



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

HUGO TEIXEIRA

ÍNDICE DE RADÔNIO, GEOQUÍMICA E MINERALOGIA EM DIFERENTES CLASSES  
DE SOLOS.

CAMPINAS

2024

HUGO TEIXEIRA

ÍNDICE DE RADÔNIO, GEOQUÍMICA E MINERALOGIA EM DIFERENTES CLASSES  
DE SOLOS.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO INSTITUTO DE  
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE  
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE  
EM GEOCIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOLOGIA E  
RECURSOS NATURAIS

ORIENTADOR: PROF. DR. WANILSON LUIZ SILVA

COORIENTADOR: DR. NIVALDO CARLOS DA SILVA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO HUGO  
TEIXEIRA E ORIENTADA PELO PROF. DR. WANILSON  
LUIZ SILVA

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências  
Marta dos Santos - CRB 8/5892

T235r Teixeira, Hugo, 1982-  
Índice de radônio, geoquímica e mineralogia em diferentes classes de solo /  
Hugo Teixeira. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Wanilson Luiz Silva.

Coorientador: Nivaldo Carlos da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),  
Instituto de Geociências.

1. Solos e clima. 2. Geoquímica. 3. Mineralogia do solo. 4. Isótopos. 5.  
Radiação. I. Silva, Wanilson Luiz, 1965-. II. Silva, Nivaldo Carlos da. III.  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Instituto de Geociências. IV.  
Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Radon index, geochemistry and mineralogy in different soil classes

**Palavras-chave em inglês:**

Soils and climate

Geochemistry

Soil mineralogy

Isotopes

Radiation

**Área de concentração:** Geologia e Recursos Naturais

**Titulação:** Mestre em Geociências

**Banca examinadora:**

Wanilson Luiz Silva [Orientador]

Alfredo Borges de Campos

Wilson Thadeu Valle Machado

**Data de defesa:** 12-07-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Geociências

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0000-2347-9171>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5013908969081230>



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**AUTOR:** Hugo Teixeira

**ÍNDICE DE RADÔNIO, GEOQUÍMICA E MINERALOGIA EM DIFERENTES  
CLASSES DE SOLOS.**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva

Aprovado em: 12 / 07 / 2024

**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva - Presidente

Prof. Dr. Alfredo Borges de Campos

Prof. Dr. Wilson Thadeu Valle Machado

*A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta no processo de vida acadêmica do aluno.*

Campinas, 12 de julho de 2024.

## SÚMULA/BIOGRAFIA

### **Hugo Teixeira**

Formado em 2011, em Química pela Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), entre 2008 e 2009, cumpriu o período de estágio na empresa química BASF, em Indaiatuba/SP, onde seguiu como analista da qualidade até 2011. No início de 2012, atuou como professor da rede estadual de educação e, neste mesmo ano, começou a trabalhar com desenvolvimento analítico na farmacêutica EMS em Hortolândia/SP, onde trabalhou até sua aprovação no concurso como químico pela Unicamp em 2013. Sua função tem sido executar e desenvolver métodos de análