco de vidro evitando o contato direto com o ar e a formação de bolhas de ar – o gás de  $^{222}\text{Rn}$  escapa facilmente pelo contato com o ar, fazendo a água transbordar, renovando o volume acondicionado para análise da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  do ponto amostrado. Os frascos de vidro tinham volumes de 250 e 275 mL, incolores e na cor âmbar respectivamente. Cuidou-se de vedar os frascos a fim de minimizar a quantidade de ar entre o nível da água coletada e a tampa do frasco (Figura 14). Identificou-se cada um deles com data, hora e local da amostragem, auxiliado pelo registro no GPS e pelo caderno de campo.

Figura 13 – Coleta com seringa.



Fonte: acervo do autor.

Figura 14 – Acondicionamento da amostra.



Fonte: acervo do autor.

### 5.2.2. Coleta com bomba peristáltica

A partir da quarta visita a campo usou-se uma bomba peristáltica de baixa vazão no lugar da seringa, que auxiliou na redução dos tempos de coleta.

Foi usada uma bomba peristáltica Solinst modelo 410 de fluxo reversível e baixa vazão (Figura 15). Ela é capaz de operar de 120 mL/min a 3500 mL/min, no entanto a velocidade média usada para coleta foi de 1000 mL/min. Essa baixa velocidade foi importante para evitar a formação de bolhas no recipiente de coleta. As dimensões da bomba são 33 x 13 x 17 cm e pesa 3,6 kg. Durante as coletas a bomba foi acoplada a uma bateria veicular de 12v.

Figura 15 – Bomba peristáltica.



Fonte: imagem disponível em <https://www.geotechnical.net/Merchant147/peristaltic-pump/56-peristaltic-pump.html>

Seu funcionamento é simples, a operação mecânica peristáltica usa dois rolos rotativos para despressurizar a tubulação de silicone, criando assim um vácuo que desloca o fluxo de água para a direção determinada sem criar bolhas dentro do sistema de sucção.

### 5.2.3. Tubo Coletor

A utilização da bomba com o tubo coletor foi uma evolução que aperfeiçoou o processo de coleta de água.

Devido à dificuldade para fazer coleta de água em alguns trechos do córrego, foi desenvolvido um instrumento capaz de auxiliar nas coletas em locais de maior profundidade e ou com muita vegetação, que foi denominado Tubo Coletor (Figura 16). Trata-se de um tubo PVC de 150 mm de diâmetro por 780 mm de comprimento onde uma das extremidades foi perfurada até 110 mm com centenas de furos de 8 mm de diâmetro. Essa extremidade tornou-se o fundo do tubo, sendo envolta com tela de aço de abertura de 2 mm na lateral perfurada e na abertura do fundo. Fixou-se essa tela com silicone na cor branca. A 250 mm dessa extremidade foi feito um rasgo oblongo de 120 x 50 mm que facilita o transporte e a possível introdução da mangueira de sucção.

Figura 16 – Tubo coletor.



Fonte: acervo do autor.

Para fazer a coleta com o auxílio desse instrumento basta posicionar o fundo do tubo no talvegue do córrego e introduzir a mangueira de sucção através do topo ou através do furo lateral até aproximadamente um centímetro da tela do fundo, aguardar até que os sedimentos em suspensão se dissipem e promover a sucção para coleta da amostra.

Esse instrumento foi utilizado nas campanhas que ocorreram entre setembro de 2015 e maio de 2016 para coleta de água.

### 5.3. Medidas de $^{222}\text{Rn}$ em água

O equipamento RAD7 fabricado pela Durrige Company usado para as medições de radônio e torônio pelos autores Chanyotha, *et al.* (2010) e radônio por Somashekar & Ravikumar (2010) é o mesmo utilizado nesse estudo para as medições de radônio no córrego da Matinha.

Testes preliminares realizados no LRN – Laboratório de Radioatividade Natural do CDTN, bem como, as informações fornecidas pelo Tecnologista Zildete Rocha, determinaram o uso do detector de radônio RAD7 (Figura 17) para as atividades desse estudo, visto que o mesmo possui boa sensibilidade para leituras de radônio em água quando comparado ao AlphaGUARD (outro detector de radônio que foi cogitado para uso).

A montagem do circuito utilizado contou com o frasco de 250 mL, sistema de secagem a base de sulfato de cálcio conhecido como Drierite, um monitor contínuo e impressora portátil. O equipamento já foi utilizado pelos técnicos do CDTN em outros trabalhos e o manual de operação apresenta as informações adicionais necessárias a sua operação (Durrige Radon Instrumentation, 2015).

Figura 17 – Kit RAD H2O conectado ao RAD7.



Fonte: imagem disponível em [http://www.durrIDGE.co.uk/products\\_rad\\_h2o.shtml](http://www.durrIDGE.co.uk/products_rad_h2o.shtml)

Analisaram-se em campo as primeiras amostras coletadas em cada campanha usando o detector de RAD7, conectado ao kit H2O (Figura 17), e o restante das análises ocorreram no LRN do CDTN.

Todas as leituras dessas análises tiveram os valores medidos corrigidos em função da meia vida do  $^{222}\text{Rn}$ , que é de 3,82 dias e do tempo decorrido entre a coleta e a leitura da amostra, conforme equações abaixo.

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (3)$$

Onde:

$A(t)$  é a atividade de  $^{222}\text{Rn}$  medida no tempo  $t$ , ou seja, no momento da leitura;

$A_0$  é a atividade inicial de  $^{222}\text{Rn}$  no momento da coleta;

$\lambda$  é a constante de decaimento do  $^{222}\text{Rn}$ ;

$T_{1/2}$  é a meia vida do  $^{222}\text{Rn}$ .

Considerando a capacidade de fuga do gás  $^{222}\text{Rn}$  durante as coletas, os valores mais baixos encontrados nas amostragens em duplicatas foram descartados.

### 5.3.1. Modo de operação

O RAD7 trabalha em baixa umidade, com no máximo 6%, e isto possibilita maior exatidão nos resultados, além da possibilidade de se ler concentrações menores. O RAD7 apresenta duas formas de se medir radônio em águas: GRAB para medidas de amostragens pontuais e SCAN (varredura), no qual se realiza amostragens contínuas. De acordo com o cenário a ser estudado, utilizou-se a funcionalidade GRAB que permitiu fazer análises discretas e, em sua grande maioria, feitas nas dependências do LRN, para que os pontos de descarga ao longo do córrego pudessem ser encontrados.

A funcionalidade GRAB permite que se programem as análises em frascos de diversos volumes, mas já vem programada para frascos de 40 mL e 250 mL cujos protocolos são chamados de Wat40 e Wat250 respectivamente. Utilizou-se neste trabalho o protocolo Wat250.

Para que a análise apresente resultados com baixa incerteza é vital que se limpe a unidade com ar fresco e seco durante cinco minutos. Em seguida, conecta-se a unidade a um circuito fechado de modo que a mangueira de saída se conecte com um tubo dessecante e a saída desse tubo se conecte com a entrada da unidade do RAD7. Desse modo, quando ligado, o ar que sai passa através do dessecante e volta para dentro da unidade. A purga deve ser feita durante dez minutos, em seguida, verifica-se a umidade relativa do ar no monitor da unidade (*display*), se a umidade não estiver abaixo de 6% repete-se a operação de purga.

Após conectar o frasco de 250 mL ao kit RAD H<sub>2</sub>O, conforme Figura 17, dá-se início às leituras através do monitor da unidade usando o protocolo Wat250 na funcionalidade GRAB. Durante 30 minutos o aparelho realiza um ciclo constituído por cinco etapas. Na primeira etapa ocorre uma aeração ou degasagem sob condições controladas e as outras quatro etapas para medir  $^{218}\text{Po}$  apresentando também o desvio padrão de cada leitura (para cada amostra). Ao final do processo, o RAD7 calcula os valores médios de  $^{222}\text{Rn}$  associados à amostra em questão e respectiva incerteza.

Depois da leitura de uma amostra a unidade necessita ser limpa novamente num circuito aberto para eliminar o radônio que se encontra no sistema e para não alterar as próximas

leituras. Mais informações operacionais podem ser encontradas no manual de operação do RAD7 (Durrige, 2015).

#### 5.4. Medidas de vazão

A vazão do córrego da Matinha foi avaliada em alguns pontos nos mesmos trechos onde  $^{222}\text{Rn}$  foi medido. Esta avaliação foi feita com os traçadores fluorescentes rodamina e fluoresceína.

O fluorímetro utilizado neste estudo foi o GGUN-FL30 (Figura 18) fabricado pela empresa suíça *Albillia Company*. É um fluorímetro de campo para escoamento de águas superficiais que pode ser imerso até 50 m de profundidade embora tenha sido utilizado à profundidade média de 0,20 m. Suas medidas são 160 mm de diâmetro e altura de 170 mm.

Figura 18 – Fluorímetro GGUN-FL30.



Fonte: imagem disponível em <http://www.albillia.com/FL30e.html>

O fluorímetro foi conectado através de um cabo de sinal de quatro fios a uma caixa à prova d'água hospedando um *data logger* e uma bateria. O *data logger* forneceu capacidade de potência da bateria, calendário, relógio e armazena os dados recebidos do cabo de sinal como opção, embora, nos experimentos, tenha sido conectado a um notebook através da interface RS232. Essa opção foi usada no intuito de se armazenar os dados ao mesmo tempo em que se acompanhava a passagem da nuvem de traçador.

#### 5.4.1. Modo de operação

Inicialmente fez-se a calibração do fluorímetro em campo e logo depois se iniciou a aquisição de dados para medidas de vazão como se segue (Figura 19):

- Preparou-se soluções de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  dos traçadores fluoresceína e rodamina no laboratório em frascos contendo 50 mL dessa solução e levada para campo, onde o conteúdo de um frasco foi diluído em um balde contendo 4.950 mL de água retirada do córrego em estudo;
- O fluorímetro foi colocado dentro do balde e iniciou-se o processo de calibração que duraram cinco minutos;
- A seguir o fluorímetro foi colocado totalmente submerso no talvegue do curso d'água e o traçador injetado à montante – em quantidade predefinida de acordo com a capacidade de detecção – a uma distância suficiente para ocorrer dispersão homogênea do traçador na água até a seção onde o fluorímetro estava submerso. A posição do detector não é relevante desde que se cumpra a condição básica de uma mistura adequada do traçador com o corpo hídrico (IAEA, 2010). Entre a total submersão e a injeção de traçador é necessário um intervalo de 3 a 5 minutos sem a chegada da nuvem de traçador para que se registre o background do curso d'água;
- Aguardou-se a passagem da nuvem de traçador, que estava sendo acompanhada pelos registros apresentados na tela do notebook acoplado ao fluorímetro até que as leituras de fluorescência apresentassem valores duas vezes o background encontrado no momento da imersão do fluorímetro no talvegue e encerrou-se a aquisição de dados para proceder aos cálculos de vazão.

Figura 19 – Calibração, injeção e leitura com o fluorímetro.



Fonte: acervo do autor.

Em relação à quantidade do traçador a ser injetado fizeram-se testes de saturação do fluorímetro ( $0,144 \text{ mg.L}^{-1}$  para fluoresceína e  $2,8 \text{ mg.L}^{-1}$  para rodamina), tempo de trânsito e distância mínima para ocorrer uma mistura homogênea do traçador com a água no corpo hídrico estudado. Conforme orientação do pesquisador do SEMAM Dr. Rubens Martins Moreira essa distância mínima fica em torno de dez vezes a largura do corpo hídrico. Observou-se que soluções contendo  $50 \text{ mg}$  de fluoresceína ou rodamina seriam suficientes para proceder aos experimentos e as distâncias mínimas variaram de  $10$  a  $15 \text{ m}$  conforme trecho testado.

O cálculo da vazão do curso d'água envolve a quantidade de traçador injetado, o processo de calibração e o tempo gasto durante a passagem da nuvem de traçador. Esse cálculo foi feito pelo software que acompanha o equipamento, denominado FLUO e que se encontra com explicações detalhadas no manual do usuário, onde se podem encontrar também mais detalhes sobre o funcionamento do equipamento (Albillia Co, s.d.).

## 5.5. Levantamento da radiação gama natural

Durante essa pesquisa usou-se o Scanner de radiação espectral – espectrômetro – modelo AT6101C, fabricado pela Atomtex (Figura 7). Esse espectrômetro trabalha conectado, via Bluetooth, a um *handheld PC*, HPC NAUTIZ X7, produzido pela Getac, que é o responsável pela interpretação imediata dos dados recebidos e o seu armazenamento através do software ATAS Scanner Mobile. Após a coleta de dados, que ocorreu na Campanha #7, os arquivos foram transferidos para um PC e compilados através do software ATAS Scanner versão 3.2.4.33. Após o processamento desse software, o arquivo que contém as

informações dos pontos ficou gravado com extensão WPT que é reconhecido pelo MS Office Excel 2007.

Sua operação consistiu em calibrar a sonda gama com padrão acessório fornecido pelo fabricante, transitar pela área em estudo e coletar os dados registrados.

Observa-se aqui que este mesmo equipamento foi utilizado pelos técnicos do CDTN durante os Jogos Olímpicos de 2016 e as Copas das Confederações de 2013 e do Mundo em 2014, no escopo das atividades de proteção radiológica, no entorno do Estádio do Mineirão.

Os equipamentos utilizados nesse estudo foram escolhidos conforme os dados a serem extraídos da área, a necessidade de análise quantitativa das amostras retiradas no leito do córrego, a confiabilidade e resolução dos resultados, bem como a disponibilidade dos equipamentos no SEMAM – Serviço de Meio Ambiente e LRN do CDTN.

## **5.6. Campanhas**

Entre setembro de 2014 e maio 2016 ocorreram dez visitas à área de estudo com o objetivo de coletar dados para a pesquisa. Cada visita foi denominada campanha.

Coletaram-se cerca 230 amostras de água ao longo do córrego da Matinha em seis campanhas. Realizaram-se medidas de vazão em diversos trechos do córrego da Matinha com cinco campanhas concomitantes à coleta de água (Campanhas #1, #3, #4, #5 e #6) e três campanhas em separado (Campanha #2, #8 e #10). A Campanha #7 foi realizada para se medir a radiação gama natural no entorno e talvegue do córrego e a Campanha #9 foi apenas para coleta de amostras de água para medidas de atividade de  $^{222}\text{Rn}$ .

Todas as campanhas contaram com o auxílio dos equipamentos já descritos, bem como, GPS, trena e outros materiais de apoio.

### **5.6.1. Campanha #1 – 16 e 17/09/2014**

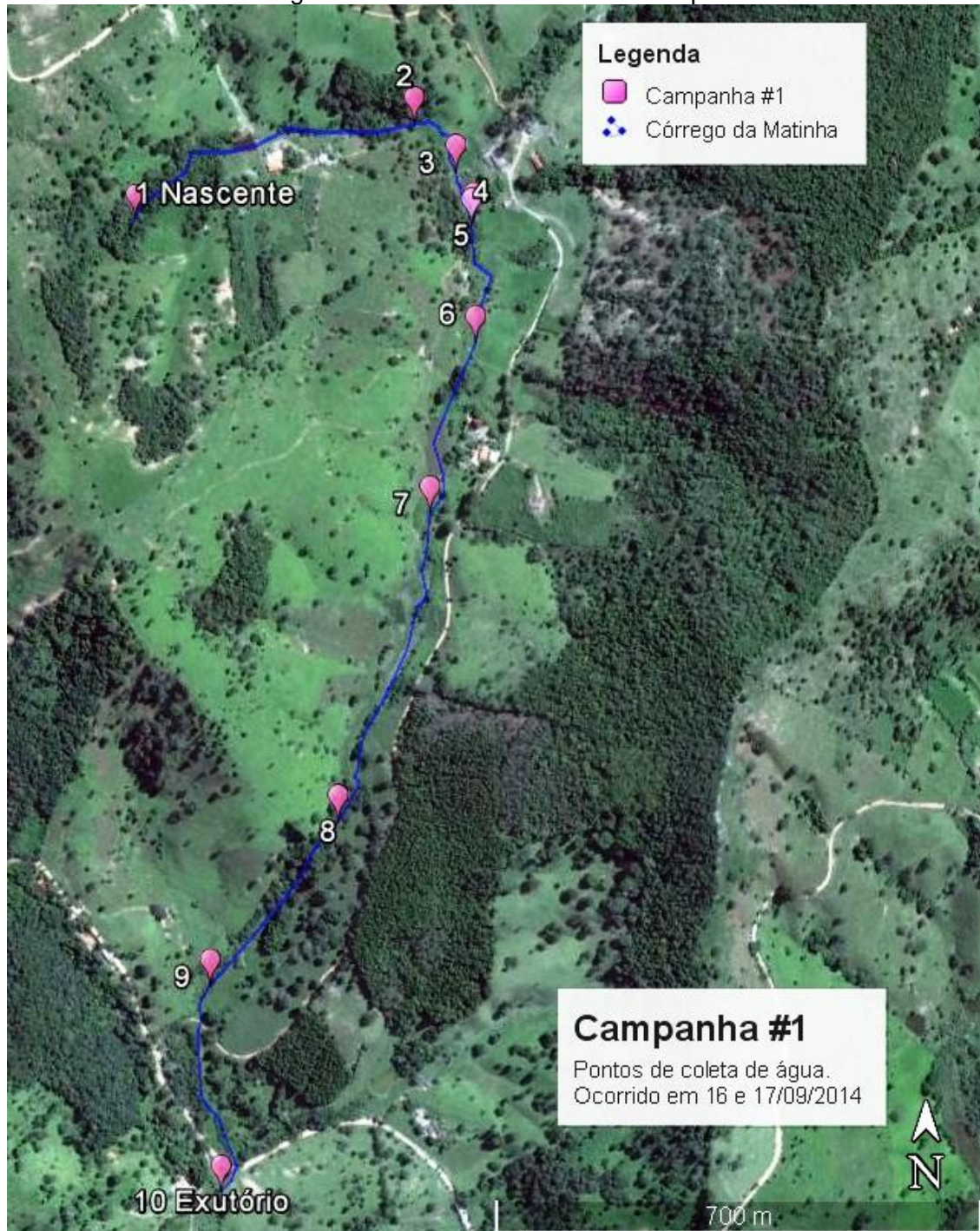
Na primeira campanha, em setembro de 2014, as coletas de água para análise de  $^{222}\text{Rn}$  ocorreram na nascente, no exutório do córrego e em pontos escolhidos aleatoriamente no trecho de 2.150 m que perfazem a extensão total do córrego da Matinha.

Utilizou-se de seringa plástica hipodérmica de 100 mL de volume para extrair a água no leito do córrego e acondicionamento em frascos de vidro devidamente registrados com data e

hora da coleta. Os dados de localização e esboço do local amostrado foram registrados em caderno de campo.

A localização dos dez pontos amostrados ao longo do córrego da Matinha pode ser observada na Figura 20, onde o primeiro ponto é próximo à nascente e os outros pontos estão à jusante deste sequencialmente até o exutório.

Figura 20 – Pontos de coleta da Campanha #1.



Fonte: Adaptado do Google Earth Pro.

### 5.6.2. Campanha #2 – 16 e 17/09/2014

O principal objetivo dessa campanha foi o realizar testes preliminares de medidas de vazão com o fluorímetro GGUN FL-30 que acabara de ser adquirido e pouco se sabia sobre sua operacionalidade. Outra importante atividade executada foi a definição empírica da massa ideal para a injeção e o traçador a ser aplicado e a distância mínima para mistura do traçador com a água no local de estudo.

A primeira etapa dessa Campanha#2 ocorreu no laboratório do SEMAM, quando se iniciou a preparação das soluções de traçador a  $1 \text{ mg.mL}^{-1}$  (Figura 21) em alguns frascos de vidro contendo 50 mL e 100 mL das soluções de rodamina e de fluoresceína.

Figura 21 – Preparação da solução do traçador Rodamina



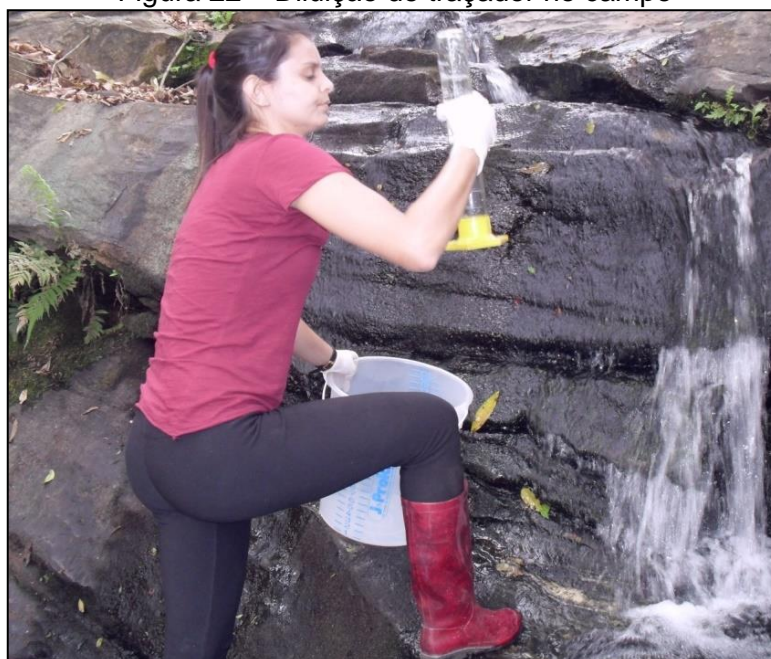
Fonte: acervo de Vinícius Verna.

Para a etapa seguinte, as soluções dos traçadores foram levadas para as margens do córrego da Matinha, onde as diluições para injeção em diversos trechos ocorreram em campo usando água do próprio córrego com o auxílio de vidrarias e balde graduado (Figura 22).

Após calibração do fluorímetro, essas soluções foram injetadas a montante numa distância mínima de dez vezes a largura do córrego no ponto onde o fluorímetro foi instalado, para que o mesmo detectasse a passagem da nuvem de traçador.

É importante ressaltar que não era objetivo deste experimento obter a vazão do córrego em estudo, mas apenas testar o equipamento em situações reais visando sua aplicação nos trabalhos desse estudo.

Figura 22 – Diluição de traçador no campo



Fonte: acervo de Vinícius Verna

Das soluções previamente preparadas foram retirados quatro frascos contendo 50 mL de traçador para o experimento de injeção e detecção. No total, realizaram-se quatro injeções de 50 mL cada, sendo duas da solução de rodamina e duas de fluoresceína (Figura 23).

Observou-se que soluções contendo 50 mg, ou seja, com 50 mL da solução foram suficientes para proceder aos experimentos.

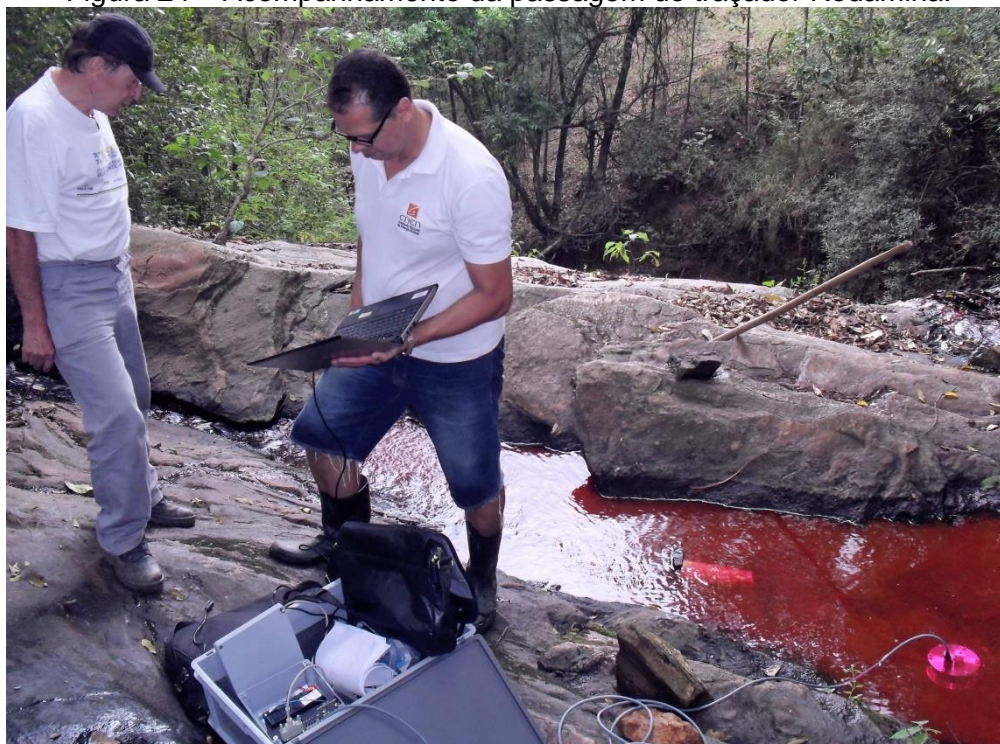
Figura 23 – Injeção da solução de Rodamina.



Fonte: acervo de Raquel Mageste.

O sistema de aquisição de dados do fluorímetro foi alimentado por uma bateria 6 V, e a passagem da nuvem de traçador foi acompanhada *in situ* na tela de um notebook (Figura 24).

Figura 24 – Acompanhamento da passagem do traçador Rodamina.



Fonte: acervo de Raquel Mageste.

### 5.6.3. Campanha #3 – 18 a 20/11/2014

Nos dias 18, 19 e 20 de novembro de 2014 realizaram-se novas coletas de águas para leitura de  $^{222}\text{Rn}$  no córrego da Matinha. Na oportunidade, outros testes para medidas de vazão com o traçador rodamina foram executados.

A partir da identificação e localização das maiores concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nos pontos 2, 4 e 5 da Campanha #1, expandiu-se a amostragem para as coletas em locais próximos a montante e jusante desses pontos e nas lacunas de amostragem deixadas na Campanha #1.

No primeiro dia desta campanha levou-se o aparelho RAD7 para leituras *in situ*, juntamente com o kit para medidas de radônio em águas. Logo após as primeiras três coletas, levaram-se os frascos com as amostras até onde o equipamento estava instalado (Figura 25), para proceder com as primeiras leituras de  $^{222}\text{Rn}$  e, assim, sucessivamente, até que todas as amostras do primeiro dia houvessem sido coletadas.

Figura 25 – Análise de  $^{222}\text{Rn}$  próximo ao local de coleta.



Fonte: acervo do autor.

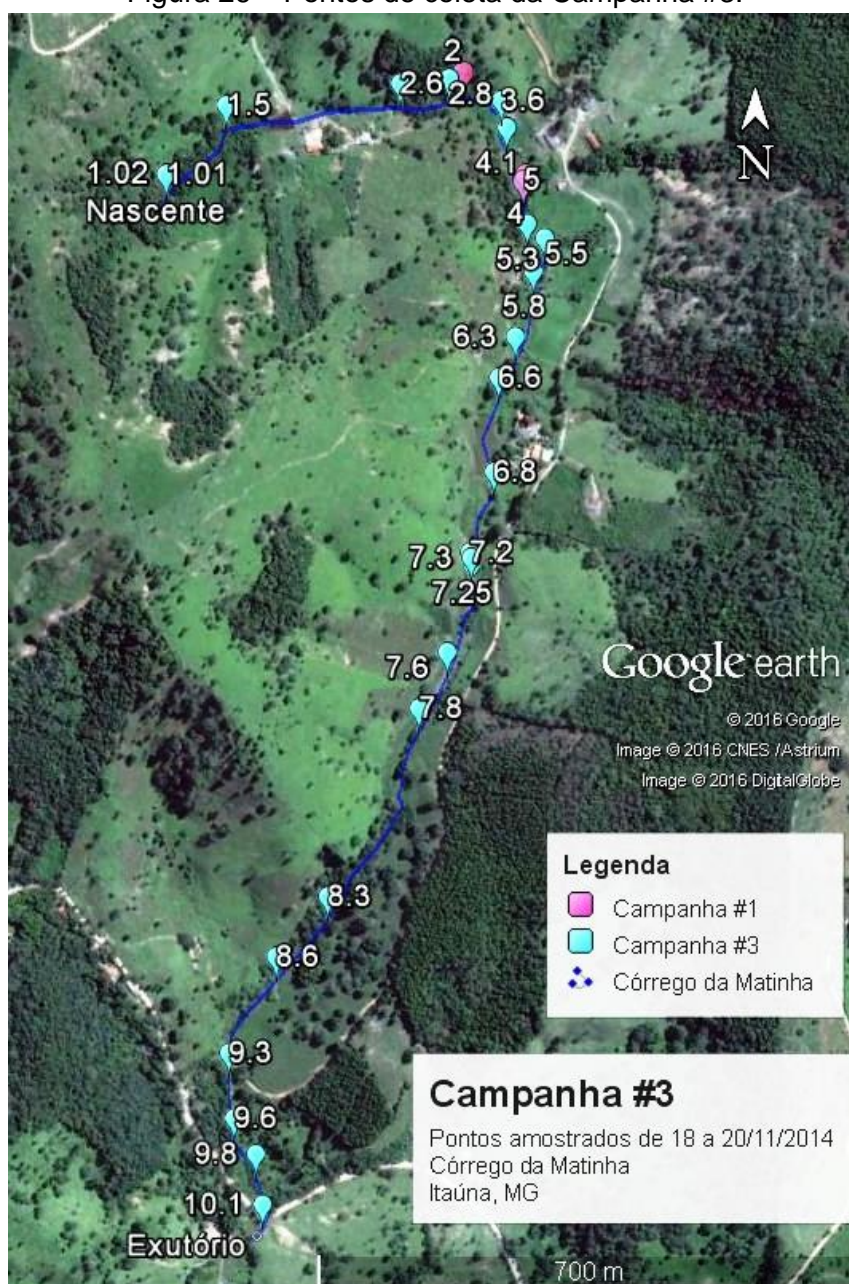
Como o tempo entre uma análise e outra, cerca de 40 min, foi maior do que o tempo de coleta das amostras, por volta de 15 min, houve acúmulo de amostras a serem analisadas. Portanto, no segundo e terceiro dias, as análises feitas com o RAD7 ocorreram no hotel

onde a equipe do SEMAM estava hospedada. As amostras acumuladas restantes foram analisadas no LRN do CDTN.

Na oportunidade realizaram-se no local mais alguns testes com traçador fluorescente rodamina, em locais nos quais se havia verificado maior presença de radônio na primeira campanha.

A Figura 26 mostra os pontos de coletas na Campanha #3.

Figura 26 – Pontos de coleta da Campanha #3.



Fonte: adaptado do Google Earth Pro.

#### 5.6.4. Campanha #4 – 10 e 11/02/2015

A partir desta campanha houve um aperfeiçoamento na técnica de amostragem, que contribuiu para que o tempo associado ao processo de coleta fosse sobremaneira reduzido. Uma bomba peristáltica de baixa vazão descrita na seção 5.2.2 foi usada para facilitar e acelerar a coleta de água. Fixou-se a ponta da mangueira de sucção a um cabo de madeira para atingir os pontos mais fundos do córrego. O sistema de coleta montado pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Sistema coletor de amostras



Fonte: acervo do autor.

Nos dias 10 e 11 de fevereiro de 2015 realizaram-se coletas em duplicata de águas superficiais para posterior análise de radônio em duas seções nas quais as leituras de radônio apresentaram valores significativos em duas campanhas anteriores, #1 e #3, bem como, medidas de vazão com o traçador fluorescente rodamina.

A vazão definida para coleta foi de 1 L/min, portanto, um frasco de 250 mL era preenchido de água em 15 segundos. Deixava-se a coleta se estender por mais 45 segundos, no intuito de se renovar a água dentro do frasco e armazená-la sem bolhas com o menor contato possível com o ar (Figura 28).

Figura 28 – Preenchimento do frasco com água



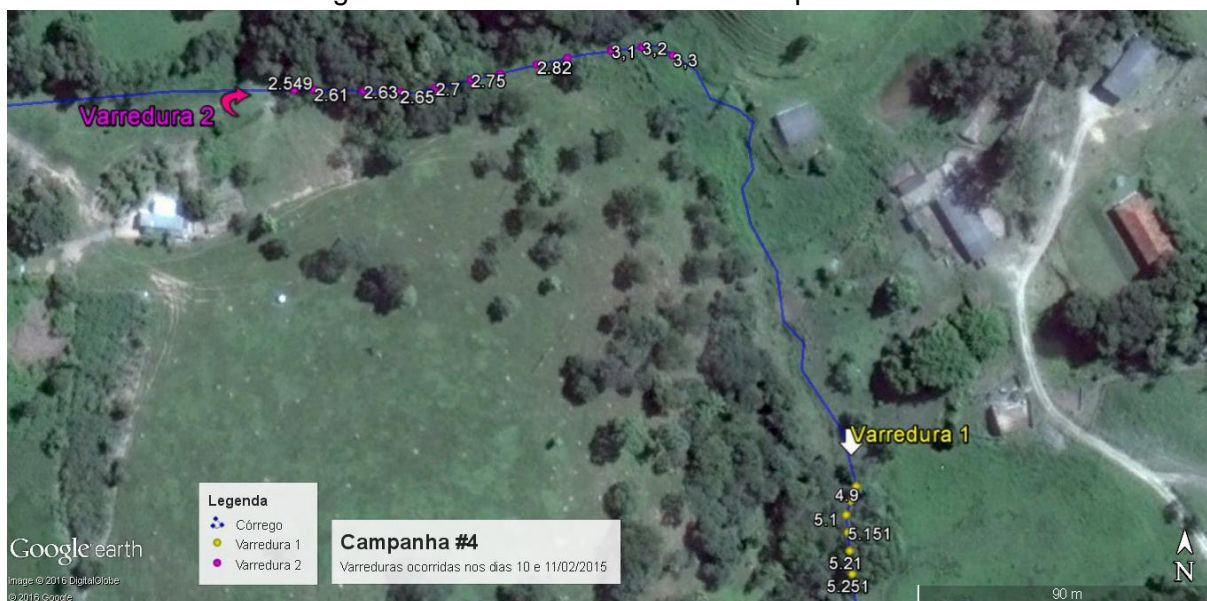
Fonte: acervo do autor.

No primeiro dia coletaram-se doze amostras de água, sendo duas por ponto escolhido, de cinco em cinco metros aproximadamente, no trecho situado entre 633 e 661 m distantes da nascente do córrego, que se convencionou chamar de Varredura 1 ou V1. O objetivo dessa escolha foi o de fazer varredura sobre os pontos 4 e 5 que também apresentaram atividade de  $^{222}\text{Rn}$  significativas na Campanha #1, quando apresentaram valores de 26,4 e 33,1  $\text{kBq.m}^{-3}$ .

No segundo dia de campanha coletaram-se treze amostras com a bomba peristáltica. Buscou-se fazer uma varredura no trecho que passa pelos pontos 2,6 e 2,8 da Campanha #3, que fica entre 350 e 480m da nascente do Córrego da Matinha. A esse trecho convencionou-se chamar de Varredura 2 ou V2.

A Figura 29 apresenta os locais onde as varreduras ocorreram ao longo do córrego da Matinha. Note que a Varredura 1, que aconteceu no dia 10/2/2015, fica a jusante da Varredura 2.

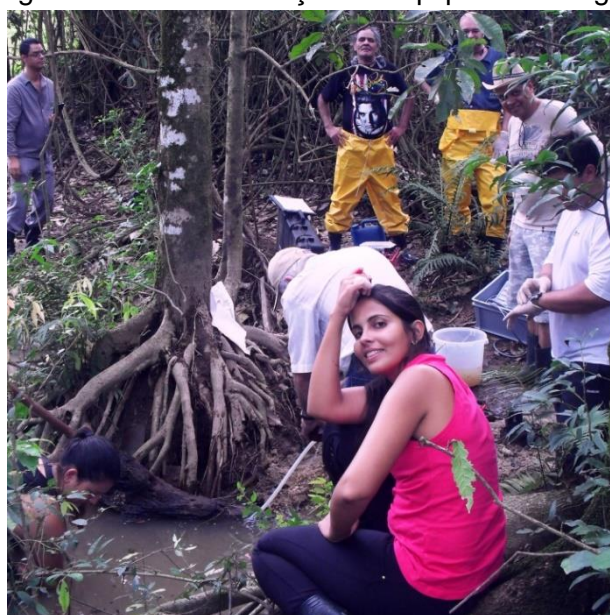
Figura 29 – Pontos de coleta da Campanha #4



Fonte: adaptado do Google Earth Pro.

Mais dois testes usando o traçador rodamina foram executados no intuito de tentar estabelecer a relação de incremento da vazão nas seções de varredura com o fluorímetro. Contudo, alguns fatores contribuíram para o insucesso dessa empreitada. Uma das causas foi o excesso de turbidez causado pelo trânsito da equipe durante as coletas para a análise de  $^{222}\text{Rn}$  (Figura 30). A outra causa foi o tempo de residência do traçador fluorescente em zonas mortas que foi maior do que a duração das baterias do notebook comprometendo a leitura do fluorímetro.

Figura 30 – Movimentação da equipe no córrego.



Fonte: acervo de Rubens Martins.

Era desejável que as medidas de vazão ocorressem simultâneas à coleta de água, no entanto não foi possível. Essas medidas de vazão ocorreram em outros momentos sem prejudicar a pesquisa.

#### 5.6.5. Campanha #5 – 14 e 15/07/2015

Realizaram-se medidas de vazão nos dias 14 e 15 de julho e, no dia 15, fizeram-se coletas de água nas duas seções evidenciadas na Campanha #4, com o objetivo de melhorar o detalhamento da atividade de  $^{222}\text{Rn}$  nas proximidades dos trechos V1 e V2.

Para as medidas de vazão na seção V1 (Figura 29) foram realizadas duas injeções de fluoresceína – 25 miligramas cada injeção. Na primeira injeção fez-se a leitura a jusante e, posteriormente, a montante da seção V1. Observou-se que os resultados esperados não foram os encontrados, ou seja, a vazão de montante mostrou-se maior que a vazão de jusante. Possivelmente houve falha no processo de recuperação de massa devido ao posicionamento incorreto do fluorímetro, na quantidade de traçador injetado e o excesso de matéria orgânica no local.

No dia seguinte, 15/07/2015, fizeram-se mais duas injeções com 25 mg de fluoresceína cada, a jusante e a montante da seção de varredura V2. No entanto, somente a injeção a montante teve uma recuperação de massa válida.

Devido ao erro ocorrido durante essa campanha, o experimento para medida de vazão na seção V1 foi repetido no dia 03/08/2015, quando se injetaram 100 mg de rodamina e os resultados esperados – vazão a montante menor do que vazão a jusante – estavam de acordo com os resultados obtidos.

Para evitar interferências, enquanto uma equipe trabalhava nas medidas de vazão em um trecho, outra equipe coletava amostras de água em outro trecho do córrego da Matinha.

Novamente as coletas de água ocorreram de jusante para montante, evitando a interferência da turbidez nas amostras colhidas.

Assim, no trecho compreendido entre 625 e 680 m de distância da nascente do córrego da Matinha, fez-se novo detalhamento da atividade de  $^{222}\text{Rn}$  e denominou-se trecho de Varredura 1a (V1a).

No trecho a montante de V1a, compreendido entre 350 e 425 m de distância da nascente do córrego da Matinha, fez-se novo detalhamento da atividade de  $^{222}\text{Rn}$  e foi denominado Varredura 2a (V2a). A Figura 31 mostra os pontos de coleta das varreduras V1a e V2a desta Campanha #5.

Figura 31 – Pontos de coleta da varredura V1a e V2a da Campanha #5



Fonte: adaptado do Google Earth Pro.

#### 5.6.6. Campanha #6 – 28 a 29/09/2015

Esta campanha foi marcada por mais um avanço no processo de coleta de água, com o uso do tubo coletor descrito na seção 5.2.3. Esse equipamento facilitou a coleta de água em profundidade, em trechos com muita vegetação e diminuiu ainda mais o tempo da amostragem. Medidas de vazão também foram executadas nos trechos estudados anteriormente.

Devido à facilidade alcançada com o uso do tubo coletor (Figura 32), coletaram-se amostras em duplicidade em 37 pontos nos dois dias de campanha.

Figura 32 – Tubo coletor e bomba peristáltica.



Fonte: acervo do autor.

Da porção média alta para baixa no córrego da Matinha, três trechos foram amostrados. O primeiro trecho, que aqui se chamou de T1, cujas coletas aconteceram no dia 28/9 faz um detalhamento entre 679 e 795 m da nascente. No dia 29/9 amostraram-se mais dois trechos, um entre 1075 e 1300 m da nascente, denominado T2 e um outro trecho denominado T3, a jusante dos outros dois trechos, entre 1834 e 2007 m da nascente. As amostragens tinham o objetivo de ratificar e ou retificar as taxas de atividade de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas nas campanhas #1 e #3.

Na Figura 33 estão representados os trechos de amostragem T1, T2 e T3 ao longo do córrego da Matinha referente à Campanha #6.

Figura 33 – Trechos amostrados na Campanha #6.



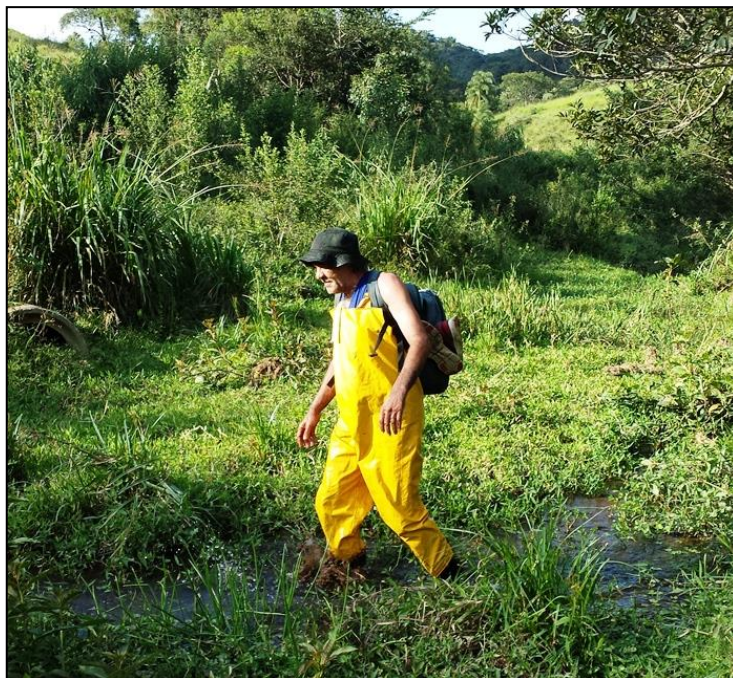
Fonte: adaptado do Google Earth Pro.

#### 5.6.7. Campanha #7 – 21 a 23/03/2016

Durante três dias a equipe fez uma varredura da radiação gama natural ao longo do córrego da Matinha utilizando a mochila de detecção já descrita na seção 4.8.

A equipe de trabalho percorreu a pé todo o córrego da Matinha primeiramente pelo talvegue (Figura 34) e depois pelas margens. Nos trechos onde existe lago artificial e com profundidade maior que 1,5 m, somente as margens foram verificadas.

Figura 34 – Detecção de radiação gama no córrego da Matinha.



Fonte: acervo do autor.

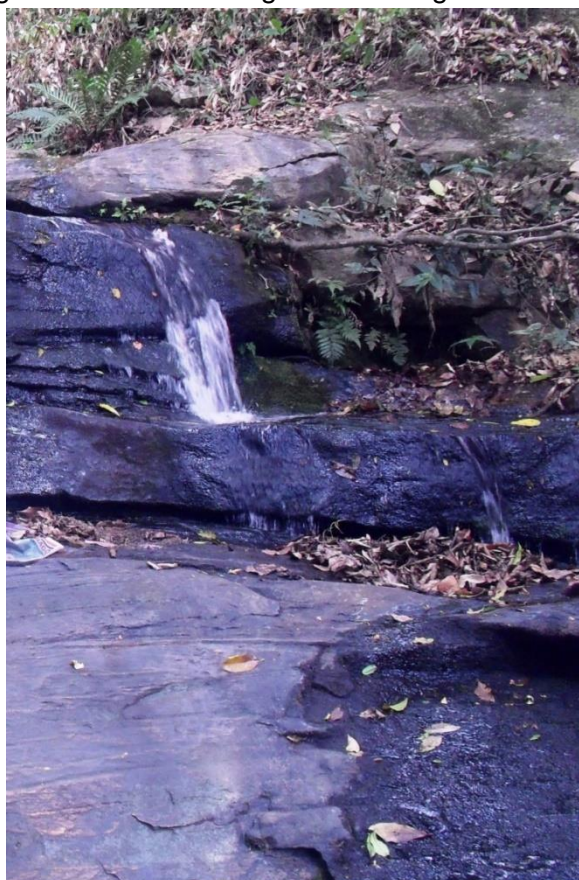
Esse levantamento buscou registrar os níveis de radiação gama natural existente no córrego da Matinha e verificar se nos pontos nos quais foram encontrados maiores valores de atividade de  $^{222}\text{Rn}$  nas águas existiria algum tipo de correlação com a radiação gama registrada.

#### 5.6.8. Campanha #8 – 10/05/2016

No dia 10/05/2016 executaram-se dois experimentos válidos para as medidas de vazão usando o fluorímetro GGUN-FL 30.

A primeira injeção foi a montante da queda d'água com 100 mg de fluoresceína e a captação da massa injetada ocorreu na queda d'água (Figura 35), a aproximadamente 1600 m da nascente do córrego da Matinha. A segunda injeção com 50 mg de fluoresceína ocorreu a montante da seção de varredura V1.

Figura 35 – Queda d'água no Córrego da Matinha.



Fonte: acervo de Vinícius Verna.

#### 5.6.9. Campanha #9 – 16 e 17/05/2016

Essa nova campanha para coleta de água e análise de  $^{222}\text{Rn}$  foi executada para refazer os pontos de interesse não contemplados pelas campanhas anteriores. Esses pontos complementaram a avaliação das inter-relações estudadas.

O objetivo principal foi o de refazer lacunas no trecho 2 da Campanha #6, onde foram coletadas 28 amostras em 14 pontos distantes entre 1110 e 1305 m da nascente, a jusante do segundo lago artificial no leito do córrego. Além desses, mais dois pontos foram amostrados: um ponto a 265 m da nascente, logo a jusante do primeiro lago artificial de montante e outro ponto 15 m a montante da queda d'água (Figura 35) e a 1585 m da nascente do córrego da Matinha, todos em duplicidade. A Figura 36 mostra os trechos onde foram realizadas as coletas.

Figura 36 – Trechos amostrados na Campanha #9.



Fonte: adaptado de Google Earth Pro.

#### 5.6.10. Campanha #10 – 24/05/2016

No dia 24 de maio foram realizados os últimos experimentos para medidas de vazão no córrego da Matinha. Injetaram-se 100 mg de fluoresceína próximo ao exutório e também foram injetadas 100 mg de fluoresceína para medir a vazão na seção de varredura V2.

As medidas de vazão da Campanha #10 encerraram os trabalhos de campo, sendo que esta última etapa representou a evolução constante dos métodos aplicados e fez com que cada vez mais os resultados representassem fielmente o objeto de estudo.

## 6. RESULTADOS

Neste capítulo, todas as atividades do  $^{222}\text{Rn}$  reportadas foram corrigidas em relação ao seu decaimento desde o momento da coleta [equação (2)] e são uma média de quatro medidas obtidas por ciclo fornecida pelo RAD7 para cada amostra analisada.

A numeração das amostras indica a posição dos pontos em relação aos pontos da Campanha #1. Entretanto, não correspondem a distâncias entre os pontos, são apenas indicativos de sequenciamento.

### 6.1. Resultados da Campanha#1 – 16 e 17/09/2014

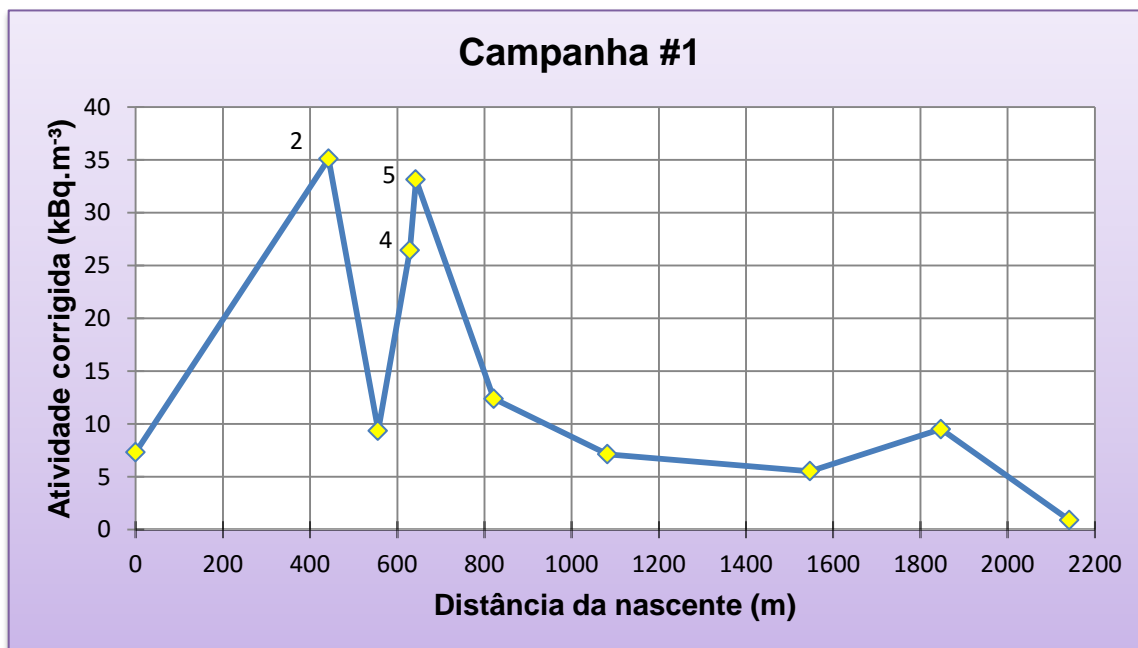
A Tabela 2 mostra as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas nas dez amostras coletadas nos dez pontos ao longo do córrego da Matinha. O ponto 1 é próximo à nascente e os outros pontos estão à jusante deste, sequencialmente. O gráfico da Figura 37 mostra o comportamento das atividades do  $^{222}\text{Rn}$  ao longo do córrego. Observa-se que as amostras 2, 4 e 5 apresentaram maiores atividades de  $^{222}\text{Rn}$ .

Tabela 2 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas nos pontos do córrego da Matinha, Campanha #1.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	0	16/09/2014 16:05	16/09/2014 20:00	$7,3 \pm 2,4$
2	452	16/09/2014 16:55	16/09/2014 21:30	$35,1 \pm 4,9$
3	562	16/09/2014 17:10	16/09/2014 22:00	$9,4 \pm 2,7$
4	635	17/09/2014 11:05	17/09/2014 18:30	$26,4 \pm 4,3$
5	643	17/09/2014 10:40	17/09/2014 19:00	$33,1 \pm 4,8$
6	819	17/09/2014 11:20	18/09/2014 10:32	$12,4 \pm 1,1$
7	1092	17/09/2014 11:45	18/09/2014 11:12	$7,1 \pm 0,5$
8	1550	17/09/2014 12:00	18/09/2014 11:54	$5,5 \pm 0,7$
9	1840	17/09/2014 12:30	18/09/2014 12:35	$9,5 \pm 1,4$
10	2157	17/09/2014 12:50	18/09/2014 13:46	$0,9 \pm 0,3$

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 37 – Gráfico das atividades determinadas nos pontos do córrego da Matinha, Campanha #1.



Fonte: elaborado pelo autor

## 6.2. Resultados da Campanha #2 – 05 e 06/11/2014

Verificou-se, durante os testes, que a sensibilidade do fluorímetro era muito grande para fluoresceína, visto que o leitor do aparelho atingiu a saturação ao alcançar a concentração de  $0,14 \text{ mg.L}^{-1}$ . Já no caso da rodamina, a saturação foi atingida com uma concentração de  $2,8 \text{ mg.L}^{-1}$ . Portanto, esses primeiros testes foram determinantes para que as soluções de traçadores fluorescentes fossem preparadas doravante com concentrações menores do que as experimentadas.

## 6.3. Resultados da Campanha #3 – 18 a 20/11/2014

Baseando-se na identificação e localização dos pontos com maior concentração de  $^{222}\text{Rn}$ , foram realizadas coletas de amostras próximas a montante e jusante desses pontos e nas lacunas de amostragem deixadas pela Campanha #1.

Nesta ocasião, outros testes com o traçador rodamina foram executados somente para verificar o comportamento visual da nuvem de traçador, sem fazer medidas.

A Tabela 3 apresenta os resultados das medidas de atividade do  $^{222}\text{Rn}$  obtidas durante a Campanha #3.

Tabela 3 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas na Campanha #3.

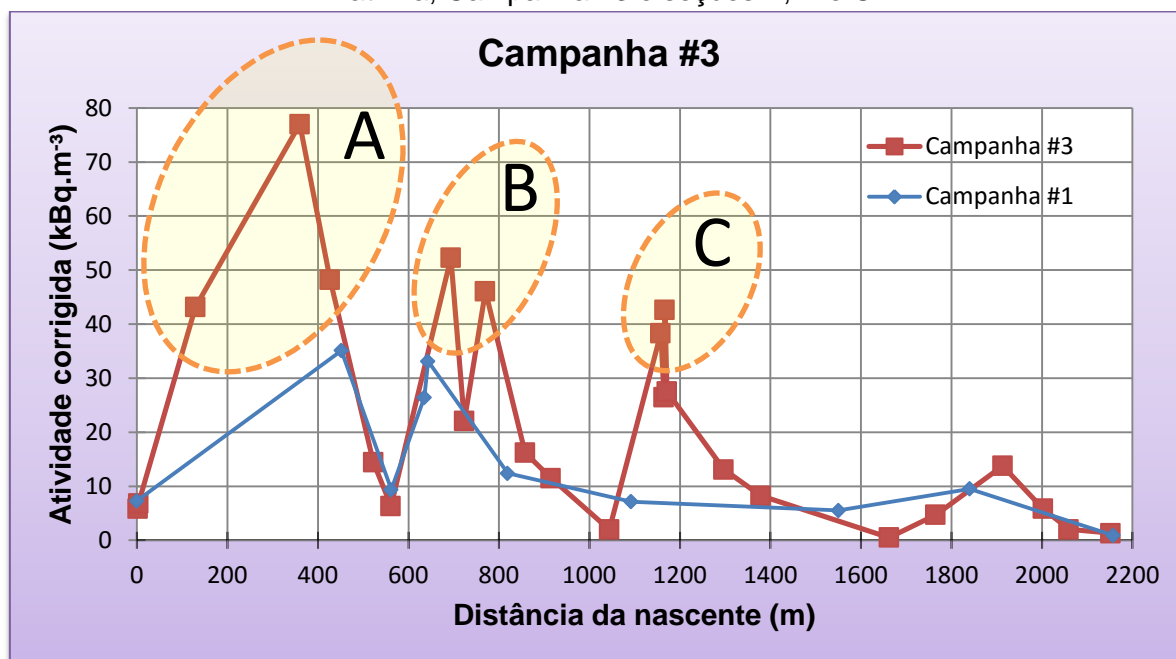
Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq.m}^{-3}$ )
1,01	2	18/11/2014 14:07	18/11/2014 19:05	$5,87 \pm 1,03$
1,02	4	18/11/2014 14:15	18/11/2014 19:49	$6,83 \pm 1,68$
1,5	129	18/11/2014 14:36	18/11/2014 20:38	$43,15 \pm 2,59$
2,6	360	18/11/2014 15:05	18/11/2014 21:21	$76,99 \pm 6,36$
2,8	427	18/11/2014 15:20	18/11/2014 21:52	$48,20 \pm 4,09$
3,6	523	18/11/2014 15:40	19/11/2014 14:08	$14,43 \pm 1,65$
4,1	561	18/11/2014 15:55	19/11/2014 07:24	$6,34 \pm 1,38$
5,3	694	19/11/2014 09:38	19/11/2014 15:16	$52,28 \pm 4,78$
5,5	724	19/11/2014 09:45	19/11/2014 14:36	$22,07 \pm 1,93$
5,8	770	19/11/2014 10:11	19/11/2014 16:10	$46,09 \pm 3,59$
6,3	858	19/11/2014 10:37	19/11/2014 16:55	$16,20 \pm 3,02$
6,6	915	19/11/2014 10:54	19/11/2014 17:33	$11,50 \pm 1,27$
6,8	1044	19/11/2014 11:16	19/11/2014 18:11	$2,00 \pm 0,32$
7,2	1158	20/11/2014 09:29	20/11/2014 14:50	$38,32 \pm 2,94$
7,25	1165	20/11/2014 09:25	20/11/2014 15:41	$26,45 \pm 1,78$
7,3	1167	19/11/2014 15:40	19/11/2014 19:14	$42,61 \pm 1,68$
7,4	1171	20/11/2014 09:36	20/11/2014 16:20	$27,55 \pm 1,92$
7,6	1297	19/11/2014 16:00	19/11/2014 19:53	$13,11 \pm 0,53$
7,8	1379	19/11/2014 16:23	19/11/2014 20:33	$8,26 \pm 0,78$
8,3	1662	19/11/2014 17:00	19/11/2014 21:11	$0,52 \pm 0,31$
8,6	1765	19/11/2014 17:21	19/11/2014 21:53	$4,72 \pm 0,53$
9,3	1913	20/11/2014 09:55	20/11/2014 17:04	$13,77 \pm 0,33$
9,6	2003	20/11/2014 10:05	21/11/2014 07:40	$5,84 \pm 1,13$
9,8	2060	20/11/2014 10:14	21/11/2014 08:21	$2,02 \pm 0,74$
10,1	2152	20/11/2014 10:25	21/11/2014 10:04	$1,33 \pm 0,30$

Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 38 apresenta as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas ao longo do córrego da Matinha, bem como três seções <sup>3</sup>(A, B e C) que se destacaram por apresentarem atividades do radônio entre 38 e 77  $\text{kBq.m}^{-3}$ . Como pode ser observado nesse gráfico, a maior atividade encontrada na Campanha #1 foi 35  $\text{kBq.m}^{-3}$  portanto, menor do que as atividades obtidas nos trechos destacados na Campanha #3.

<sup>3</sup> Pontos destaque da seção A (1,5; 2,6; 2,8), seção B (5,3; 5,8) e seção C (7,2; 7,3).

Figura 38 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  determinadas nos pontos do córrego da Matinha, Campanha #3 e seções A, B e C.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 6.4. Resultados da Campanha #4 – 10 e 11/02/2015

Foram realizadas coletas de águas superficiais para posterior leitura de radônio em duas seções, Varreduras 1 e 2, nas quais as medidas de atividades apresentaram valores significativos nas campanhas anteriores, Campanhas #1 e #3.

A partir desta campanha, as coletas foram realizadas com o auxílio de uma bomba peristáltica de baixa vazão (seção 5.2.2).

##### 6.4.1. Varredura 1 (V1)

A Tabela 4 traz as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  determinadas nas amostras de água coletadas para um levantamento detalhado do trecho de Varredura 1, que passa pelos pontos 4 e 5 da Campanha #1 e apresentaram valores de 26,4 e 33,1 kBq.m<sup>-3</sup>. As amostras foram coletadas em duplicidade e, após as análises, as duplicatas de menor valor de atividade foram suprimidas porque era um indicativo de perda de radônio. A numeração das amostras está de acordo com a apresentada no mapa da Figura 29.

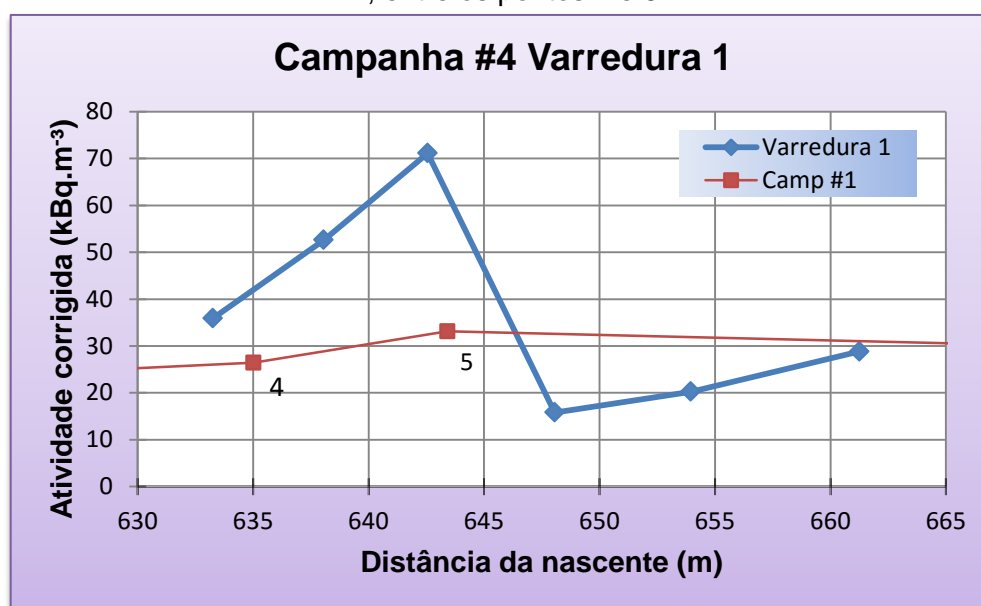
Tabela 4 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas em locais próximos aos pontos 4 e 5, Varredura 1, córrego da Matinha, Campanha #4.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ )
4.9	633	10/02/2015 14:40	10/02/2015 18:35	$35,92 \pm 3,67$
4.91	638	10/02/2015 14:55	10/02/2015 21:07	$52,63 \pm 4,92$
5.1	643	10/02/2015 15:06	10/02/2015 22:00	$71,14 \pm 5,09$
5.151	648	10/02/2015 15:30	12/02/2015 12:45	$15,80 \pm 1,03$
5.21	654	10/02/2015 15:45	12/02/2015 17:43	$20,24 \pm 1,28$
5.251	661	10/02/2015 15:55	12/02/2015 19:25	$28,81 \pm 0,78$

Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 39 apresenta as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no trecho que fica entre 630 e 665 m de distância da nascente, Varredura 1. São apresentados também os pontos 4 e 5 da Campanha #1.

Figura 39 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas, Varredura 1, Campanha #4, entre os pontos 4 e 5.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 6.4.2. Varredura 2 (V2)

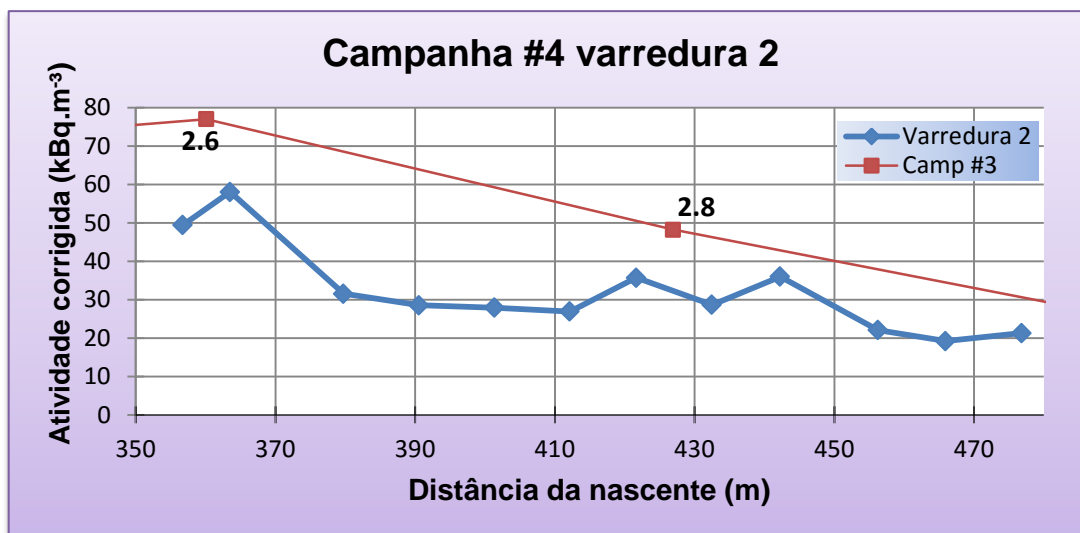
Na Varredura 2, foram coletadas 13 amostras entre 350 e 480 m da nascente do Córrego da Matinha. Esse detalhamento contempla parte da seção A (pontos 2,6 e 2,8) da Campanha #3. Os valores das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  determinadas podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas, Varredura 2, Campanha #4.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq.m}^{-3}$ )
2,549	357	11/02/2015 10:40	13/02/2015 10:10	$49,41 \pm 3,21$
2,610	364	11/02/2015 10:50	13/02/2015 10:55	$58,04 \pm 0,91$
2,630	380	11/02/2015 11:15	13/02/2015 11:45	$31,53 \pm 4,23$
2,650	391	11/02/2015 11:30	13/02/2015 12:45	$28,52 \pm 3,18$
2,700	401	11/02/2015 11:45	13/02/2015 13:45	$27,90 \pm 2,45$
2,750	412	11/02/2015 11:55	13/02/2015 14:30	$26,93 \pm 2,80$
2,770	422	11/02/2015 12:10	13/02/2015 15:15	$35,71 \pm 1,49$
2,820	433	11/02/2015 12:20	13/02/2015 16:05	$28,65 \pm 1,12$
2,900	442	11/02/2015 12:30	13/02/2015 16:50	$35,98 \pm 3,07$
3,100	456	11/02/2015 12:43	13/02/2015 17:45	$22,06 \pm 3,18$
3,200	466	11/02/2015 12:50	13/02/2015 18:30	$19,21 \pm 1,40$
3,300	477	11/02/2015 13:05	13/02/2015 19:25	$21,29 \pm 0,81$

Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 40 apresenta as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas na Varredura 2. São apresentados também os pontos 2,6 e 2,8 da Campanha #3.

Figura 40 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no Varredura 2, Campanha #4

Fonte: elaborado pelo autor.

## 6.5. Resultados da Campanha #5 – 14 e 15/07/2015

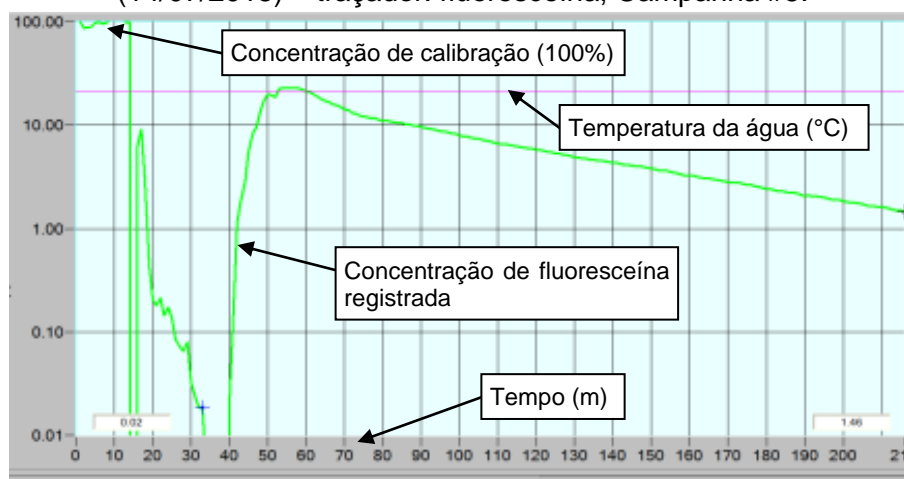
Nesta campanha foram realizadas medidas de vazão nos trechos de varreduras 1 e 2, V1 e V2 (Figura 29), definidos na Campanha #4 e medidas da atividade de  $^{222}\text{Rn}$  nos trechos V1a e V1b (Figura 31), descritos na Campanha #5.

### 6.5.1. Vazão

A primeira medida ocorreu no dia 14 à jusante da seção V1, a aproximadamente 800 m da nascente. A vazão encontrada,  $2,03 \text{ L.s}^{-1}$ , foi abaixo da esperada, se comparada com a medida de montante,  $2,19 \text{ L.s}^{-1}$ . Atribuiu-se essa diferença ao posicionamento do leitor do fluorímetro em local com muita matéria orgânica, sendo que estas poderiam ter bloqueado o fluxo normal das águas.

No entanto, esse experimento serviu como exemplo para que se pudessem diminuir as interferências nas medidas seguintes. O gráfico da Figura 41 foi gerado pelo software do aplicativo FLUO do fluorímetro GGUN FL-30. A curva verde representa o percentual da concentração da massa de fluoresceína registrada, tendo a concentração de calibração como referência máxima (100,00%), no eixo das ordenadas em função do tempo em minutos, que está representado no eixo das abscissas. A curva magenta representa a temperatura da água durante o experimento.

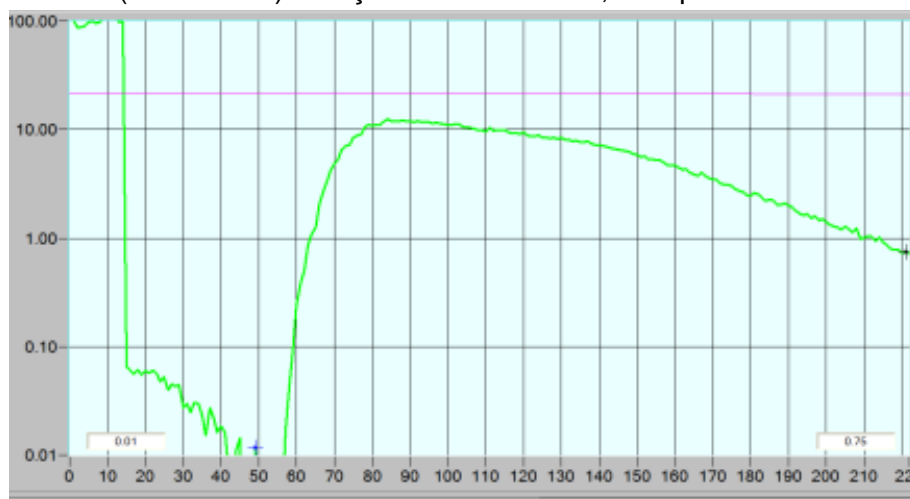
Figura 41 – Recuperação de massa a jusante da seção V1 – vazão de  $2,03 \text{ L.s}^{-1}$ . (14/07/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #5.



Fonte: adaptado de Ferreira (2016).

A Figura 42 mostra o gráfico dos resultados da medida de vazão a montante da seção V1, localizada perto de 600 m da nascente do córrego da Matinha e executada no dia 14/07/2015 com o traçador fluoresceína.

Figura 42 – Recuperação de massa a montante da seção V1 – vazão de  $2,19 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ .  
(14/07/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #5.

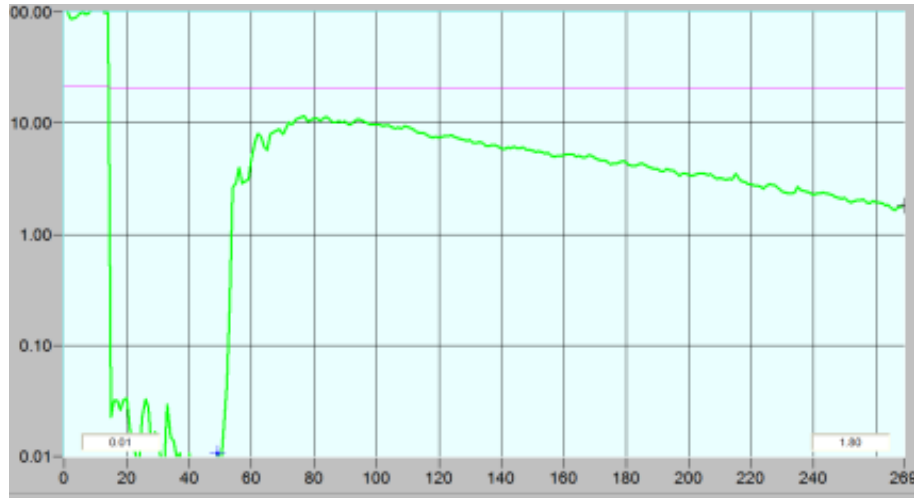


Fonte: (Ferreira, 2016).

As duas medidas de vazão executadas no dia 14/07/2015 foram descartadas e os indicativos de vazão foram substituídos por outras medidas feitas no dia 03/08/2017.

No dia 15/07/2015 realizaram-se novas medidas de vazão, dessa vez a montante e a jusante da seção V2 localizada cerca de 350 m e 500 m da nascente respectivamente. A Figura 43 mostra a curva de recuperação de massa a montante tendo a fluoresceína como traçador.

Figura 43 – Recuperação de massa a montante da seção V2 – vazão de  $1,75 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ .  
(15/07/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #5.

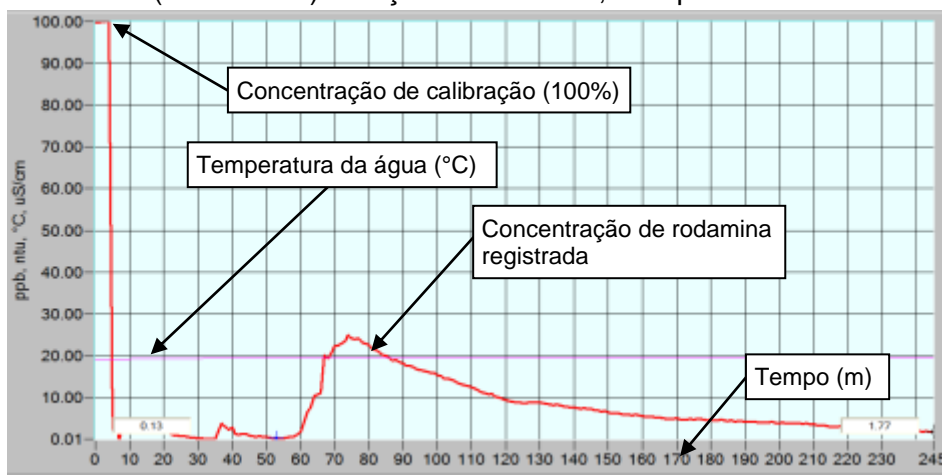


Fonte: (Ferreira, 2016).

Devido a um erro de leitura na injeção de fluoresceína realizada a jusante da seção de varredura V2, alguns minutos depois foi realizada uma segunda injeção com 40 mg de rodamina (curva em vermelho na Figura 44).

Apesar da injeção de rodamina ter sido feita em momento próximo à injeção de fluoresceína não houve comprometimento dos resultados devido à capacidade do fluorímetro de separar as leituras desses dois traçadores.

Figura 44 – Recuperação de massa a jusante da seção V2 – vazão de  $2,10 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ .  
(15/07/2015) – traçador: rodamina, Campanha #5.

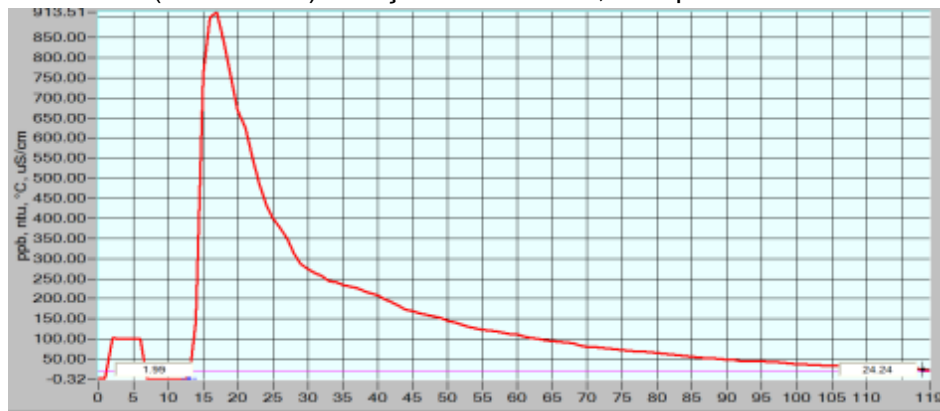


Fonte: (Ferreira, 2016).

Em substituição às medidas realizadas no dia 14/07/2015 o experimento para medida de vazão na seção V1 foi repetido no dia 03/08/2015, quando se injetaram 100 mg de rodamina. Desta vez, os resultados esperados – vazão de jusante menor do que vazão de montante – ficou de acordo com os resultados obtidos.

A Figura 45 apresenta o gráfico dos resultados obtidos para a recuperação de massa de rodamina a jusante da seção V1, que registrou vazão de  $2,8 \text{ L.s}^{-1}$ .

Figura 45 – Recuperação de massa a jusante da seção V1 – vazão de  $2,8 \text{ L.s}^{-1}$ .  
(03/08/2015) – traçador: rodamina, Campanha #5.



Fonte: (Ferreira, 2016).

Como já era esperada, a vazão registrada a montante,  $2,4 \text{ L.s}^{-1}$ , foi menor do a registrada a jusante e o gráfico se apresenta na Figura 46.

Figura 46 – Recuperação de massa a montante da seção V1 – vazão de  $2,4 \text{ L.s}^{-1}$ .  
(03/08/2015) – traçador: rodamina, Campanha #5.



Fonte: (Ferreira, 2016).

### 6.5.2. Atividade de $^{222}\text{Rn}$ .

As amostragens para medidas de atividade do  $^{222}\text{Rn}$  aconteceram no dia 15/7 nas seções V1a e V2a, de jusante para montante, evitando que a turbidez causada pelo processo de coleta interferisse nas análises e ou nas leituras de vazão que haviam se iniciado na seção da Varredura 2 a montante.

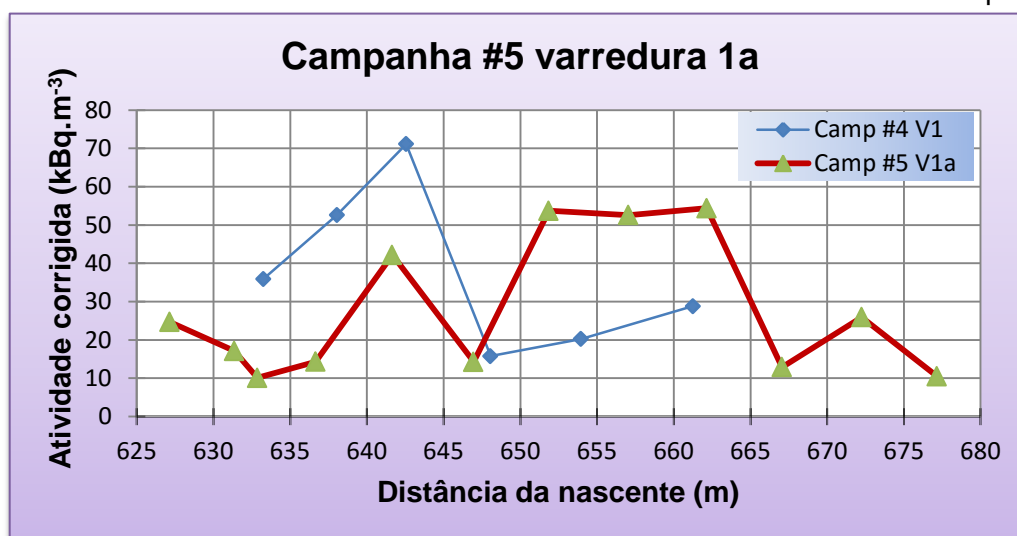
No trecho compreendido entre 625 e 680 m de distância da nascente do córrego da Matinha, denominado V1a, amostraram-se 12 pontos em duplicidade. A distância aproximada entre as amostragens foi de 5 m. Conforme explicado na seção 5.3, valores de atividade mais baixos das duplicatas foram descartados e as amostras válidas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas no trecho Varredura 1a, Campanha #5.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ (Bq.m <sup>-3</sup> )
4,5	627	15/07/2015 12:40	16/07/2015 11:15	24,67 ± 1,65
4,6	631	15/07/2015 12:35	16/07/2015 10:25	17,10 ± 1,63
4,7	633	15/07/2015 13:30	16/07/2015 12:05	10,09 ± 0,82
4,85	637	15/07/2015 12:20	16/07/2015 08:35	14,34 ± 1,89
4,98	642	15/07/2015 12:00	15/07/2015 16:07	42,19 ± 2,21
5,14	647	15/07/2015 11:50	15/07/2015 15:20	14,27 ± 2,14
5,18	652	15/07/2015 11:40	15/07/2015 14:40	53,70 ± 1,86
5,23	657	15/07/2015 11:15	15/07/2015 13:14	52,58 ± 4,16
5,252	662	15/07/2015 11:00	15/07/2015 12:41	54,39 ± 2,50
5,254	667	15/07/2015 10:45	15/07/2015 11:56	12,92 ± 1,21
5,26	672	15/07/2015 10:31	15/07/2015 11:14	25,94 ± 2,04
5,27	677	15/07/2015 10:20	15/07/2015 10:22	10,50 ± 1,13

Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 47 apresenta as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no trecho V1a. São apresentados também os resultados das amostragens nos pontos da Campanha #4.

Figura 47 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas na Varredura 1a da Campanha #5.

Fonte: elaborado pelo autor.

No trecho compreendido entre 350 e 425 m de distância da nascente do córrego da Matinha, denominado Varredura 2a, V2a, fez-se novo detalhamento e amostraram-se 14 pontos em duplicidade. A distância aproximada entre as amostragens foi de 5 m. Todas as amostras válidas são apresentadas na Tabela 7.

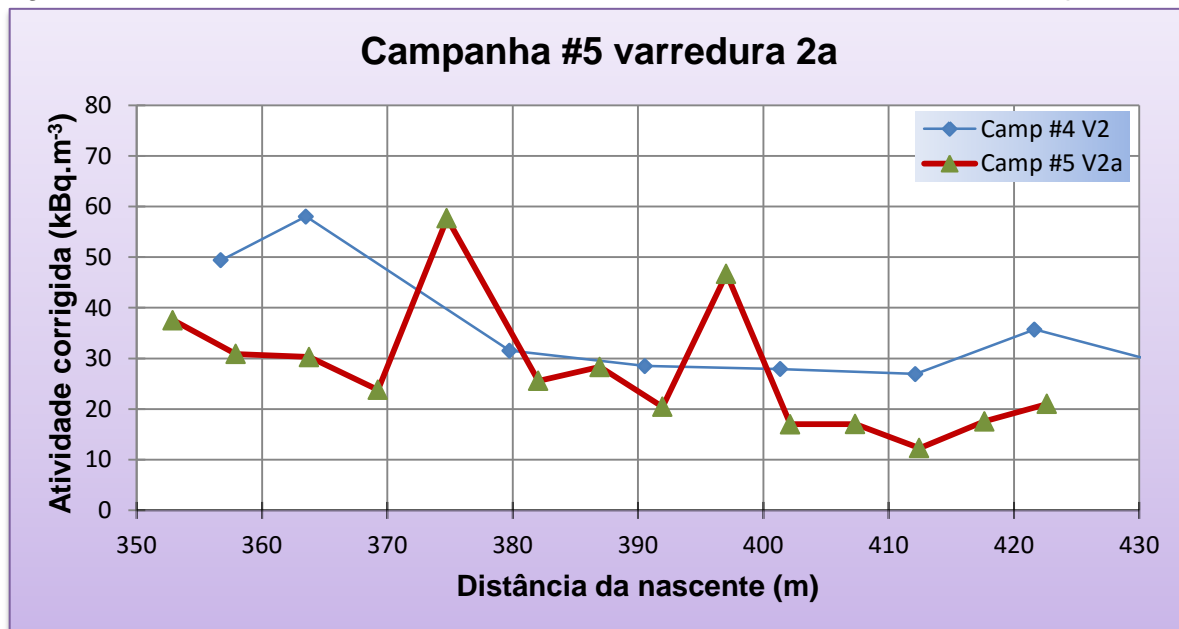
Tabela 7 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas no detalhamento da Varredura 2a, Campanha #5.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ (Bq.m <sup>-3</sup> )
2,4	353	15/07/2015 16:28	20/07/2015 11:42	37,53 ± 2,34
2,602	358	15/07/2015 16:20	20/07/2015 01:52	30,88 ± 1,33
2,615	364	15/07/2015 16:13	20/07/2015 10:03	30,27 ± 4,49
2,619	369	15/07/2015 16:05	20/07/2015 09:20	23,78 ± 4,47
2,625	375	15/07/2015 15:55	20/07/2015 08:37	57,69 ± 1,97
2,635	382	15/07/2015 15:45	17/07/2015 16:19	25,56 ± 2,32
2,64	387	15/07/2015 15:35	17/07/2015 15:36	28,32 ± 2,83
2,66	392	15/07/2015 15:25	17/07/2015 14:45	20,45 ± 2,59
2,68	397	15/07/2015 15:17	17/07/2015 14:00	46,70 ± 2,72
2,71	402	15/07/2015 15:07	17/07/2015 13:15	17,01 ± 1,59
2,73	407	15/07/2015 15:00	17/07/2015 12:15	17,04 ± 2,42
2,751	412	15/07/2015 14:48	17/07/2015 11:20	12,30 ± 2,13
2,76	418	15/07/2015 14:40	17/07/2015 10:35	17,56 ± 2,62
2,771	423	15/07/2015 14:30	16/07/2015 13:15	21,02 ± 1,98

Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 48 apresenta as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no trecho V2a. São apresentados também os pontos do detalhamento da Campanha #4.

Figura 48 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas na Varredura 2a da Campanha #5.



Fonte: elaborado pelo autor.

## 6.6. Resultados da Campanha #6 – 28 a 29/09/2015

Nesta campanha foi utilizado o tubo coletor, que facilitou a coleta em profundidade, em trechos com muita vegetação e diminuiu ainda mais o tempo de amostragem. Medidas de vazão também foram executadas nos trechos estudados anteriormente.

### 6.6.1. Atividade de $^{222}\text{Rn}$ .

No dia 28/9/2015 o primeiro trecho amostrado, T1, contemplou a seção B da Campanha #3 (Figura 38) e faz um detalhamento entre 679 e 795 m da nascente.

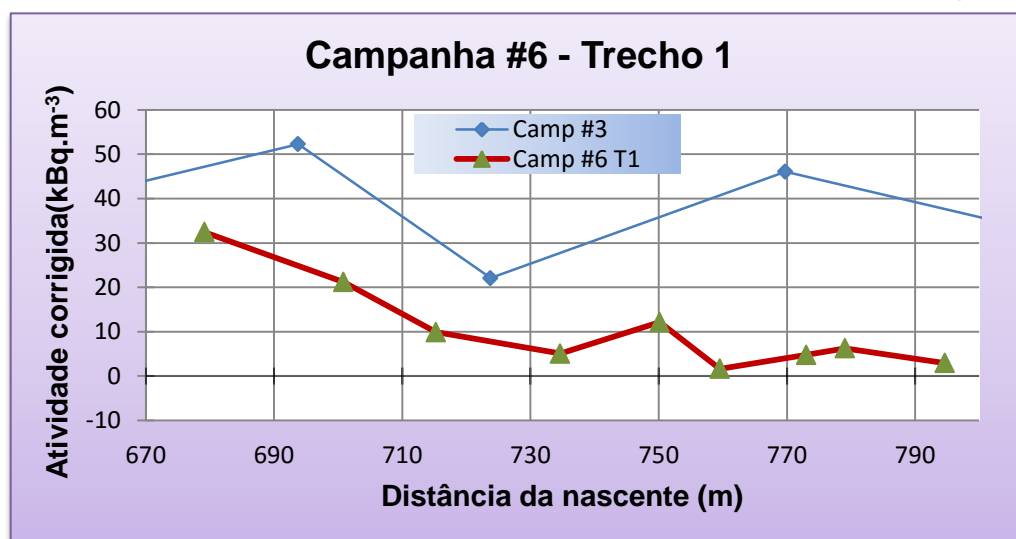
A Tabela 8 apresenta os dados relativos a atividade do  $^{222}\text{Rn}$  nos nove pontos amostrados em T1.

Tabela 8 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas na Campanha #6, trecho 1.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq.m}^{-3}$ )
5,28	679	28/09/2015 18:10	30/09/2015 13:55	$32,44 \pm 2,92$
5,35	701	28/09/2015 18:03	30/09/2015 11:28	$21,20 \pm 1,50$
5,45	715	28/09/2015 17:50	29/09/2015 13:35	$9,89 \pm 1,95$
5,55	735	28/09/2015 17:33	29/09/2015 11:20	$5,08 \pm 0,81$
5,61	750	28/09/2015 17:17	29/09/2015 09:53	$12,13 \pm 1,17$
5,7	760	28/09/2015 17:07	28/09/2015 22:04	$1,63 \pm 0,44$
5,81	773	28/09/2015 16:50	28/09/2015 19:23	$4,77 \pm 0,65$
5,84	779	28/09/2015 16:33	28/09/2015 17:45	$6,25 \pm 0,52$
5,9	795	28/09/2015 16:20	28/09/2015 16:20	$2,93 \pm 0,83$

Fonte: elaborado pelo autor.

As amostragens em T1 estão representadas graficamente na Figura 49, bem como, os três pontos da seção C da Campanha #3.

Figura 49 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no Trecho 1 da Campanha #6.

Fonte: elaborado pelo autor.

No dia 29/9 amostraram-se o trecho 2, T2, que contempla o entorno do ponto 7,6 na seção C da Campanha #3, entre 1075 e 1300 m da nascente.

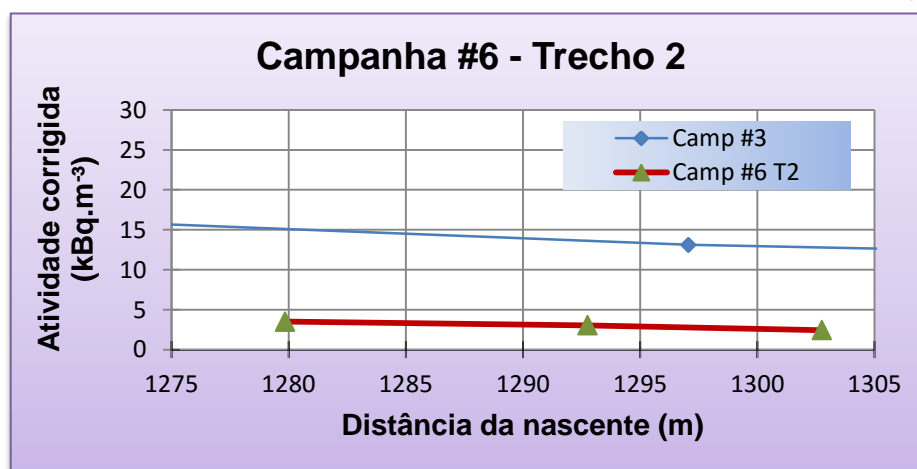
Das 32 amostras coletadas no trecho 2 aproveitaram-se apenas seis devido ao fato do tempo necessário para análise do  $^{222}\text{Rn}$  no RAD7 ter superado em mais de duas meias vidas do radionuclídeo, cerca de oito dias, o que causou falhas nas análises. As amostras em duplicidade de menor valor em cada ponto foram descartadas, os dados válidos podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas na Campanha #6, Trecho 2.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq.m}^{-3}$ )
7,57	1280	29/09/2015 09:55	05/10/2015 14:40	$3,51 \pm 1,30$
7,58	1293	29/09/2015 09:45	05/10/2015 13:10	$3,05 \pm 1,23$
7,61	1303	29/09/2015 09:35	05/10/2015 10:15	$2,45 \pm 1,40$

Fonte: elaborado pelo autor.

Os três pontos amostrados em T2 estão representados graficamente na Figura 50, bem como, o ponto 7,6 da Campanha #3.

Figura 50 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no Trecho 2 da Campanha #6.

Fonte: elaborado pelo autor.

O Trecho 3 está situado a jusante de T1 e T2, entre 1834 e 2007 m da nascente, na porção baixa do córrego da Matinha, onde se coletaram amostras de água em duplicidade em onze pontos. Os dados válidos estão descritos na Tabela 10.

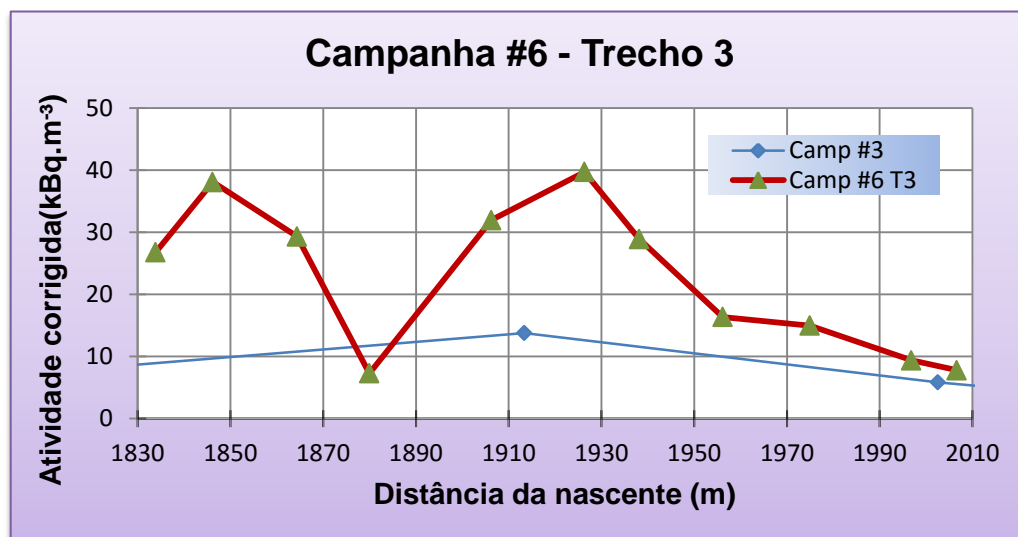
Tabela 10 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas na Campanha #6, Trecho 3.

Amostra do ponto	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq.m}^{-3}$ )
9,1	1834	29/09/2015 15:05	02/10/2015 11:05	$26,76 \pm 1,76$
9,22	1846	29/09/2015 14:55	02/10/2015 13:38	$38,07 \pm 2,10$
9,24	1864	29/09/2015 14:42	02/10/2015 12:25	$29,31 \pm 2,80$
9,26	1880	29/09/2015 14:26	02/10/2015 09:16	$7,28 \pm 1,60$
9,28	1906	29/09/2015 14:12	02/10/2015 14:26	$31,95 \pm 2,78$
9,34	1926	29/09/2015 14:05	01/10/2015 17:00	$39,68 \pm 4,25$
9,4	1938	29/09/2015 13:52	01/10/2015 15:50	$28,89 \pm 0,96$
9,45	1956	29/09/2015 13:47	01/10/2015 14:37	$16,35 \pm 1,55$
9,5	1975	29/09/2015 13:22	01/10/2015 13:20	$14,95 \pm 2,50$
9,58	1997	29/09/2015 13:12	01/10/2015 11:09	$9,36 \pm 0,93$
9,62	2007	29/09/2015 13:00	30/09/2015 15:35	$7,78 \pm 1,42$

Fonte: elaborado pelo autor.

Os onze pontos de T3 estão representados no gráfico da Figura 51, bem como, os pontos 9,3 e 9,6 amostrados na Campanha #3.

Figura 51 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no Trecho 3 da Campanha #6.



Fonte: elaborado pelo autor.

### 6.6.2. Vazão

A conformação física dos trechos T2 e T3 amostrados nessa campanha eram de espriamento das águas em campos bem vegetados formando pântanos. Devido a essa conformação, o uso do fluorímetro se tornou inviável e outros trechos, estudados anteriormente, foram escolhidos para execução das medidas de vazão.

No entanto, as medidas de vazão com o uso do fluorímetro não apresentaram bons resultados nessa campanha. Segundo contato com o fabricante, o problema deveu-se à elevada turbidez da água utilizada para a calibração do equipamento. A água coletada em um trecho do córrego onde a velocidade da mesma era muito lenta, o que contribuiu para o aumento da turbidez (Figura 52).

Figura 52 – Excesso de turbidez na água de calibração do fluorímetro.

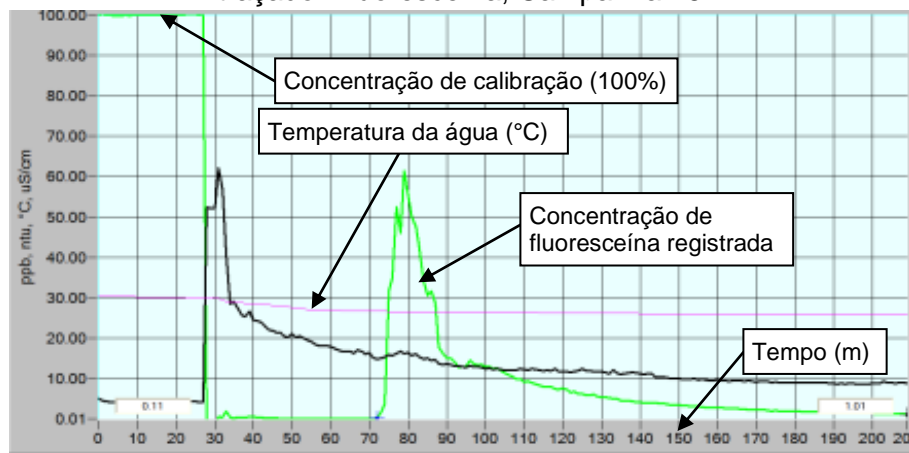


Fonte: elaborado pelo autor.

Nos dias 15 e 16/12/2015 as medidas de vazão foram repetidas e apresentaram bons resultados, efetuaram-se quatro experimentos de montante para jusante, cujos resultados foram crescentes. As duas medidas do dia 15/12 foram no meio da seção de varredura 1 (V1) e no exutório do córrego da Matinha. No dia 16/12 foram a montante e a jusante da seção de varredura 2 (V2), ambas seções descritas na Campanha #4.

Na seção de V1 a vazão foi medida no ponto médio do trecho e o gráfico das leituras pode ser visto na Figura 53 onde está representada a concentração de traçador registrada no tempo em minutos, que registrara vazão de  $2,1 \text{ L.s}^{-1}$ . A curva verde representa o percentual da massa de fluoresceína recuperada, a curva magenta representa a temperatura da água no momento dos registros e a curva em preto representa a turbidez da água.

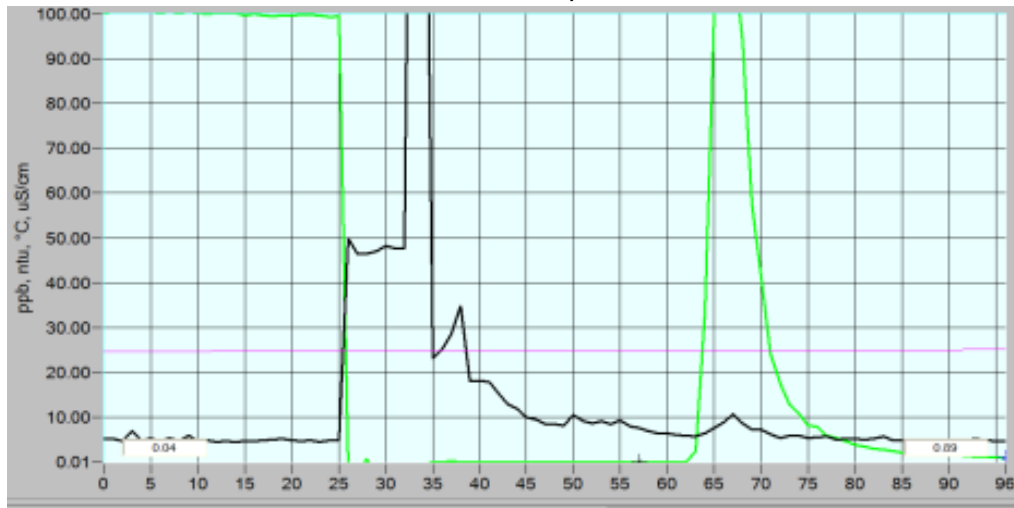
Figura 53 – Recuperação de massa no meio da seção V1 – vazão de  $2,1 \text{ L.s}^{-1}$ . (15/12/2015) traçador: fluoresceína, Campanha #6.



Fonte: (Ferreira, 2016).

Como já era esperada, a vazão encontrada no exutório do córrego, 3,54L/min, foi significativamente maior do que as vazões registradas nessa campanha à montante. A curva de recuperação de massa de fluoresceína pode ser observada na Figura 54.

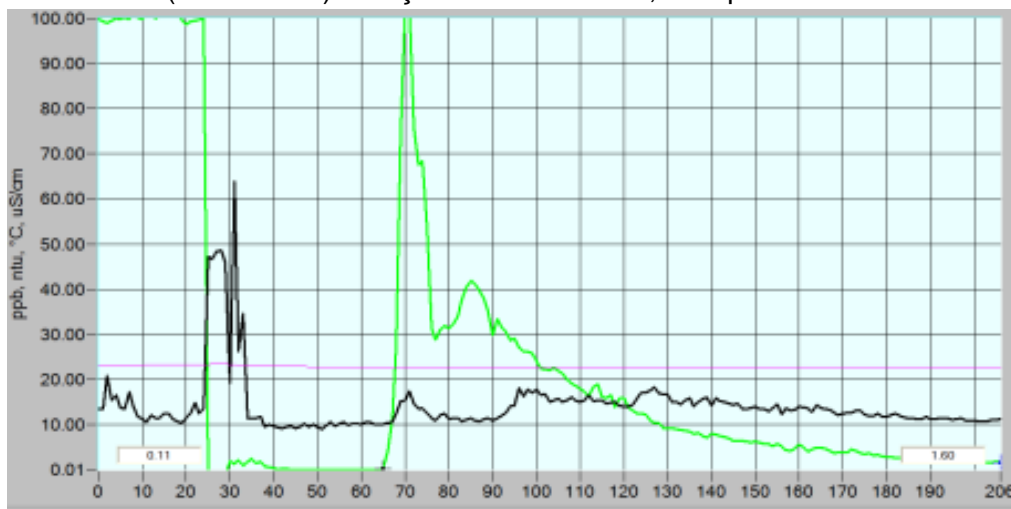
Figura 54 – Recuperação de massa no exutório – vazão de 3,54 L.s<sup>-1</sup>. (15/12/2015) traçador: fluoresceína, Campanha #6.



Fonte: (Ferreira, 2016).

No gráfico da Figura 55 é representada medida de vazão ocorrida à montante da seção V2, que registrara 1,13 L.s<sup>-1</sup> no dia 16/12, que satisfizes a expectativa de menor vazão registrada na campanha.

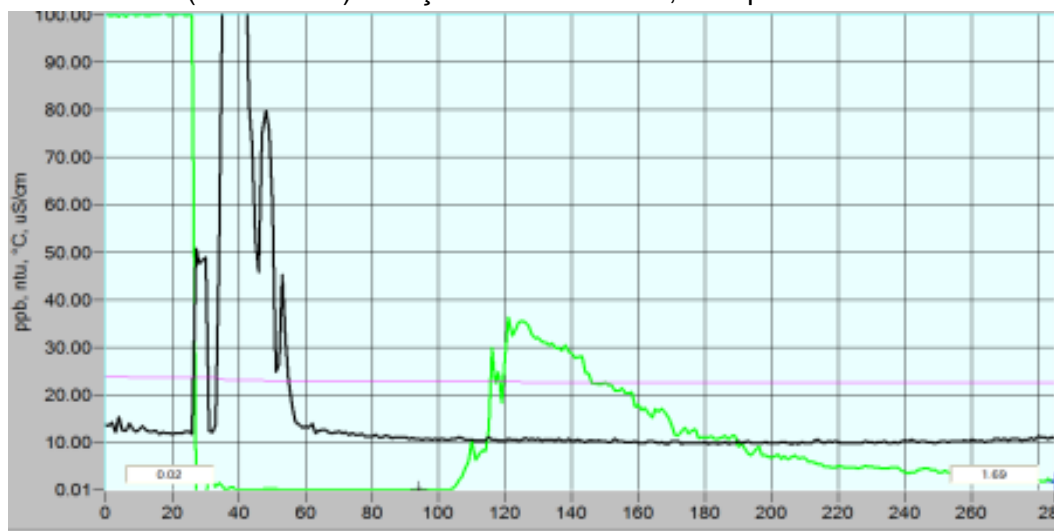
Figura 55 – Recuperação de massa a montante da seção V2 – vazão de 1,13 L.s<sup>-1</sup>. (16/12/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #6.



Fonte: (Ferreira, 2016).

A Figura 56 apresenta o gráfico gerado pelo software FLUO para a leitura da injeção a jusante da seção V2, que no dia 16/12 registrara vazão de 1,19 L.s-1.

Figura 56 – Recuperação de massa a jusante da seção V2 – vazão de 1,19 L.s<sup>-1</sup>.  
(16/12/2015) – traçador: fluoresceína, Campanha #6.



Fonte: (Ferreira, 2016).

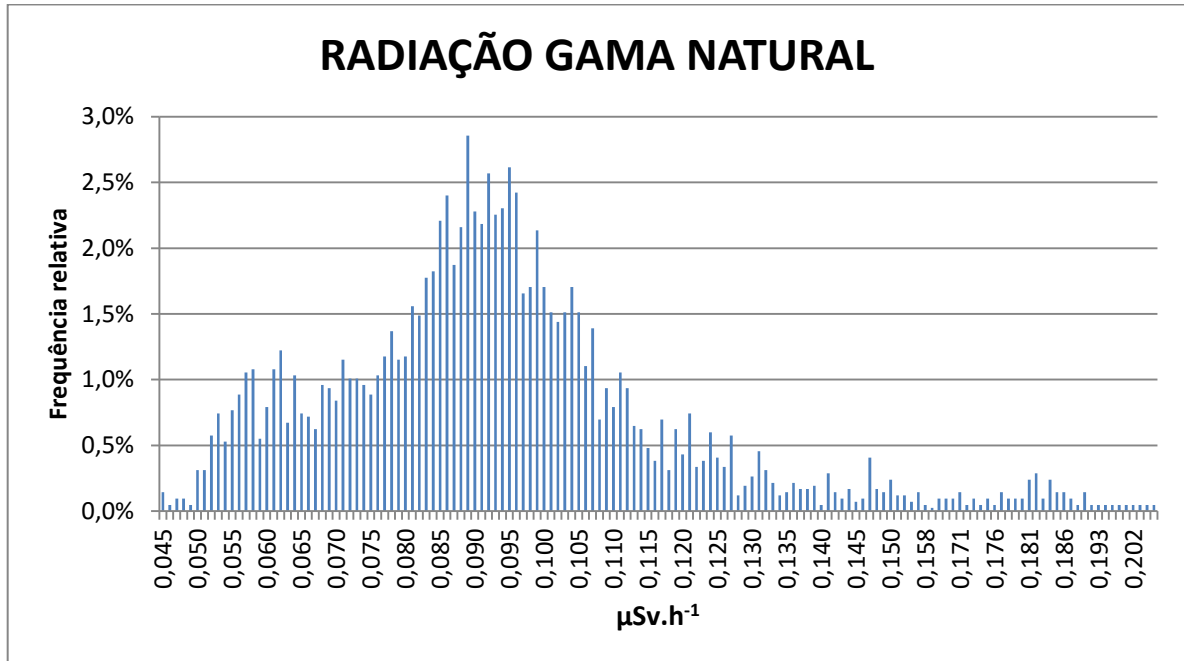
## 6.7. Resultados da Campanha #7 – 21 a 23/03/2016

Nesta campanha, foi realizado um levantamento da radiação gama natural. Essa varredura buscou registrar os níveis de radiação gama natural existentes no córrego e verificar se se correlacionavam com os valores de atividade de <sup>222</sup>Rn medidos nas águas do córrego.

A varredura foi feita com o scanner de radiação espectral, mochila, descrito na seção 4.8. Monitor de radiação gama e registrou baixa atividade de radiação gama natural no local.

Trataram-se estatisticamente os dados da radiação gama registrado em varredura ao longo do talvegue e das margens do Córrego da Matinha. Foram 4.168 pontos registrados e o maior valor encontrado foi de 0,219  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  e o menor foi 0,089  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ . O histograma da Figura 57 fornece a frequência percentual com que os valores se repetiram durante a varredura.

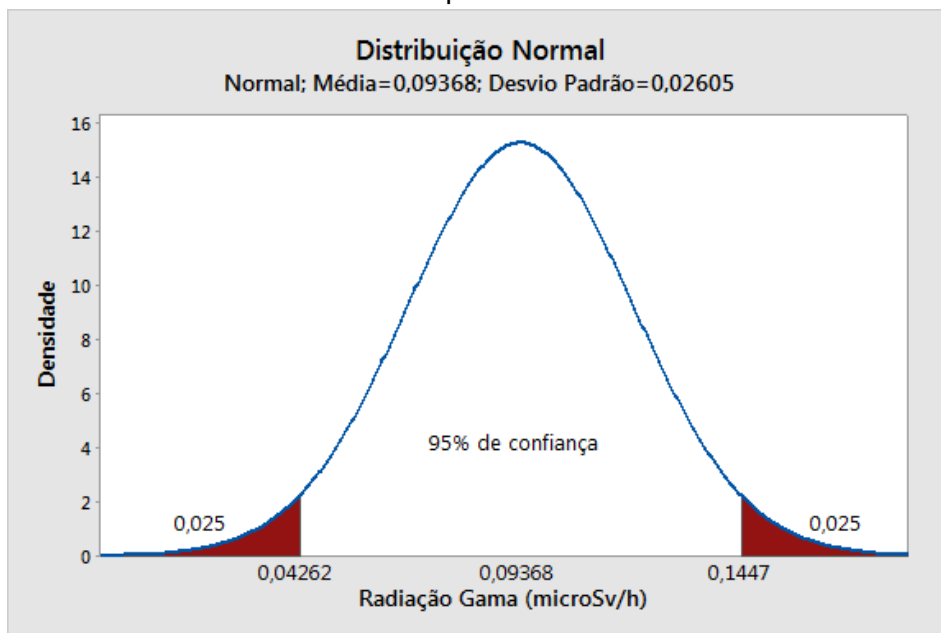
Figura 57 – Histograma da frequência relativa das radiações registradas no córrego da Matinha, Campanha #7.



Fonte: elaborado por Igor Felipe Silva Moura

Em uma distribuição normal destes dados (Figura 58), observa-se que os dados amostrais indicam que 95% da radiação gama natural registrada na região estudada tem taxa de dose entre  $0,0426$  e  $0,1447 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Figura 58 – Gráfico da distribuição normal das radiações registradas no Córrego da Matinha Campanha #7.

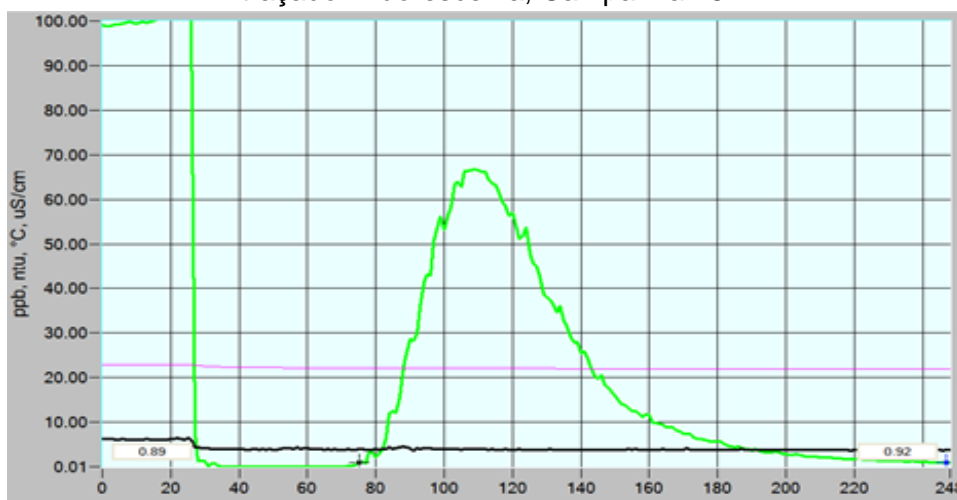


Fonte: elaborado por Pedro Henrique Dutra

## 6.8. Resultados da Campanha #8 – 10/05/2016

Fez-se no dia 10/05 a primeira medida de vazão na queda d'água, a aproximadamente 1600 m da nascente do córrego da Matinha, tendo a fluoresceína como traçador. A vazão registrada pelo fluorímetro foi de  $3,06 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  e o gráfico gerado é apresentado na Figura 59.

Figura 59 – Recuperação de massa na queda d'água – vazão de  $3,06 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . (10/05/2016)  
traçador: fluoresceína, Campanha #8.



Fonte: (Ferreira, 2016).

A segunda medida usando a fluoresceína como traçador ocorreu no meio do trecho de varredura V1, a aproximadamente 700 m da nascente e o registro no trecho foi de  $2,59 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , como apresentado no gráfico de recuperação de massa da Figura 60.

Figura 60 – Recuperação de massa no trecho V1 – vazão de  $2,59 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . (10/05/2016)  
traçador: fluoresceína, Campanha #8.



Fonte: (Ferreira, 2016).

### 6.9. Resultados da Campanha #9 – 16 e 17/05/2016

Esta campanha foi realizada para se fazer análise de  $^{222}\text{Rn}$  nos pontos de interesse que ainda não haviam sido contemplados pelas campanhas anteriores, bem como, os pontos perdidos em T2 da Campanha #6. A Tabela 11 apresenta os maiores valores de atividade encontrados por ponto amostrado no córrego da Matinha.

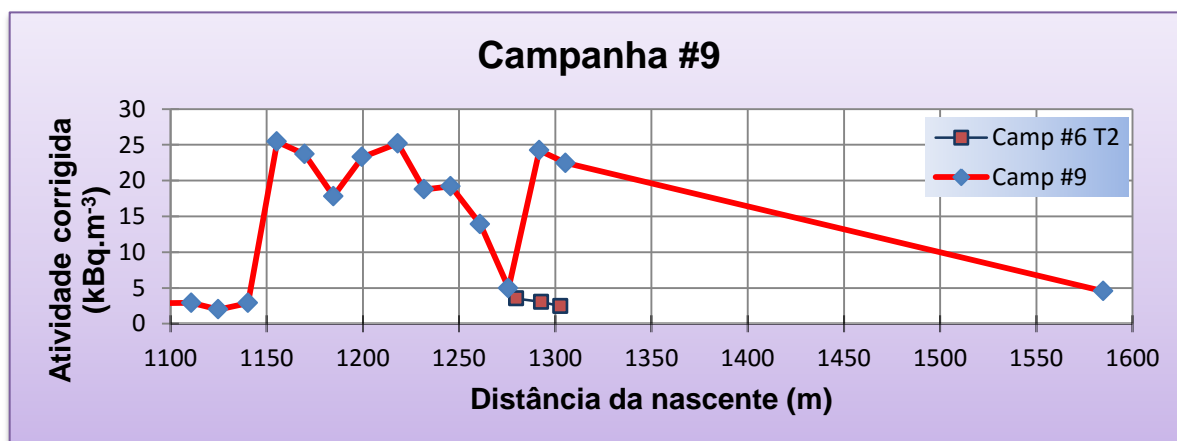
Tabela 11 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas na Campanha #9.

Amostra	Distância da nascente (m)	Coleta Data/hora	Análise Data/hora	Atividade do $^{222}\text{Rn}$ (Bq.m <sup>-3</sup> )
2,1	265	17/05/2016 10:10	18/05/2016 16:06	0,14 ± 0,18
7,1	1111	16/05/2016 17:30	18/05/2016 12:25	2,92 ± 0,98
7,12	1125	16/05/2016 17:20	18/05/2016 13:44	2,00 ± 0,63
7,13	1140	16/05/2016 17:05	18/05/2016 12:25	2,89 ± 0,80
7,14	1155	16/05/2016 16:55	18/05/2016 11:48	25,45 ± 3,55
7,35	1170	16/05/2016 16:43	18/05/2016 11:03	23,69 ± 1,86
7,43	1185	16/05/2016 16:25	17/05/2016 12:28	17,80 ± 0,90
7,45	1200	16/05/2016 16:15	17/05/2016 11:46	23,30 ± 1,60
7,47	1218	16/05/2016 16:00	17/05/2016 11:05	25,18 ± 2,30
7,49	1232	16/05/2016 15:50	17/05/2016 10:27	18,76 ± 0,89
7,51	1246	16/05/2016 15:40	17/05/2016 09:20	19,20 ± 0,43
7,53	1261	16/05/2016 15:25	17/05/2016 08:39	13,90 ± 1,13
7,55	1276	16/05/2016 15:05	16/05/2016 17:22	4,99 ± 0,74
7,575	1292	16/05/2016 14:55	16/05/2016 16:43	24,23 ± 2,32
7,7	1305	16/05/2016 14:40	16/05/2016 15:41	22,47 ± 0,65
8,1	1585	17/05/2016 11:00	18/05/2016 15:23	4,56 ± 1,51

Fonte: elaborado pelo autor.

Desprezados os pontos duplicados de menor valor e os nulos, obtém-se um gráfico como o apresentado na Figura 61, que também apresenta pontos do trecho 2 na Campanha #6.

Figura 61 – Gráfico das atividades encontradas na Campanha #9.



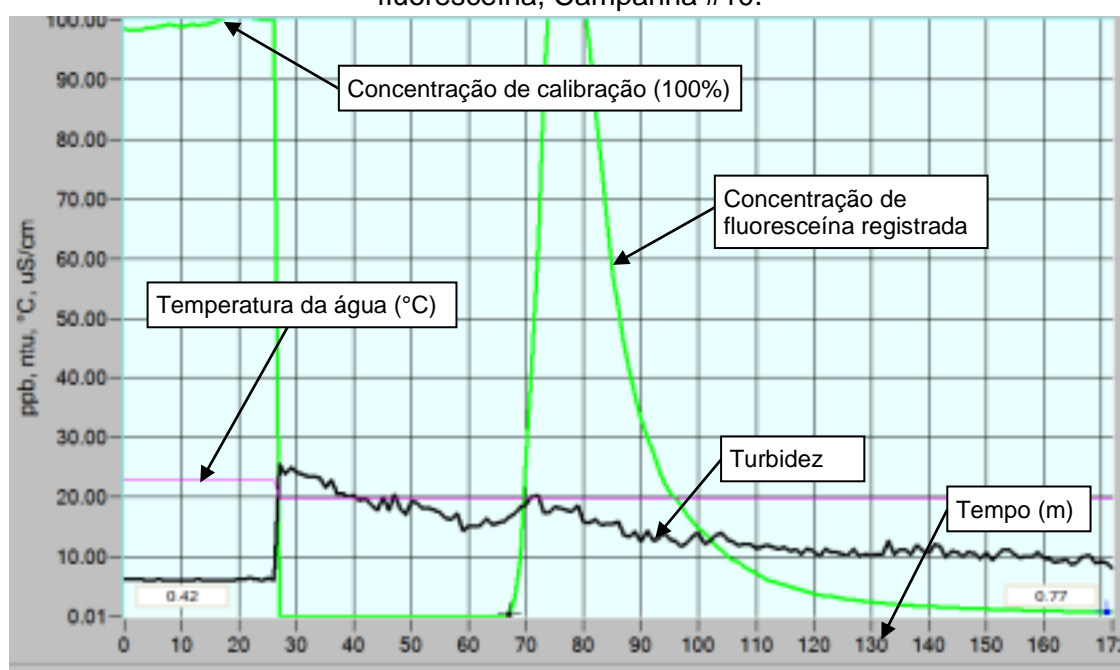
Fonte: elaborado pelo autor.

## 6.10. Resultados da Campanha #10 – 24/05/2016

No dia 24 de maio foram realizados os últimos experimentos para medidas de vazão no Córrego da Matinha.

Inicialmente injetaram-se 100 mg de fluoresceína próximo ao exutório, a 2.150 m da nascente e a vazão registrada foi de  $4,76 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figura 62).

Figura 62 – Recuperação de massa no exutório – vazão de  $4,76 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . (24/05/2016) traçador: fluoresceína, Campanha #10.



Fonte: (Ferreira, 2016).

Posteriormente 100 mg de fluoresceína foram injetadas para medir a vazão no ponto médio da seção de varredura V2 descrita na Campanha #4. A Figura 63 apresenta o gráfico dos registros do fluorímetro GGUN FL-30.

Figura 63 – Recuperação de massa na seção V2 – vazão de 1,83 litros/seg. (24/05/2016)  
traçador: fluoresceína, Campanha #10.



Fonte: (Ferreira, 2016).

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

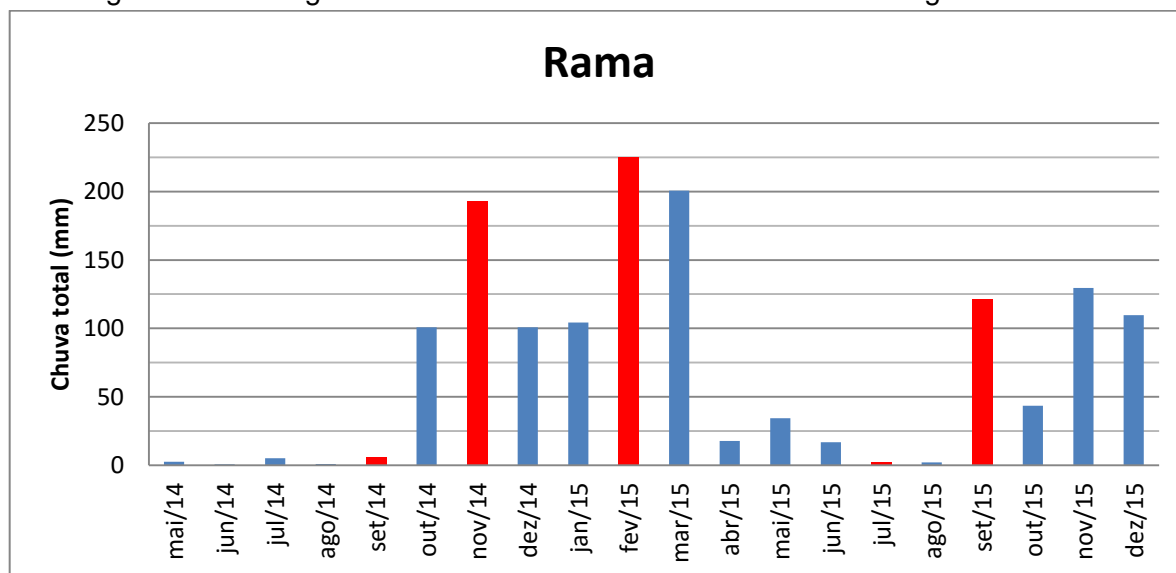
Neste capítulo é apresentada uma análise dos dados experimentais obtidos durante a evolução do método empírico desenvolvido no decorrer desse estudo.

### 7.1. Pluviosidade

Até dezembro de 2015 o CDTN possuía um pluviógrafo instalado na microbacia do córrego da Matinha, denominado Rama, que foi utilizado para prover diversos estudos desenvolvidos na região (Chagas, *et al.*, 2010; Drumond, 2000; Drumond, *et al.*, 2001; Drumond, 2004; Ferreira, *et al.*, 2015b).

Durante o período deste estudo, o pluviógrafo Rama registrou um acumulado de 1.120 mm de chuva para o ano hidrológico 2014/2015 (Figura 64). As barras em vermelho representam os meses nos quais as campanhas ocorreram. A pluviosidade registrada pelo pluviógrafo Rama ficou abaixo da média da série histórica de 36 anos hidrológicos (1977/1978 a 2012/2013) registrados no pluviógrafo instalado na Fazenda Laranjeiras, que foi de 1.525 mm (ANA, 2016).

Figura 64 – Histograma da chuva mensal na microbacia do córrego da Matinha.



Fonte: elaborado pelo autor.

A baixa pluviosidade no período fez com que a recarga dos aquíferos livres predominasse na alimentação do córrego da Matinha, tornando as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  mais evidentes e relativamente mais altas nas seções de interconexão observadas. De certa forma, esse

fenômeno meteorológico contribuiu para evidenciar essas seções de descarga dos aquíferos, pois, se houvesse excesso de chuva, as águas superficiais é que estariam alimentando o aquífero num processo inverso da exfiltração ocorrida e, conseqüentemente, não haveria atividade de  $^{222}\text{Rn}$  evidente ou apresentariam concentrações muito baixas (Sophocleous, 2002; Baskaran, *et al.*, 2009).

## 7.2. Vazão

Realizaram-se seis campanhas para medida de vazão. Após os primeiros experimentos e consultas ao fabricante do fluorímetro, os resultados começaram a ter mais qualidade e puderam-se conhecer as vazões nos trechos estudados.

Foram definidos quatro trechos para medidas de vazão: varredura dois V2; varredura um V1; queda d'água e; exutório. Estas escolhas se devem às condições de acesso e de se obter a homogeneidade na mistura do traçador fluorescente com a água. Embora estas condições sejam suficientes para o processo de medida, alguns fatores como as zonas mortas existentes devido à profundidades maiores e as escavações laterais contribuem para o aumento do tempo de trânsito do traçador. Neste caso o fator impeditivo foi a duração das baterias do notebook usado para coletar os dados de recuperação de massa e o acompanhamento visual da nuvem do traçador. Sabendo que a vazão pode variar de um momento para o outro, consideraram-se representativas ou válidas apenas aquelas feitas em dois pontos no mínimo e registradas no mesmo dia. O Quadro 3 apresenta as vazões representativas registradas ao longo do córrego da Matinha.

Quadro 3 – Vazões representativas ao longo do córrego da Matinha.

Vazões representativas medidas no córrego da Matinha ( $\text{L.s}^{-1}$ )								
Denominação local	V2			V1			Queda d'água	Exutório
Dist. da nascente (m)	350	400	500	600	700	800	1600	2150
15/07/2015	1,75 $\pm$ 0,05		2,10 $\pm$ 0,06					
03/08/2015			2,40 $\pm$ 0,10			2,80 $\pm$ 0,11		
16/12/2015	1,13 $\pm$ 0,05		1,19 $\pm$ 0,05		2,10 $\pm$ 0,09			3,54 $\pm$ 0,14
10/05/2016					2,59 $\pm$ 0,11		3,06 $\pm$ 0,12	
24/05/2016		1,83 $\pm$ 0,07						4,76 $\pm$ 0,19

Fonte: elaborado pelo autor.

### 7.3. Radioatividade gama natural

A elevação da taxa de exposição devido à radiação natural pode ocorrer independentemente da exploração mineral, por se tratar de fenômeno geológico presente na região mesmo antes do período paleolítico (Minas Gerais. Secretaria de Estado de Saúde, 2009). Como não existem indústrias nem mineradoras na microbacia do córrego da Matinha, que pudessem ter deixado rejeitos minerais no local, pode-se dizer que toda radiação registrada nessa microbacia é proveniente de isótopos radioativos naturais, que estão presentes em solos, rochas, água, atmosfera e seres vivos (UNSCEAR, 2000).

A exposição média da radiação encontrada foi  $0,094 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ , o equivalente a  $0,82 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ . Esta média, na tabela de classificação das áreas de radioatividade<sup>4</sup> segundo a dose efetiva da radiação natural gama terrestre, é dada como Normal, para doses médias menores que  $5,0 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$  (Minas Gerais. Secretaria de Estado de Saúde, 2009).

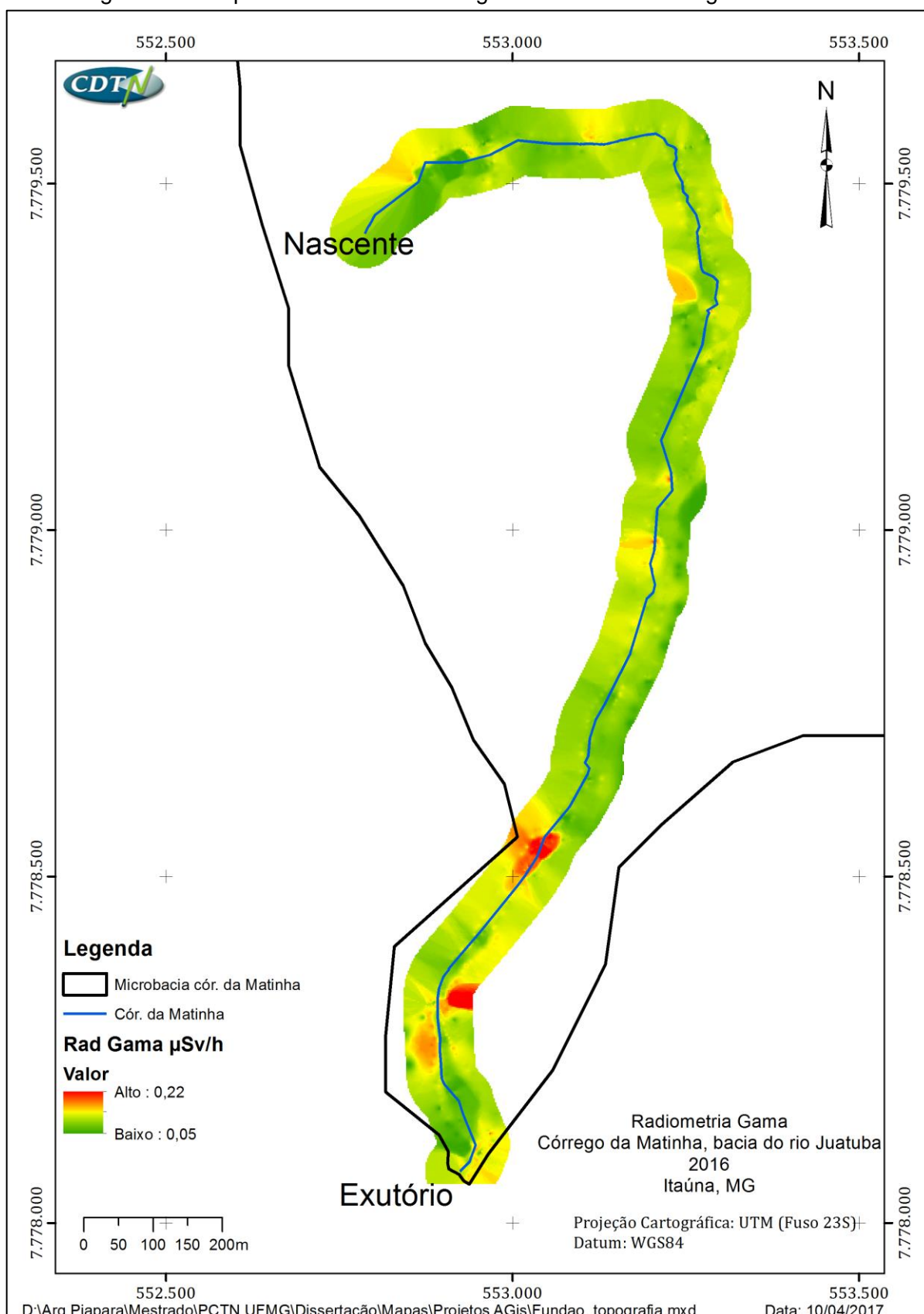
Para se ter uma ideia das áreas com radioatividade natural média Elevada temos o Sudão com  $38,4 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ , a Índia com  $31,4 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ ; com radioatividade natural Média cita-se Ramsar com  $20,4 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$  e Mahallat com  $14 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$  – ambas as localidades situadas no Irã. Em alguns estudos no Brasil encontramos áreas com radioatividade Normal em: Rio de Janeiro, RJ, áreas de preservação no Recreio dos Bandeirantes,  $0,65 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ ; Guarapari, ES, áreas urbanas,  $0,73 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ ; Poços de Caldas, MG, área urbana,  $0,91 \text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$  (Minas Gerais. Secretaria de Estado de Saúde, 2009).

O mapa radiométrico da região de estudo (Figura 65) apresenta uma interpolação de 50 m para cada lado da margem a partir do talvegue do córrego da Matinha da distribuição espacial da radiação natural gama terrestre registrada.

---

<sup>4</sup> Tabela de classificação das áreas de radioatividade segundo a dose efetiva média da radiação natural gama terrestre ( $\text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$ ): Normal <5; Médio 5 a 20; Elevado 20 a 50; Muito Elevado >50. Fonte: (UNSCEAR, 2000; Minas Gerais. Secretaria de Estado de Saúde, 2009).

Figura 65 – Mapa radiométrico do talvegue e entorno do córrego da Matinha.



Fonte: elaborado por Paulo Rodrigues – LABGEO/CDTN.

## 7.4. Atividade do $^{222}\text{Rn}$

As campanhas realizadas para medida de atividade de  $^{222}\text{Rn}$  evidenciam a existência de quatro seções de interconexão com o aquífero.

Esperava-se atividade de  $^{222}\text{Rn}$  mais elevada nos primeiros cem metros, por causa da proximidade com a nascente. No entanto, as condições experimentais, tais como a falta de acesso por causa das cercas instaladas no local, arborização densa, excesso de matéria orgânica e atoleiros, impediram a realização pormenorizada de coleta de amostras para análise de  $^{222}\text{Rn}$  próximo à nascente.

As maiores atividades de  $^{222}\text{Rn}$  registradas ao longo do córrego da Matinha (Figura 66) apresentaram quatro conjuntos de seções de descarga que se destacaram dos demais pontos a partir da seção de nascente.

O primeiro conjunto, entre 350 e 500 m, compreende os dados da varredura 2. O segundo conjunto, entre 600 e 800 m, contempla também os dados da varredura 1. Estes dois conjuntos apresentaram valores semelhantes de atividade com média de 32,1 e 28,3  $\text{kBq.m}^{-3}$ , respectivamente. Quando consideramos apenas os valores de atividade acima de 20  $\text{kBq.m}^{-3}$  as médias se elevam para 35,4 e 38,7  $\text{kBq.m}^{-3}$ .

O terceiro conjunto, entre 1150 e 1350 m, bem como, o quarto conjunto, entre 1800 e 2000 m, também apresentaram valores médios semelhantes de atividade, 19,8 e 22,2  $\text{kBq.m}^{-3}$  respectivamente. Quando se considera apenas as atividades superiores a 20  $\text{kBq.m}^{-3}$  as médias se elevam para 27,9 e 32,4  $\text{kBq.m}^{-3}$ , respectivamente.

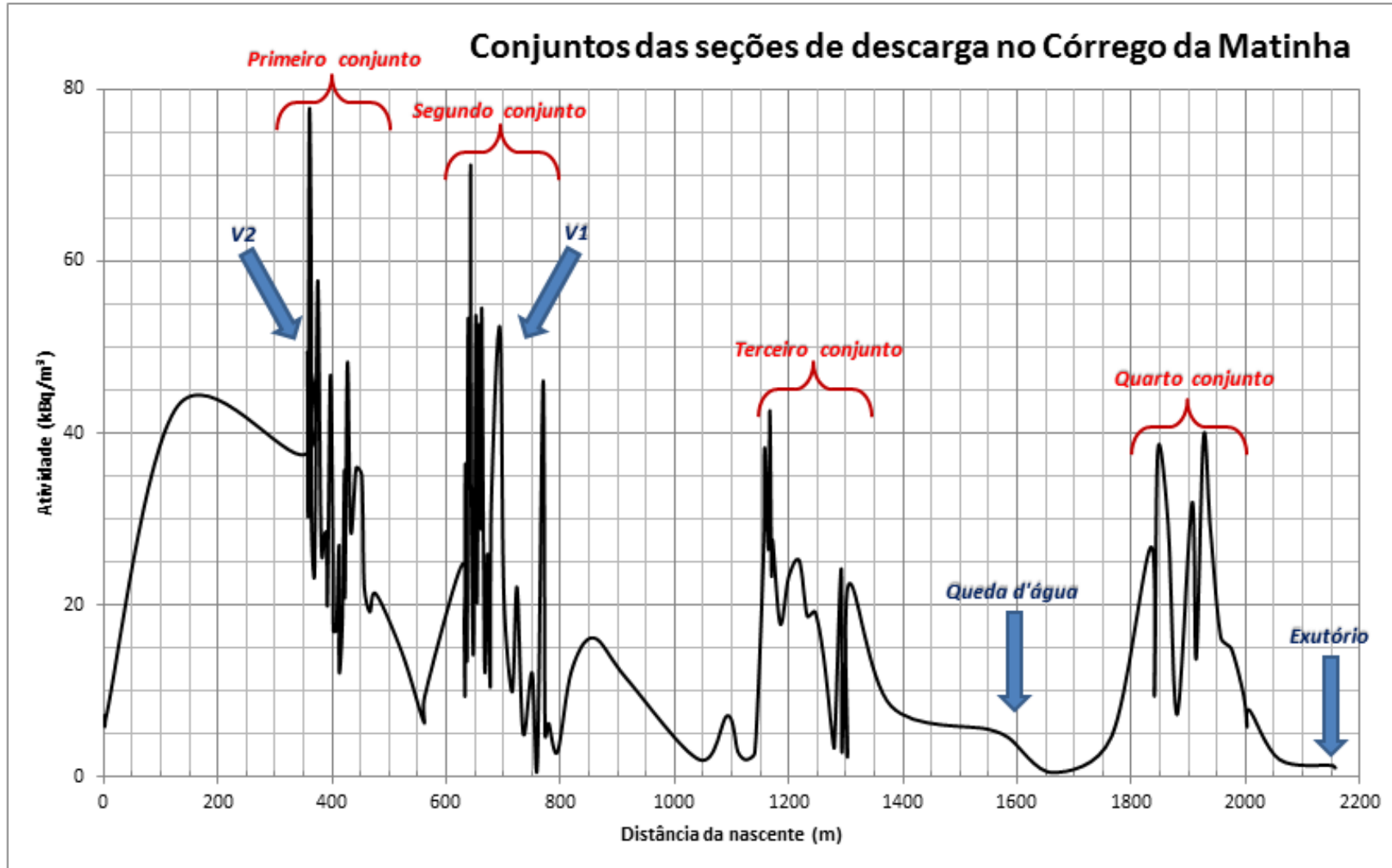
O Quadro 4 apresenta a atividade média de  $^{222}\text{Rn}$  nos quatro conjuntos identificados como os mais proeminentes de toda extensão. Neste quadro todas as atividades abaixo de 20  $\text{kBq.m}^{-3}$  foram excluídas com a intenção de se comparar as maiores contribuições dos quatro conjuntos.

Quadro 4 – Atividades médias de  $^{222}\text{Rn}$  nos principais trechos do córrego da Matinha.

Atividades médias para trechos acima de 20 $\text{kBq.m}^{-3}$				
Dist nascente (m)	350-500	600-800	1150-1350	1800-2000
Conjuntos	Primeiro	Segundo	Terceiro	Quarto
Ativ. média ( $\text{kBq.m}^{-3}$ )	35,4	38,7	27,9	32,4

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 66 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  determinadas ao longo do córrego da Matinha.

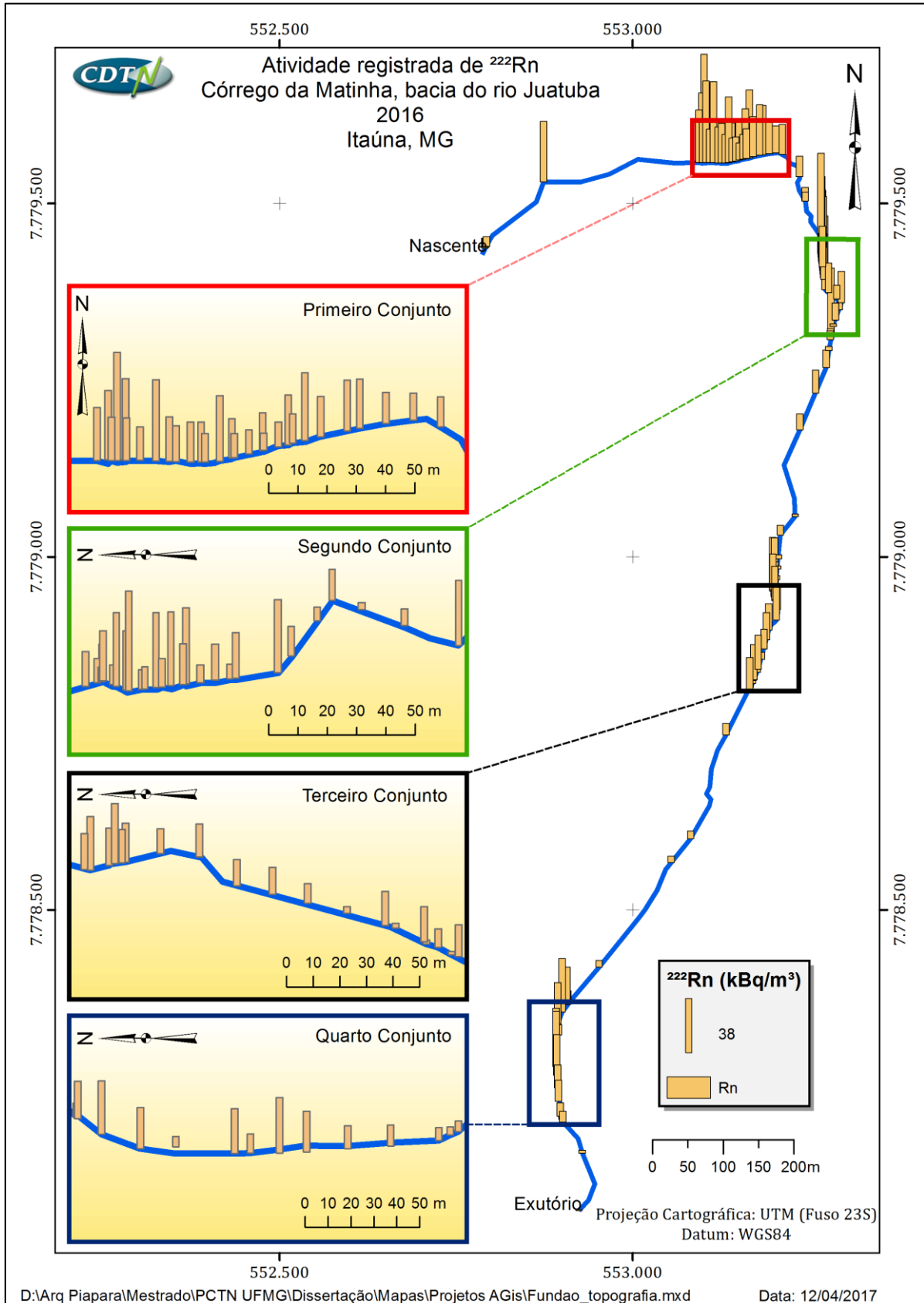


Fonte: elaborado pelo autor.

As atividades de  $^{222}\text{Rn}$  obtidos ao longo do córrego (Figura 67) são úteis para compreender a extensão dos processos hidrogeológicos na interface córrego-aquífero. Os resultados da amostragem deste isótopo ambiental indicaram que a área superior do córrego está ligada e ativamente recarregada pelo que Baskaran, *et al.* (2009) chamam de “quase-corrente” aluvial rasa do aquífero. Estes autores afirmam que as “águas subterrâneas e superficiais são hidráulicamente ligadas em muitas paisagens”.

No entanto, um pouco diferente do que afirmam estes autores de que a descarga dos aquíferos rasos é difusa durante eventos de precipitação mais à montante do rio, neste estudo a descarga ocorre também de outra forma. Embora a descarga difusa ocorra a montante do córrego, até 800 m da nascente, a descarga dos aquíferos ocorre também na porção média e na porção baixa do córrego. Pode-se creditar essa diferença à conformação das vertentes dessa microbacia, classificadas como relevo forte ondulado (Quadro 2), que se mostram encaixantes na porção baixa do córrego da Matinha e promovem uma “quase-corrente” dos aquíferos rasos nestes trechos.

Figura 67 – Atividades de  $^{222}\text{Rn}$  ao longo do córrego da Matinha.

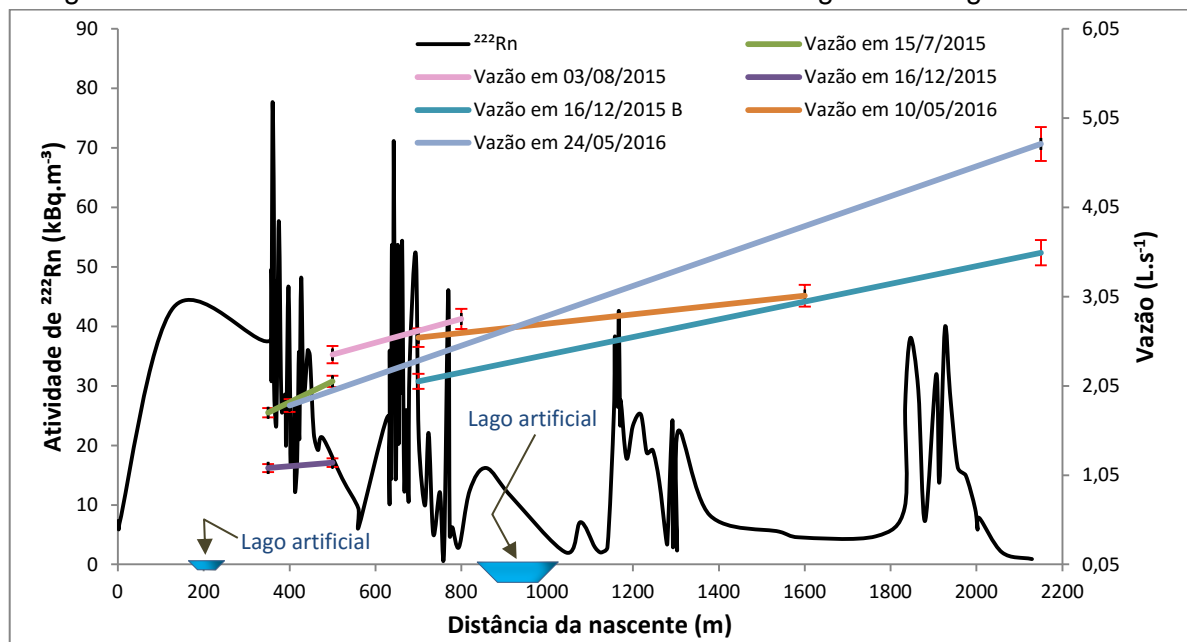


Fonte: elaborado por Paulo Rodrigues – LABGEO/CDTN.

## 7.5. Atividade de $^{222}\text{Rn}$ versus vazões e radiação gama

Além da descarga do aquífero na região de nascente, a atividade de  $^{222}\text{Rn}$  em conjunto com as vazões medidas evidenciam quatro seções de descarga do aquífero: a região alta, entre 350 e 500 m; a região médio-alta, entre 600 e 800 m; a região média, entre 1.150 e 1.350 m e; a região baixa, entre 1.800 e 2.000 m da nascente. Essa relação pode ser observada no gráfico que contém a curva de atividade de  $^{222}\text{Rn}$  em conjunto com as vazões medidas, separadas por dia de medição e em cinco trechos do córrego (Figura 68). Todas as curvas de vazão inseridas no gráfico, juntamente com respectivos erros, apresentaram média ascendente nos trechos onde a atividade de  $^{222}\text{Rn}$  se pronunciou, exceto no trecho jusante ao lago artificial, – curva do dia 10/05/2015 – local onde, provavelmente, ocorreu captação de água durante as medições de vazão.

Figura 68 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  e vazões ao longo do córrego da Matinha.



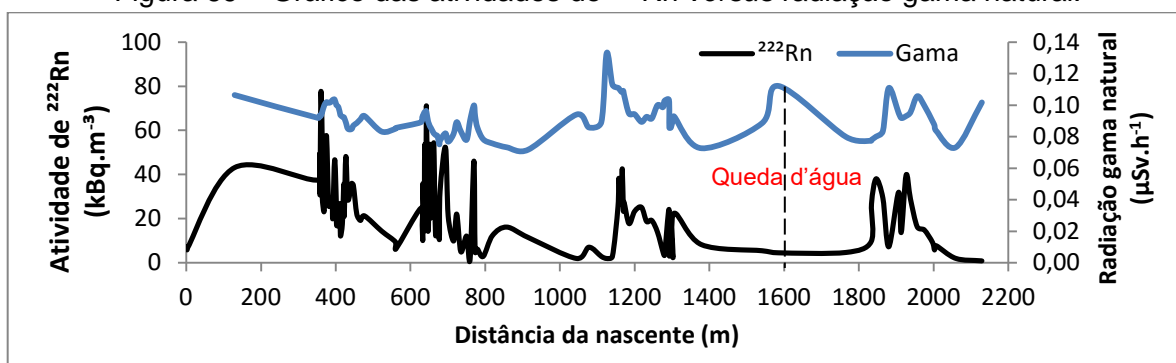
Fonte: elaborado pelo autor.

A radiação gama natural apresentou baixas taxas de radioatividade e não demonstrou correlação linear com as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas. O cálculo para a correlação linear apresentou o valor de 0,1086.

No entanto, quando se observa o gráfico da atividade de  $^{222}\text{Rn}$  versus radiação gama natural (Figura 69) nota-se que existe correlação visual positiva em alguns trechos e correlação inversa em outros. A 1.600 m de distância da nascente, por exemplo, observa-se uma elevação da radiação natural, que está relacionada à presença de trecho encachoeirado,

com afloramento rochoso na queda d'água, assim como, em diversos trechos com rochas aflorantes. Ao mesmo tempo em que se observa elevação da radiação gama natural nesses trechos, registrou-se diminuição na atividade de  $^{222}\text{Rn}$ , que foi provocado pela dispersão desse radônio no ar devido à turbulência que promove borbulhas na água e facilita a fuga do gás  $^{222}\text{Rn}$ .

Figura 69 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  versus radiação gama natural.



Fonte: elaborado pelo autor.

## 8. CONCLUSÕES

Com base nos trabalhos e estudos desenvolvidos as conclusões podem ser apresentadas segundo duas abordagens distintas: uma discorre sobre os processos que ocorrem no córrego da Matinha e outra sobre o método aplicado.

### 8.1. O córrego da Matinha

Como ator principal deste estudo, o córrego da Matinha é um corpo hídrico em mutação, pois quando se conhece o sujeito através da sua investigação e publicação dos resultados, de certa forma modifica-se esse sujeito.

O córrego da Matinha é um corpo hídrico perene enquanto as chuvas se mantiverem acima de 1.000 mm/ano conforme descrito em CETEC (1983). Conclui-se que as águas do córrego são mantidas por aquíferos rasos de razoável capacidade de armazenamento, com base na baixa flutuação das vazões observadas e medidas durante os períodos seco e úmido.

As vazões medidas evidenciam quatro seções de descarga do aquífero: a região alta, entre 350 e 500 m; a região médio-alta, entre 600 e 800 m; a região média, entre 1.150 e 1.350 m e; a região baixa, entre 1.800 e 2.000 m da nascente.

Quanto à radiação gama natural medidas, esta apresentou baixas taxas de radioatividade e não demonstrou correlação linear com as atividades de  $^{222}\text{Rn}$  medidas.

Este estudo sugere que o comportamento semelhante entre as curvas de radiação gama natural e de atividade  $^{222}\text{Rn}$  em alguns trechos de intercomunicação pode ser devido a três hipóteses:

- 1) A distância do sensor gama à rocha base, associada a blindagens oriundas das diferentes espessuras da camada de solo (medições nas margens do córrego), dos sedimentos e do próprio espelho d'água (medições sobre a água). Assim, esses fatores influenciariam nas taxas de radiação gama encontradas de forma inversamente proporcional, ou seja, quanto maiores essas blindagens, menores serão as taxa de radiação gama natural;
- 2) Os teores de  $^{222}\text{Rn}$  em água subterrânea, por outro lado, são controlados somente pelo tempo de contato entre a água e os grãos dos ambientes contendo  $^{226}\text{Ra}$ . No entanto, alguns trechos de intercomunicação entre águas superficiais e subterrâneas

podem coincidir com a proximidade da rocha base e registrar, tanto maiores atividades de  $^{222}\text{Rn}$ , quanto maiores taxas radiação gama natural;

- 3) A água subterrânea transportou ao longo do tempo geológico minerais com radionuclídeos naturais que se sedimentaram no leito e na superfície de inundação do corpo hídrico. Assim, nos trechos de intercomunicação entre as águas haverá atividade gama maior por causa da proximidade com a exfiltração destes radionuclídeos, em conjunto com o aumento da atividade de  $^{222}\text{Rn}$ .

## 8.2. Conclusões sobre o método

Os métodos utilizados no levantamento de dados locais se limitaram às características físicas do córrego da Matinha.

A técnica de amostragem aplicada foi evoluindo de acordo com as dificuldades encontradas, dentre elas o tempo de amostragem, as profundidades maiores, o excesso de material particulado em suspensão e a vegetação abundante em áreas espraiadas. A coleta de água com seringas funcionou, mas demandava muito tempo em cada ponto de amostragem e se limitava aos locais com pouca profundidade. O excesso de tempo foi suprimido pelo uso de uma bomba peristáltica de baixa vazão, que fez reduzir os tempos de amostragem consideravelmente. O problema de profundidade foi contornado com o uso da mangueira de sucção presa a um bastão de madeira e, posteriormente, o uso do tubo coletor diminuiu a quantidade de sedimentos em suspensão e afastou a vegetação.

Toda esta evolução no desenvolvimento da técnica de amostragem que melhorou a qualidade das coletas, tornando-a adequada para o trabalho executado, trouxe vantagens: a coleta ficou mais rápida e optou-se por coletar amostras em duplicidade, o que fez aumentar em demasia o número de análises. O tempo entre uma análise e outra no RAD7 era de no mínimo trinta minutos e isso fez com que algumas amostras fossem perdidas e o trabalho teve de ser refeito em alguns trechos. Esta perda de amostras ocorreu por causa da meia vida do  $^{222}\text{Rn}$ , que é de 3,82 dias, assim, as análises feitas após duas meias vidas apresentavam problemas técnicos de leitura comprometendo o experimento. Tal ocorrido não impediu a validação do método que, além de diminuir o tempo das amostragens e aumentar a qualidade das amostras nos trabalhos de campo, trouxe resultados concretos para o propósito de se localizar os trechos de interconexão com os aquíferos.

Como os resultados demonstraram que a coleta em duplicidade é uma das melhores maneiras de se medir as concentrações dos isótopos de  $^{222}\text{Rn}$ , porque o gás se perde muito fácil no processo, sugere-se a aquisição de dois ou mais equipamentos RAD7 com kit H<sub>2</sub>O para aumentar o número de amostras por ciclo de análise. Dessa forma a análise dos trechos estudados demandaria menos tempo e os trechos do corpo hídrico estudado poderiam ser maiores ou mais extensos.

Caso se queira replicar o estudo em outro corpo hídrico utilizando o método descrito, recomenda-se observar as características físicas do corpo hídrico a ser estudado, tais como: largura máxima de 1,5 m. e; profundidade máxima de 1,5 m, para que se possam fazer as medidas a vau.

O uso de traçadores fluorescentes sendo lidos continuamente pelo fluorímetro GGUN FL-30 trouxe alguns problemas no início pela falta de experiência dos técnicos no uso do equipamento. Com o tempo as dificuldades foram sendo resolvidas e a operação foi bem sucedida. O fluorímetro GGUN FL-30 foi capaz de fazer a recuperação de massa com incertezas abaixo de 5%, trazendo confiabilidade nas medidas de vazão.

Em corpos hídricos de baixa vazão, semelhantes ao córrego da Matinha, de até  $5\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ , sugere-se usar o fluorímetro GGUN FL-30 em conjunto com bomba peristáltica de baixa vazão, para que não seja necessário mergulhar o fluorímetro na água, procedimento que causa aumento da turbidez e entrada de sedimentos na câmara de leitura do equipamento.

O gráfico de dispersão combinando a atividade de  $^{222}\text{Rn}$  ao longo do corpo hídrico em conjunto com as vazões medidas com traçadores fluorescentes inseridas em um eixo secundário, como mostra a Figura 68 – Gráfico das atividades de  $^{222}\text{Rn}$  e vazões ao longo do córrego da Matinha., se mostrou eficiente para analisar e validar a relação de aumento de vazão com o aumento de atividade dos isótopos de  $^{222}\text{Rn}$ .

Conclui-se que em períodos de pós-moção e de baixa pluviosidade os isótopos de  $^{222}\text{Rn}$  são traçadores eficientes para identificação das seções ou trechos de exfiltração da água subterrânea. O conhecimento da localização dessas seções de descarga dos aquíferos contribui para a execução de um plano de recuperação do corpo hídrico em caso de contaminação, sendo assim um fator de contribuição para o aumento da capacidade de resiliência desse corpo hídrico.

### 8.3. Perspectivas de trabalhos futuros

Ao se fazer uma investigação como a dissertada aqui, percebem-se oportunidades de trabalhos futuros que não faziam parte do escopo desta pesquisa, como as descritas a seguir:

- o acompanhamento das variações freáticas, através da instalação de piezômetros ao longo do córrego da Matinha, pode ser mais um instrumento de comprovação da eficácia do método de identificação das seções de intercomunicação pela atividade de  $^{222}\text{Rn}$ ;
- a medição contínua de torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) ao longo do córrego poderá fornecer informações mais precisas da localização dos pontos de intercomunicação;
- uma geologia de detalhes poderá fornecer mais informações sobre os aquíferos da região e;
- uma análise mineralógica ao longo das margens do corpo hídrico, tais como, os teores de urânio e tório podem fornecer elucidacões contundentes sobre a radiação gama natural.

## Bibliografia

ABAS, 2016. ABAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Educação**. [online] Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao>>. Acesso em: 9 de agosto de 2016.

Albillia Co, s.d. **GGUN-FL Fluorometer Users Manual**. Neuchâtel, Switzerland: Albillia.

ANA, 2015. Agência Nacional de Águas – **Lista de termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos**. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300\\_Portaria\\_149-2015.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300_Portaria_149-2015.pdf)>. Acesso em: 8 de agosto de 2016.

ANA, 2016. **Hidroweb**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acesso em 15 de setembro de 2016.

ANEEL, s.d. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em:<[www.aneel.com.br](http://www.aneel.com.br)>. Acesso em 25 de fevereiro de 2016.

ARAMBURU, Xavier Ortega; BISBAL, Jaume Jorba, 1994. **Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos - I**. 1ª Edição ed. Barcelona: Edicions UPC.

ATOMTEX, 2017. **Mobile Radiation Scanning Systems**. [Online] Disponível em: <http://www.atomtex.com/en/products/radionuclide-identification-devices-rids/at6101c-spectrometer> [Acesso em janeiro de 2017].

BANDEIRA, Jefferson Vianna, 2004. **Desenvolvimento de técnicas nucleares e correlatas para estudos em hidrologia urbana**. Belo Horizonte: Tese (Doutorado– Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG).

Baskaran, S., Ransley, T., Brodie, R. S. & Baker, P., 2009. Investigating groundwater–river interactions using environmental tracers. **Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia**, vol. 56, pp. 13-19.

Bonotto, D. M. & Lima, J. L. N. d., 1997. Transferência de Radônio-222 das Rochas do Planalto de Poços Caldas para as águas. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 127, pp. 189-198.

Bonotto, D. M. & Silveira, E. G. d., 2006. **Geoquímica do Urânio Aplicada às Águas Minerais**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP.

Burnett, W. C., Peterson, R., Moore, W. S. & Oliveira, J., 2008. **Radon and radium isotopes as tracer of submarine groundwater discharge** – Results from the Ubatuba, Brazil SGD assessment intercomparison. s.l.:Estuarine, Coastal and Shelf Science.

Casseti, Valter, 2005. **Geomorfologia**. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia>>. Acesso em 29 de agosto de 2016.

CETEC, 1983. **Determinação do funcionamento hidráulico dos aquíferos, através de parâmetros químicos**, Belo Horizonte: CETEC.

CHAGAS, Cláudio José; CAMARGOS, Cláudio Costa; FERREIRA, Vinícius Verna Magalhães. Monitoramento hidrológico na bacia representativa do rio Juatuba para gestão de recursos hídricos In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, **Anais eletrônicos do evento**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos: ABRH, 2010. CD-ROM.

CHAGAS, Cláudio José; CARVALHO FILHO, Carlos Alberto; PEIXOTO, Cláudia Marques; RODRIGUES, Paulo César Horta; AUGUSTIN, Cristina Helena R. R. DEFINITION OF PRIORITY AREAS FOR MONITORING OF GAMA RADIATION ON THE SURROUNDINGS OF THE CDTN INSTALLATIONS. In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013, Recife, PE, **Anais eletrônicos do INAC 2013**. Associação Brasileira de Energia Nuclear: ABEN, 2013. CD-ROM

Chanyotha, Supitcha; Burnett, W. C; Taniguchi, M; Kritsanawanat, R; Sriployp, P, 2010. Experience in using radon and thoron data to solve environmental and water problems. **Radiation Protection Dosimetry**, vol. 141, pp. 374-378.

CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2011. **Norma CNEN-NN-3.01**. Brasília: DOU.

Cook, P. G., Favreau, G., Dighton, J. C; Tickel, S., 2003. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. **Journal of Hydrology**, vol. 277, pp. 74-88.

CPRM, 2009. **Mapas de Geologia e de Sistemas Aquíferos Piezômetros de Juatuba**. s.l.:CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

Custodio, E. & Llamas, M. R., 1976. **Hidrología Subterránea**. 1ª Edição ed. Barcelona: Ediciones Omega.

Davis, Stanley. N; Thompson, Glenn. M; Bentley, Harold W; Stiles, Gary, 1980. **Ground-water tracers - a short review**. Vol. 18, pp. 14-23.

Dalrymple, G. B., 2004. **Ancient Earth, Ancient Skies: the age of Earth and its cosmic surroundings**. Stanford: Stanford University Press.

DRUMOND, Marcos Machado, 2000. **Aplicação de Técnica de Traçadores ao Estudo de Hidrograma de Cheias na Bacia Representativa de Juatuba-MG**, Belo Horizonte: s.n.

DRUMOND, Marcos Machado, 2004. **A técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à Bacia Representativa de Juatuba - MG**. Belo Horizonte(MG): Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

DRUMOND, Marcos Machado; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira, 2007. Separação de escoamentos utilizando a condutividade elétrica das águas: um estudo realizado na Bacia Representativa de Juatuba – Alto São Francisco. São Paulo: XVII SBRH. **Anais do evento**.

DRUMOND, Marcos Machado et al., 2001. Estimativa da infiltração e da evapotranspiração utilizando a técnica de traçadores na bacia representativa de juatuba. Aracajú: XIV SBRH. **Anais do evento**.

Durrige Radon Instrumentation, 2016. **RAD H2O**. Disponível em: <[http://www.durrige.com/products\\_rad\\_h2o.shtml](http://www.durrige.com/products_rad_h2o.shtml)>. Acesso em 22 de agosto de 2016.

DURRIDGE, 2015. **Rad 7 Radon Detector User Manual**. Disponível em: <<http://www.durrige.com/>>. Acesso em 29 de fevereiro de 2016.

EISBERG, R. & RESNICK, R., 1979. **FISICA QUANTICA - ATOMOS, MOLECULAS, SOLIDOS, NUCLEOS E PARTICULAS**. 23a. Tiragem ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier. 928 p.

EISENBUD, M., 1973. **Environmental Radioactivity**. 2ª Edição ed. New York: Academic Press, Inc..

EISENBUD, M. & GESSELL, T., 1997. **Environmental Radioactivity**. San Diego: Academic Press.

EMBRAPA-SNLCS, 1979. **Súmula da 10a Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, s.n., p. 83.

FABER, M., 2011. **A Importância dos Rios para as Primeiras Civilizações**. Disponível em:<[www.historialivre.com](http://www.historialivre.com)>. Acesso em 18 de setembro de 2015.

Ferreira, V. V., Aleixo, B. L., Chagas, C. J., Ulhoa, B. A., & Dias, A. F., 2012. **Estudos Hidrológicos na Bacia do Juatuba**. In: AyA (Ed.), Congreso Argentina Ambiental 2012. Mar Del Plata.

FERREIRA, V. V. M., 2016. **Aplicação da técnica de traçadores para estudos da inter-relação entre as águas subterrâneas e superficiais na bacia de Juatuba**. Belo Horizonte: s.n.

FERREIRA, V. V. M. et al., 2015. Use of Radon as Water Tracer at Juatuba Basin. **Journal of Geography and Geology**, vol. 7, pp. 49-60.

FERREIRA, V. V. M. et al., 2015. Assessment of Fluvial Sediments at Serra Azul Stream, Minas Gerais– Brazil. **Journal of Geography, Environment and Earth Science International**, vol.2, pp. 92-109.

GIAP, T. V., 2003. **Use of radon-222 as tracer to estimate groundwater infiltration velocity in a river bank area**. s.l.:s.n.

IAEA - International Atomic Energy Agency, 2004. **IAEA Topical Booklets and Overviews**. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/booklets>>. Acesso em 3 de março de 2016.

IAEA, 2010. **Experimentos con Trazadores para calibrar y validar Modelos de Calidad de Agua**, Poços de Caldas: s.n.

IAEA - Nuclear Data Section, 2015. **Live Chart of Nuclides**. Disponível em: <<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>>. Acesso em 28 de junho de 2016.

INB - Indústrias Nucleares do Brasil, s.d. **O mineral Urânio**. Disponível em:<[www.inb.gov.br](http://www.inb.gov.br)>. Acesso em 10 de maio de 2016.

Instituto Antônio Houaiss, 2009. *Houaiss - Dicionário Eletrônico*, s.l.: Objetiva Ltda.

LOBATO, L. et al., 2005. **Mapa Geológico Igarapé - Escala 1:50.000**. Belo Horizonte(MG): CODEMIG.

MEYERHOF, W. E., 1967. **Elements of Nuclear Physics**. s.l.:McGraw-Hill Book Company.

Minas Gerais. Secretaria de Estado de Saúde, 2009. **Projeto Planalto de Poços de Caldas. Pesquisa câncer e radiação natural: Minas Gerais-Brasil: 2004 a 2009.** Belo Horizonte(Minas Gerais): SES-MG.

PINTO, A. M. F., 2012. **Determinação da saturação residual de óleo através da medida da variação de concentração de radônio na água de produção.** Campinas(SP): Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

PIRES, F. R. M., 2013. **Urânio no Brasil - Geologia, jazidas e ocorrências.** Rio de Janeiro(RJ): Vitрина Comunicação.

SANCHES, M. P., 2001. **Fundamentos de Radioproteção: conceitos básicos.** São Paulo: s.n.

SÁNCHEZ, L. E., 2008. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** 3ª Edição ed. São Paulo(SP): Oficina de Textos.

SANTOS, T. O., 2010. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH.** Belo Horizonte(MG): Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

SANTOS, T. O., 2015. **Radionuclídeos Naturais em Minas Subterrâneas Brasileiras.** Belo Horizonte(MG): Tese (Doutorado). – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

SILVA, L. L. et al., 2009. **O uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos.** s.l.:Química Nova.

SINGH, B. P. & KUMAR, B., 2005. **Isotopes in Hydrology, Hydrogeology and Water Resources.** Índia: Narosa Publishing House.

SINGH, S. et al., 2010. Radon Monitoring in Soil Gas and Ground Water for Earthquake Prediction Studies in North West Himalayas, India. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences - TAO**, vol. 21, pp. 685-695.

SMITH, D. R. L., BURNETT, W. C. & DALAIOVA, H., 2002. Continuous radon-222 measurements in the coastal zone. **Sea Technology Magazine**, vol. 43, pp. 37-45.

SOPHOCLEOUS, Marios, 2002. **Interactions between groundwater and surface water: The state of science.** Hydrogeology Journal, pp. 52-67.

SOMASHEKAR, R. K. & RAVIKUMAR, P., 2010. Radon concentration in groundwater of Varahi and Markandeya river basins, Karnataka State, India. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, vol. 285, pp. 343-351.

SWARZENSKI, P. W., 2007. **U/Th series radionuclides as tracers of coastal groundwater.** s.l.:Chemical Reviews.

TURNER, J. E., 2007. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection.** Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

UNSCEAR, 2000. **Exposures from natural radiation sources**, New York: United Nations sales publication.

UNSCEAR, 2000. **Report Vol. I**, New York: United Nations sales publication.

## **APÊNDICE A – Trabalhos publicados durante a pesquisa.**

1. publicado no INAC 2015 – International Nuclear Atlantic Conference (realizado em São Paulo em outubro de 2015) o trabalho intitulado RADON AS TRACER TO IDENTIFY DISCHARGE SECTIONS AT JUATUBA BASIN;
2. publicado no XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (realizado em Brasília em novembro de 2015) o trabalho intitulado USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR PARA IDENTIFICAÇÃO DE SEÇÕES DE DESCARGA NA BACIA DE JUATUBA;
3. publicado no Journal of Geography and Geology (periódico canadense – volume 7, número 3/2015) o trabalho intitulado USE OF RADON AS WATER TRACER AT JUATUBA BASIN;
4. publicado pela Revista Águas Subterrâneas, 2016, o trabalho intitulado USO DE TRAÇADORES NATURAIS E FLUORESCENTES PARA IDENTIFICAÇÃO DE SEÇÕES DE DESCARGA NA BACIA DE JUATUBA;
5. publicado no SENCIR 2016 – Terceira Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações (realizado em Belo Horizonte em outubro de 2016) o trabalho intitulado O USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR PARA IDENTIFICAÇÃO DE DESCARGA DO AQUÍFERO NA BACIA DE JUATUBA, MG;

**APÊNDICE B – Tabela com todas amostragens de atividade de <sup>222</sup>Rn.**

Ordem	Pontos	Data e Hora da coleta	Conc Radônio Corrig (kBq.m <sup>-3</sup> )	Desv Pad (kBq.m <sup>-3</sup> )	Dist do pto ant (m)	Dist da fonte (m)
1	S1	16/09/2014 16:05	7,31	2,37	0,0	0,0
2	1.1	18/11/2014 14:07	5,86	1,03	2,0	2,0
3	1.2	18/11/2014 14:07	6,83	1,68	1,5	3,5
4	1.5	18/11/2014 14:36	43,14	2,58	125,8	129,3
5	S2	16/09/2014 16:25	1,03	1,13	63,3	192,6
6	20A	17/05/2016 10:10	0,14	0,18	72,3	264,9
7	34	15/07/2015 16:28	37,53	2,34	88,0	352,9
8	V0 B	11/02/2015 10:40	49,41	3,21	3,8	356,7
10	33	15/07/2015 16:20	30,88	1,33	1,2	357,9
11	2.6	18/11/2014 15:05	76,96	6,36	2,2	360,1
12	V1	11/02/2015 10:50	58,04	0,91	3,4	363,5
13	32	15/07/2015 16:13	30,27	4,49	0,3	363,8
14	31	15/07/2015 16:05	23,78	4,47	5,5	369,3
15	30	15/07/2015 15:55	57,69	1,97	5,5	374,8
16	V2	11/02/2015 11:15	31,53	4,23	5,0	379,8
17	29	15/07/2015 15:45	25,56	2,32	2,3	382,1
18	28	15/07/2015 15:35	28,32	2,83	4,9	387,0
19	V3	11/02/2015 11:30	28,52	3,18	3,6	390,6
20	27	15/07/2015 15:25	20,45	2,59	1,4	392,0
21	26	15/07/2015 15:17	46,70	2,72	5,1	397,1
22	V4	11/02/2015 11:45	27,90	2,45	4,3	401,4
23	25	15/07/2015 15:07	17,01	1,59	0,8	402,2
24	24	15/07/2015 15:00	17,04	2,42	5,2	407,4
25	V5	11/02/2015 11:55	26,93	2,80	4,8	412,2
26	23	15/07/2015 14:48	12,30	2,13	0,3	412,5
27	22	15/07/2015 14:40	17,56	2,62	5,2	417,7
28	V6	11/02/2015 12:10	35,71	1,49	4,0	421,7
29	21A	15/07/2015 14:30	21,02	1,98	1,0	422,7

Ordem	Pontos	Data e Hora da coleta	Conc Radônio Corrig (kBq.m <sup>-3</sup> )	Desv Pad (kBq.m <sup>-3</sup> )	Dist do pto ant (m)	Dist da fonte (m)
30	2.8	18/11/2014 15:20	48,18	4,09	4,3	427,0
31	V7	11/02/2015 12:20	28,65	1,12	5,5	432,5
32	V8	11/02/2015 12:30	35,98	3,07	9,8	442,3
33	S3	16/09/2014 16:55	35,09	4,86	4,9	447,2
34	V9	11/02/2015 12:43	22,06	3,18	9,1	456,3
35	V10	11/02/2015 12:50	19,21	1,40	9,7	466,0
36	V11	11/02/2015 13:05	21,29	0,81	10,9	476,9
37	3.6	18/11/2014 15:40	14,42	1,65	45,7	522,6
38	S4	16/09/2014 17:10	9,36	2,68	37,7	560,3
39	4.1	18/11/2014 15:55	6,33	1,38	0,9	561,2
40	11A	15/07/2015 12:40	24,67	1,65	66,0	627,2
41	10A	15/07/2015 12:35	17,10	1,63	4,2	631,4
42	12A/4.8	15/07/2015 13:30	10,09	0,82	1,5	632,9
43	4.8	17/09/2014 11:05	26,43	4,32	0,3	633,2
44	1B	10/02/2015 14:40	35,92	3,67	0,1	633,3
45	9B	15/07/2015 12:20	14,34	1,89	3,4	636,7
46	2A	10/02/2015 14:55	52,63	4,92	1,4	638,1
47	8A	15/07/2015 12:00	42,19	2,21	3,6	641,7
48	S5	17/09/2014 10:40	33,11	4,84	0,3	642,0
49	3A	10/02/2015 15:06	71,14	5,09	0,6	642,6
50	7A	15/07/2015 11:50	14,27	2,14	4,4	647,0
51	4B	10/02/2015 15:30	15,80	1,03	1,1	648,1
52	6A	15/07/2015 11:40	53,70	1,86	3,8	651,9
53	5B	10/02/2015 15:45	20,24	1,28	2,1	654,0
54	5A	15/07/2015 11:15	52,58	4,16	3,1	657,1
55	6B	10/02/2015 15:55	28,81	0,78	4,2	661,3
56	4A	15/07/2015 11:00	54,39	2,50	0,9	662,2
57	3A	15/07/2015 10:45	12,92	1,21	4,9	667,1
58	2A	15/07/2015 10:31	25,94	2,04	5,2	672,3

Ordem	Pontos	Data e Hora da coleta	Conc Radônio Corrig (kBq.m <sup>-3</sup> )	Desv Pad (kBq.m <sup>-3</sup> )	Dist do pto ant (m)	Dist da fonte (m)
59	1A	15/07/2015 10:20	10,50	1,13	4,9	677,2
60	S52A	28/09/2015 18:10	32,35	2,92	2,0	679,2
61	5.3	19/11/2014 09:38	52,26	4,78	14,6	693,8
62	S53B	28/09/2015 18:03	21,15	1,50	7,1	700,9
63	S54A	28/09/2015 17:50	9,88	1,95	14,4	715,3
64	5.7	19/11/2014 09:45	22,07	1,93	8,5	723,8
65	S55Br1	28/09/2015 17:33	5,07	0,81	10,9	734,7
66	S56B	28/09/2015 17:17	12,12	1,17	15,5	750,2
67	S57B	28/09/2015 17:07	1,6294	0,44	9,4	759,6
68	5.8	19/11/2014 10:11	46,07	3,59	10,2	769,8
69	S58A	28/09/2015 16:50	4,77	0,65	3,3	773,1
70	S59B	28/09/2015 16:33	6,25	0,52	6,0	779,1
71	S60	28/09/2015 16:20	2,93	0,83	15,6	794,7
72	S6	17/09/2014 11:20	12,38	1,08	24,8	819,5
73	9	19/11/2014 10:37	16,20	3,02	38,6	858,1
74	10	19/11/2014 10:54	11,50	1,27	57,0	915,1
75	11	19/11/2014 11:16	2,00	0,32	129,0	1044,1
76	S7	17/09/2014 11:45	7,13	0,55	33,2	1077,3
77	43A	16/05/2016 17:30	2,92	0,98	33,6	1110,9
78	44A	16/05/2016 17:20	2,00	0,63	14,1	1125,0
79	45A	16/05/2016 17:05	2,89	0,80	15,4	1140,4
80	46A	16/05/2016 16:55	25,45	3,55	15,0	1155,4
81	11.7	20/11/2014 09:29	38,31	2,94	2,3	1157,7
82	12	20/11/2014 09:25	26,44	1,78	7,0	1164,7
83	12	19/11/2014 15:40	42,60	1,68	2,1	1166,8
84	47A	16/05/2016 16:43	23,69	1,86	3,0	1169,8
85	12.4	20/11/2014 09:36	27,54	1,91	1,6	1171,4
86	48A	16/05/2016 16:25	17,80	0,90	13,4	1184,8
87	49A	16/05/2016 16:15	23,30	1,60	14,9	1199,7

Ordem	Pontos	Data e Hora da coleta	Conc Radônio Corrig (kBq.m <sup>-3</sup> )	Desv Pad (kBq.m <sup>-3</sup> )	Dist do pto ant (m)	Dist da fonte (m)
88	50A	16/05/2016 16:00	25,18	2,30	18,5	1218,2
89	51A	16/05/2016 15:50	18,76	0,89	13,7	1231,9
90	52A	16/05/2016 15:40	19,20	0,43	13,9	1245,8
91	53A	16/05/2016 15:25	13,90	1,13	15,3	1261,1
92	54A	16/05/2016 15:05	4,99	0,74	14,6	1275,7
93	S758A	29/09/2015 09:55	3,48	1,28	4,2	1279,9
94	55A	16/05/2016 14:55	24,23	2,32	11,9	1291,8
95	S759A	29/09/2015 09:45	3,02	1,22	1,0	1292,8
96	13	19/11/2014 16:00	13,11	0,53	4,3	1297,1
97	S760A	29/09/2015 09:35	2,43	1,39	5,7	1302,8
98	56B	16/05/2016 14:40	22,47	0,65	2,7	1305,5
99	14	19/11/2014 16:23	8,25	0,78	73,3	1378,8
100	S8	17/09/2014 12:00	5,53	0,67	161,9	1540,7
101	85A	17/05/2016 11:00	4,56	1,51	44,3	1585,0
102	15	19/11/2014 17:00	0,52	0,31	77,3	1662,3
103	16	19/11/2014 17:21	4,72	0,53	103,0	1765,3
104	S9	17/09/2014 12:30	9,50	1,38	67,3	1832,6
105	S890A	29/09/2015 15:05	26,64	1,75	1,3	1833,9
106	S891B	29/09/2015 14:55	37,90	2,09	12,3	1846,2
107	S892B	29/09/2015 14:42	29,18	2,78	18,2	1864,4
108	S893A	29/09/2015 14:26	7,25	1,59	15,6	1880,0
109	S894A	29/09/2015 14:12	31,80	2,77	26,3	1906,3
110	17	20/11/2014 09:55	13,77	0,33	7,1	1913,4
111	S895B	29/09/2015 14:05	39,56	4,23	13,0	1926,4
112	S896B	29/09/2015 13:52	28,59	0,95	11,8	1938,2
113	S897B	29/09/2015 13:44	16,30	1,54	18,0	1956,2
114	S898B	29/09/2015 13:22	14,90	2,49	18,8	1975,0
115	S899B	29/09/2015 13:12	9,33	0,92	21,9	1996,9
116	18	20/11/2014 10:14	5,83	1,13	5,7	2002,6

<b>Ordem</b>	<b>Pontos</b>	<b>Data e Hora da coleta</b>	<b>Conc Radônio Corrig (kBq.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Desv Pad (kBq.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Dist do pto ant (m)</b>	<b>Dist da fonte (m)</b>
117	S900A	29/09/2015 13:00	7,76	1,42	4,1	2006,7
118	19	20/11/2014 10:14	2,02	0,74	52,9	2059,6
119	S10	17/09/2014 12:50	0,90	0,25	69,7	2129,3
120	20	20/11/2014 10:25	1,33	0,30	23,0	2152,3

## APÊNDICE C – Relatórios de vazão do GGUN FL-30.

15/7/2015

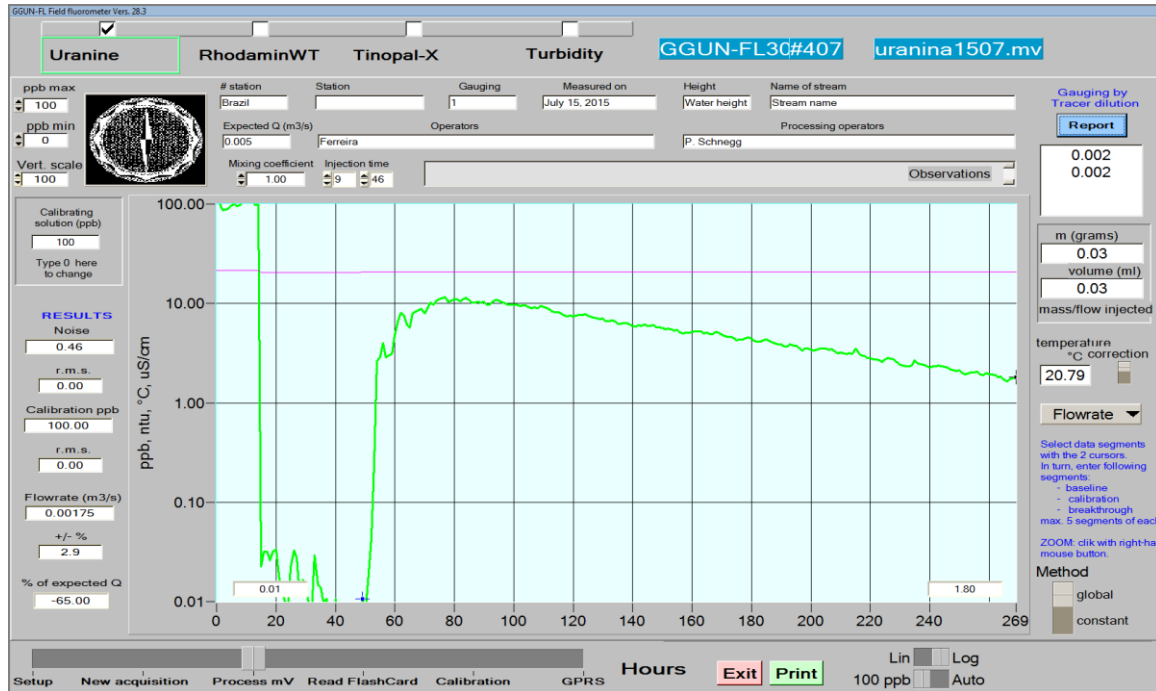
Brazil	# station
Montante	Station
1	Gauging
July 15, 2015	Measured on
Water height	Height
Stream name	Name of stream
Ferreira	Operators
0.005	Expected Q (m3/s)
P. Schnegg	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass (RWT=1.123,
ranine=1)	
1.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.02500	m (grams)
0.02500	volume (ml)
2640	Plume width [sec]:
99535	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
0.46034	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00175	Flowrate (m3/s)

2.87054

+/- %

-64.99536

% of expected Q



\* \* \*

ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

15/7/2015

Brazil

# station

Jusante

Station

1

Gauging

July 15, 2015

Measured on

Water height

Height

Stream name

Name of stream

Ferreira

Operators

0.005

Expected Q (m3/s)

P. Schnegg

Processing operators

Global

Method

Uranine

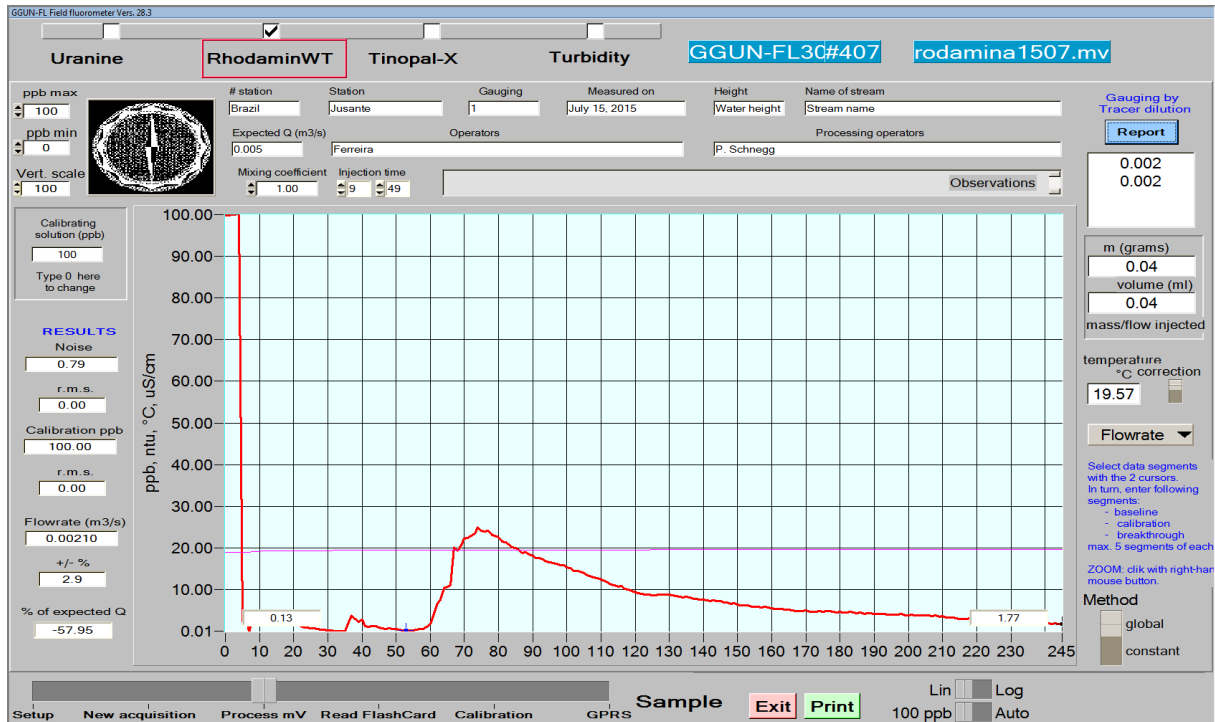
Tracer

1.000

Volumetric mass (RWT=1.123,

uranine=1)

1.026 Temperature coefficient  
 1 T Correction 0=no 1=yes  
 1000.00000 dilution 1  
 500.00000 dilution 2  
 1000000.00000 dilution 3  
 1.00000 dilution 4 (L into 5L)  
 0.04000 m (grams)  
 0.04000 volume (ml)  
 2304 Plume width [sec]:  
 8259 T since injection [sec]:  
 1.00000 Mixing coefficient  
 0.79289 Noise  
 0.00000 r.m.s.  
 100.00000 Calibration ppb  
 0.00000 r.m.s.  
 0.00210 Flowrate (m3/s)  
 2.87054 +/- %  
 -57.95340 % of expected Q



ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

**3/8/2015**

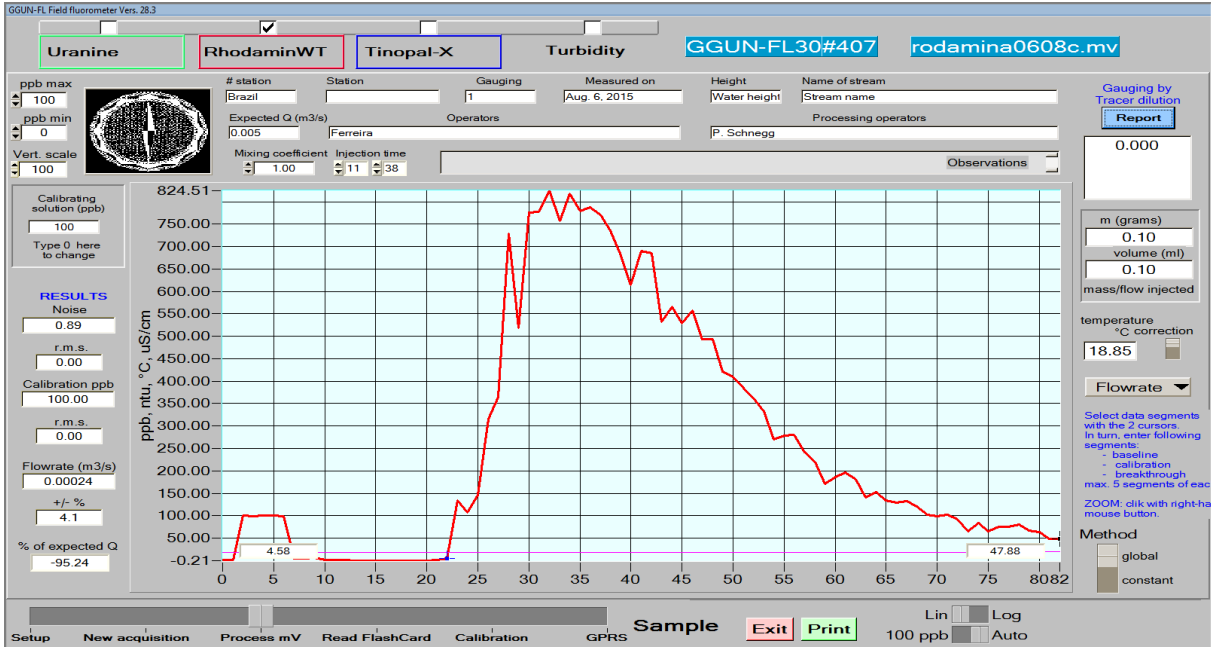
Brazil	# station
Montante	Station
1	Gauging
Aug. 3, 2015	Measured on
Water height	Height
Stream name	Name of stream
Ferreira	Operators
0.005	Expected Q (m3/s)
P. Schnegg	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass (RWT=1.123,
ranine=1)	
1.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.10000	m (grams)
0.10000	volume (ml)
1200	Plume width [sec]:
4160	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
0.88863	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00024	Flowrate (m3/s)

4.05956

+/- %

-95.23786

% of expected Q



ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

3/8/2015

Brazil

# station

Jusante

Station

1

Gauging

Aug. 3, 2015

Measured on

Water height

Height

Stream name

Name of stream

Ferreira

Operators

0.005

Expected Q (m3/s)

P. Schnegg

Processing operators

Global

Method

Uranine

Tracer

1.000

Volumetric mass (RWT=1.123,

ranine=1)

1.026                      Temperature coefficient

1                              T Correction 0=no 1=yes

1000.00000                  dilution 1

500.00000                   dilution 2

1000000.00000              dilution 3

1.00000                      dilution 4 (L into 5L)

0.10000                      m (grams)

0.10000                      volume (ml)

2100                          Plume width [sec]:

87440                        T since injection [sec]:

1.00000                      Mixing coefficient

0.88264                      Noise

0.00000                      r.m.s.

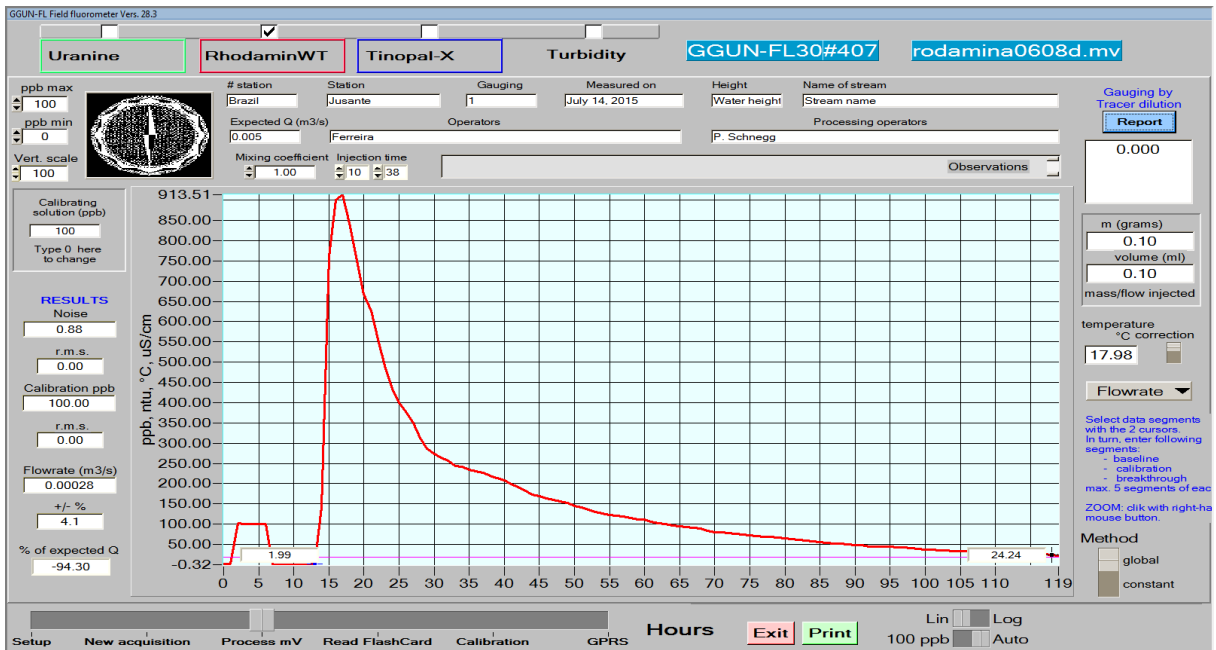
100.00000                    Calibration ppb

0.00000                      r.m.s.

0.00028                      Flowrate (m3/s)

4.05956                      +/- %

-94.30424                    % of expected Q



\* \* \*

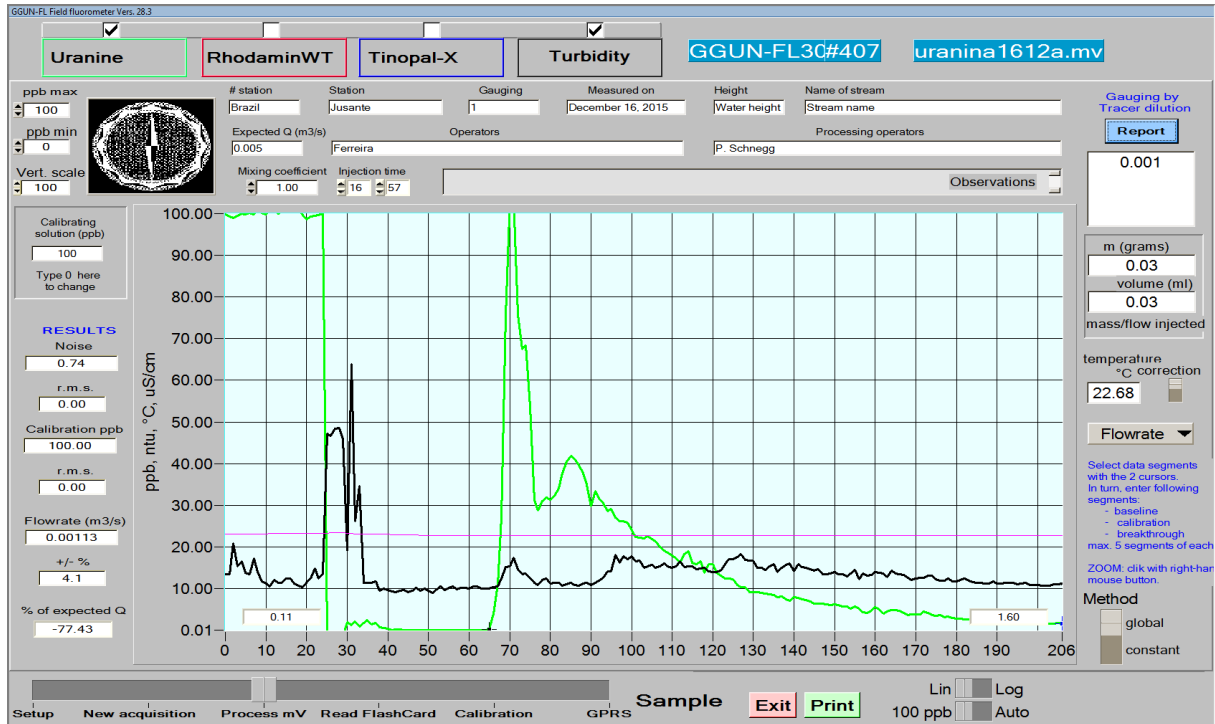
ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

16/12/2015

Brazil	# station
Jusante	Station
1	Gauging
December 16, 2015	Measured on
Water height	Height
Stream name	Name of stream
Ferreira	Operators
0.005	Expected Q (m3/s)
P. Schnegg	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass (RWT=1.123,
ranine=1)	
1.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.03000	m (grams)
0.03000	volume (ml)
1692	Plume width [sec]:
-21302	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
0.74338	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb

0.00000 r.m.s.  
 0.00113 Flowrate (m3/s)  
 4.05956 +/- %  
 -77.43365 % of expected Q



\* \* \*

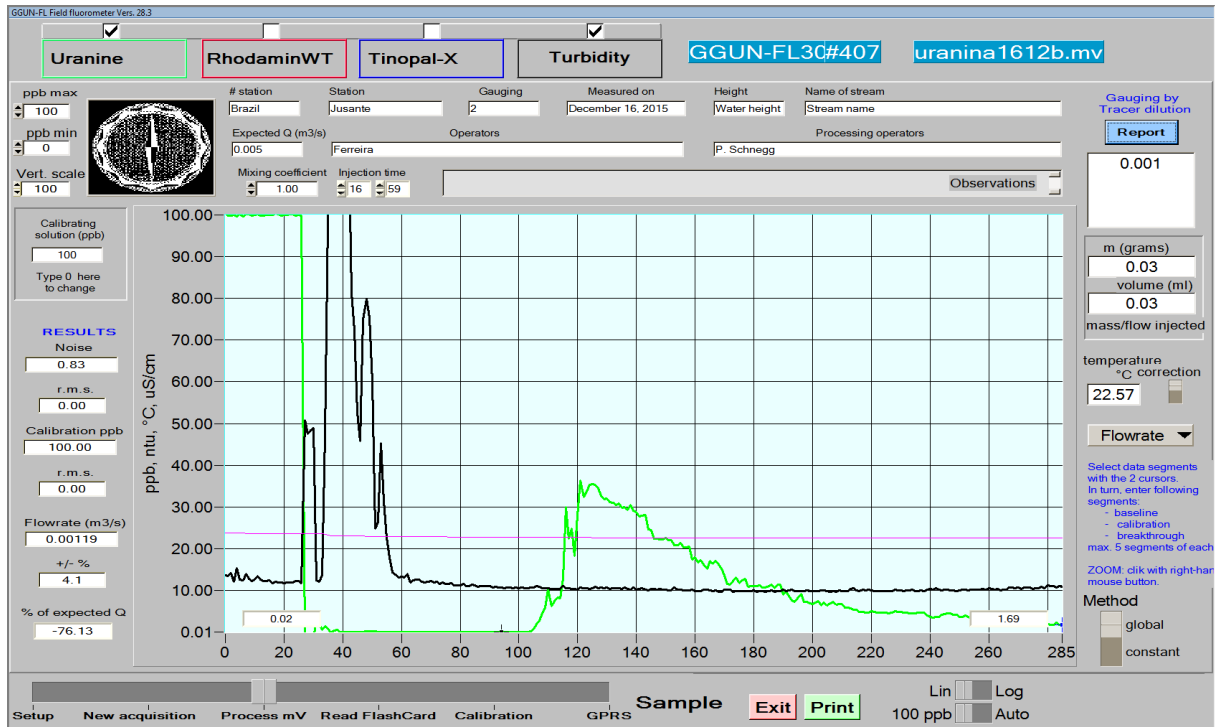
ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

16/12/2015

Brazil	# station
Jusante	Station
2	Gauging
December 16, 2015	Measured on
Water height	Height
Stream name	Name of stream
Ferreira	Operators
0.005	Expected Q (m3/s)
P. Schnegg	Processing operators
Global	Method

Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass (RWT=1.123,
uranine=1)	
1.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.03000	m (grams)
0.03000	volume (ml)
2292	Plume width [sec]:
-25275	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
0.83191	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00119	Flowrate (m3/s)
4.05956	+/- %
-76.12856	% of expected Q



\* \* \*

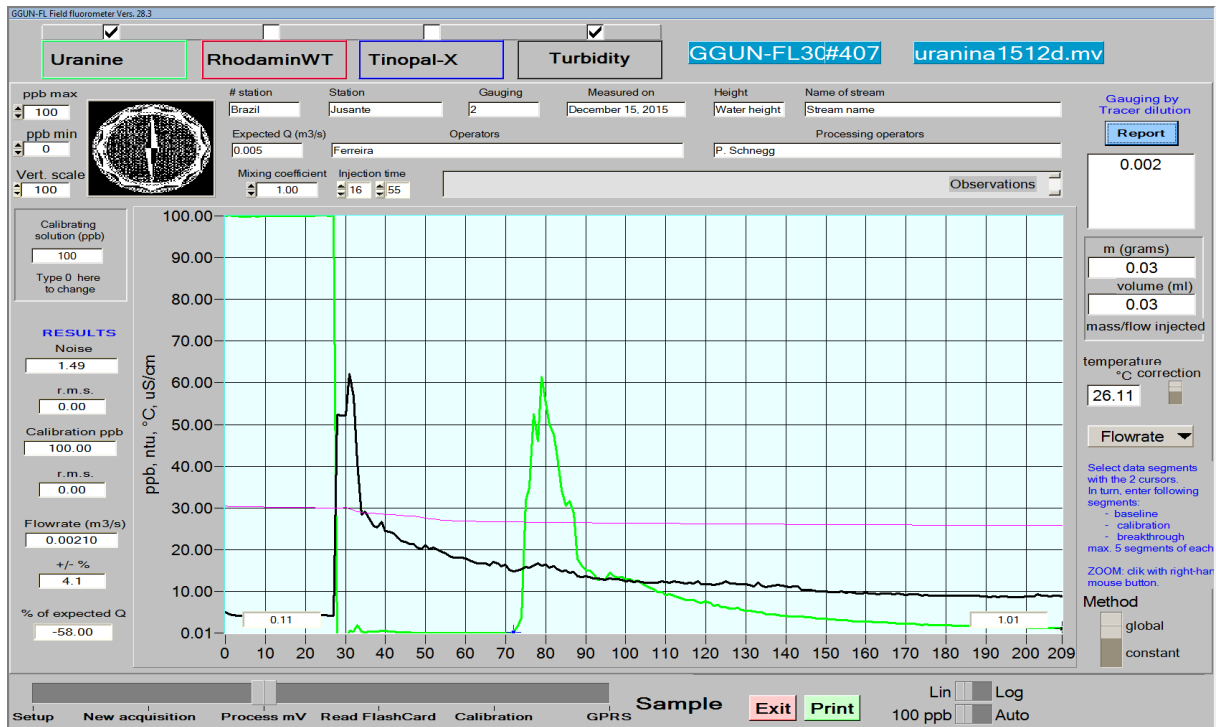
ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

16/12/2015

Brazil	# station
Jusante	Station
2	Gauging
December 16, 2015	Measured on
Water height	Height
Stream name	Name of stream
Ferreira	Operators
0.005	Expected Q (m3/s)
P. Schnegg	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass (RWT=1.123,
ranine=1)	
1.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes

1000.00000 dilution 1  
 500.00000 dilution 2  
 1000000.00000 dilution 3  
 1.00000 dilution 4 (L into 5L)  
 0.03000 m (grams)  
 0.03000 volume (ml)  
 1644 Plume width [sec]:  
 -3218 T since injection [sec]:  
 1.00000 Mixing coefficient  
 1.48800 Noise  
 0.00000 r.m.s.  
 100.00000 Calibration ppb  
 0.00000 r.m.s.  
 0.00210 Flowrate (m3/s)  
 4.05956 +/- %  
 -57.99816 % of expected Q



\* \* \*

ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

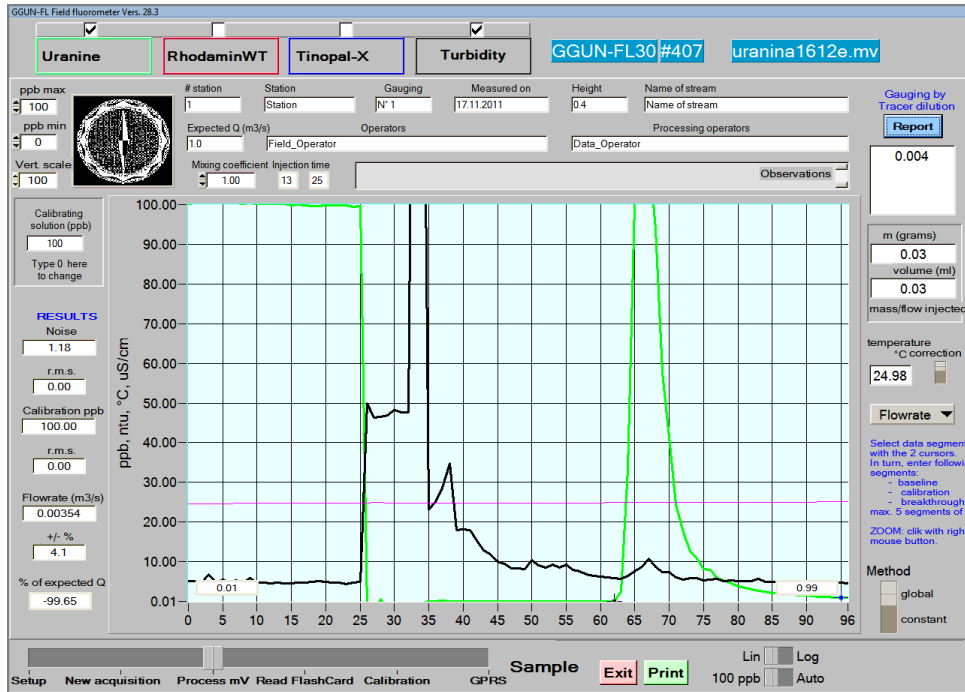
do not remove this file doc1.doc from the folder

16/12/2015

1	# station
Station	Station
N° 1	Gauging
December 16, 2015	Measured on
0.4	Height
Name of stream	Name of stream
Field_Operator	Operators
1.0	Expected Q (m3/s)
Data_Operator	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass
0.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1	Keep to 1
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.03000	m (grams)
0.03000	volume (ml)
396	Plume width [sec]:
-4298	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
1.18046	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00354	Flowrate (m3/s)
4.05956	+/- %

-99.64593

% of expected Q



\* \* \*

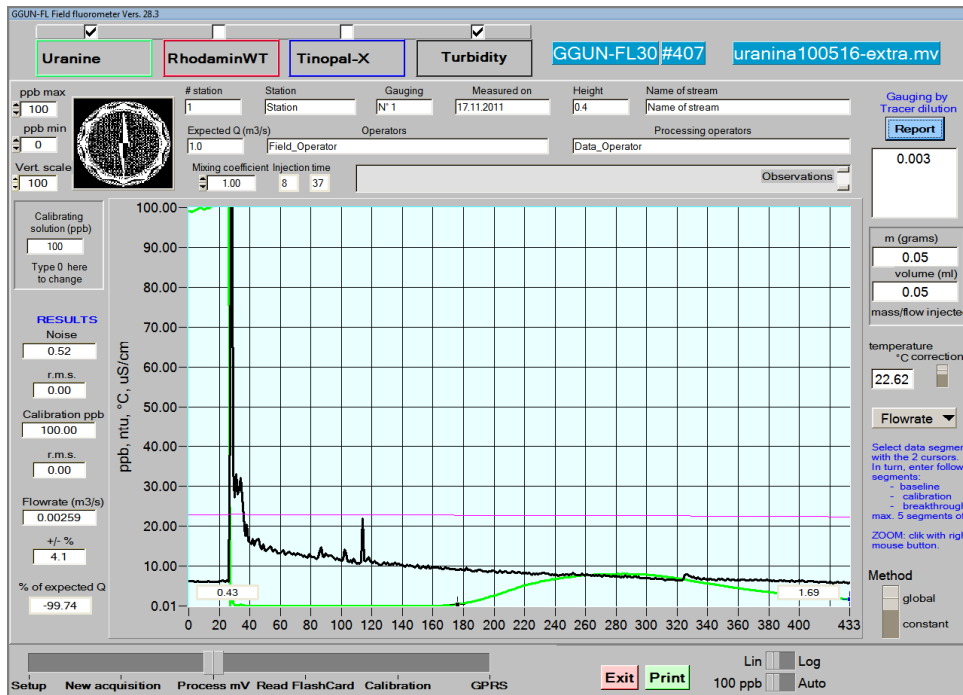
ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

10/5/2016

1	# station
Station	Station
N° 1	Gauging
May 10, 2016	Measured on
0.4	Height
Name of stream	Name of stream
Field_Operator	Operators
1.0	Expected Q (m3/s)
Data_Operator	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass
0.026	Temperature coefficient

1 T Correction 0=no 1=yes  
 1 Keep to 1  
 1000.00000 dilution 1  
 500.00000 dilution 2  
 1000000.00000 dilution 3  
 1.00000 dilution 4 (L into 5L)  
 0.05000 m (grams)  
 0.05000 volume (ml)  
 3972 Plume width [sec]:  
 28225 T since injection [sec]:  
 1.00000 Mixing coefficient  
 0.52261 Noise  
 0.00000 r.m.s.  
 100.00000 Calibration ppb  
 0.00000 r.m.s.  
 0.00259 Flowrate (m3/s)  
 4.05956 +/- %  
 -99.74146 % of expected Q



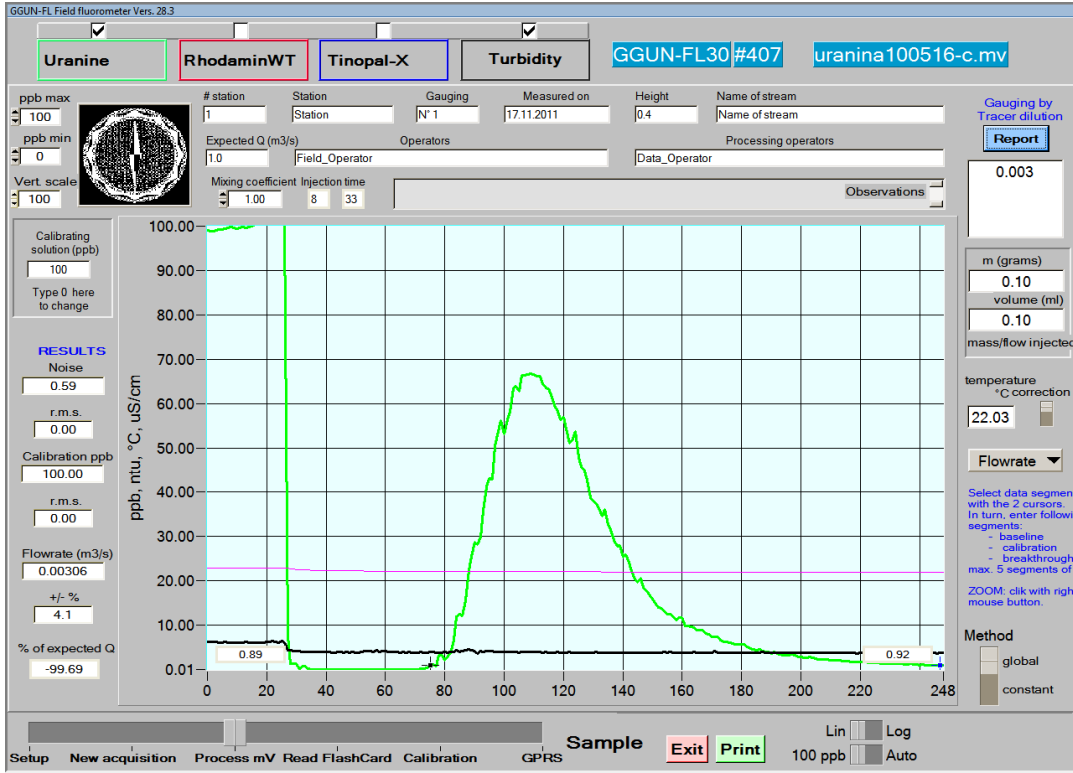
\* \* \*

ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

10/5/2016

1.000	Volumetric mass
0.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1	Keep to 1
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.10000	m (grams)
0.10000	volume (ml)
1720	Plume width [sec]:
19350	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
0.59461	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00306	Flowrate (m3/s)
4.05956	+/- %
-99.69399	% of expected Q



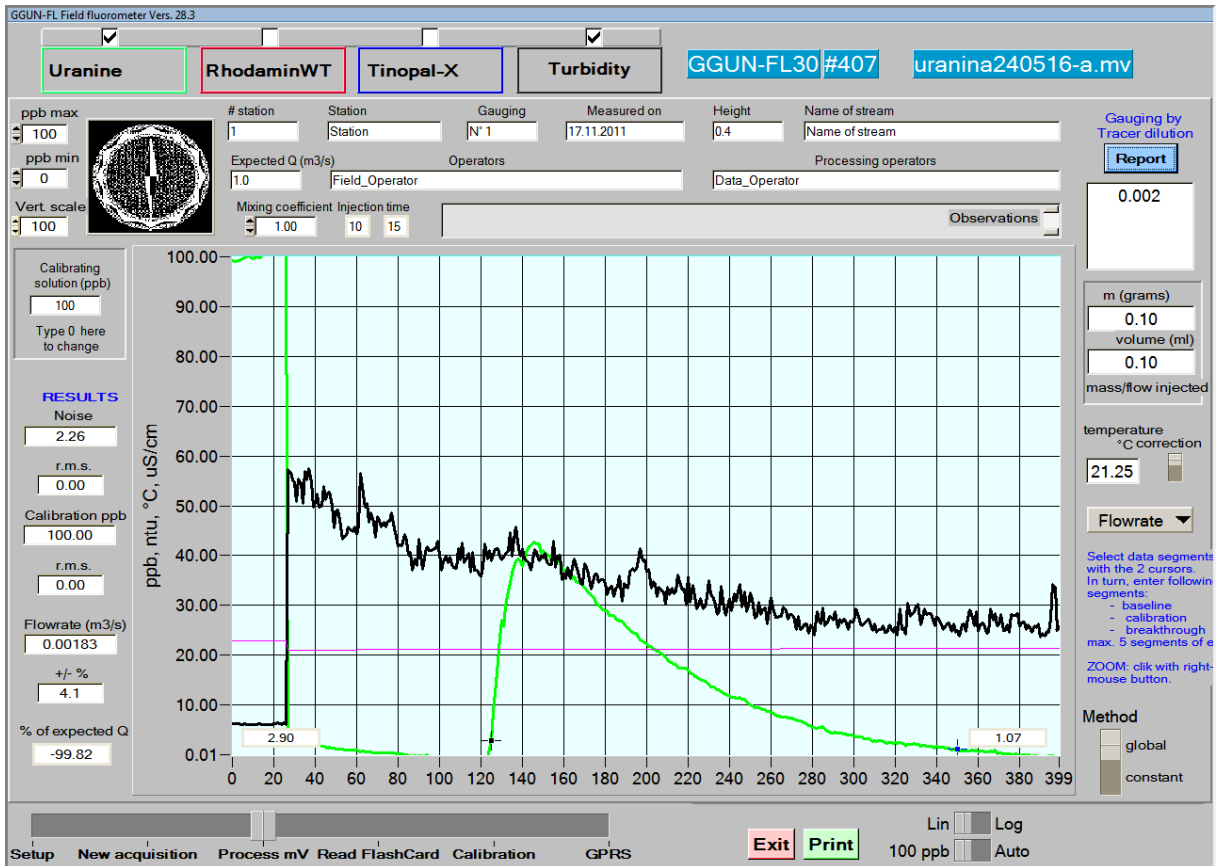
ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

24/5/2016

1	# station
Station	Station
N° 1	Gauging
May 24, 2016	Measured on
0.4	Height
Name of stream	Name of stream
Field_Operator	Operators
1.0	Expected Q (m3/s)
Data_Operator	Processing operators
Global	Method
Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass
0.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes

1	Keep to 1
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.10000	m (grams)
0.10000	volume (ml)
3375	Plume width [sec]:
92148	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
2.26271	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00183	Flowrate (m3/s)
4.05956	+/- %
-99.81656	% of expected Q



\* \* \*

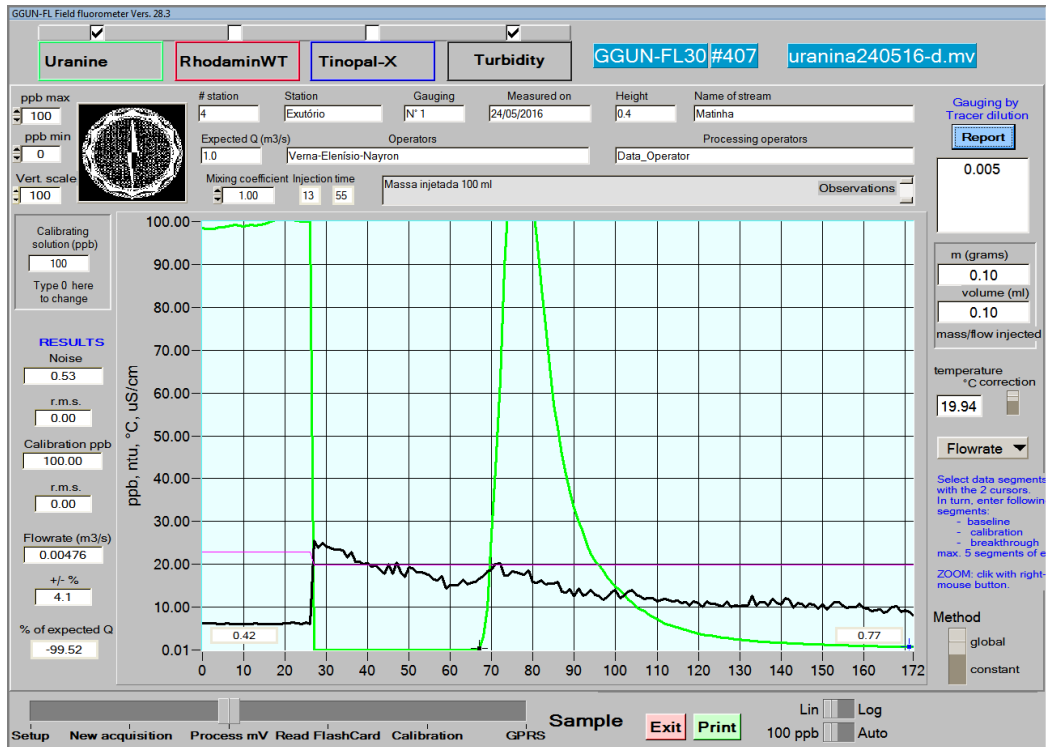
ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

24/5/2016

4	# station
Exutório	Station
N° 1	Gauging
May 24, 2016	Measured on
0.4	Height
Matinha	Name of stream
Verna-Elenísio-Nayron	Operators
1.0	Expected Q (m3/s)
Data_Operator	Processing operators
Global	Method

Uranine	Tracer
1.000	Volumetric mass
0.026	Temperature coefficient
1	T Correction 0=no 1=yes
1	Keep to 1
1000.00000	dilution 1
500.00000	dilution 2
1000000.00000	dilution 3
1.00000	dilution 4 (L into 5L)
0.10000	m (grams)
0.10000	volume (ml)
1040	Plume width [sec]:
105	T since injection [sec]:
1.00000	Mixing coefficient
0.52682	Noise
0.00000	r.m.s.
100.00000	Calibration ppb
0.00000	r.m.s.
0.00476	Flowrate (m3/s)
4.05956	+/- %
-99.52403	% of expected Q



\*\*\*

ne pas supprimer ce fichier doc1.doc du dossier

do not remove this file doc1.doc from the folder

## ANEXO A – Perfil litológico do poço, Fazenda Laranjeiras

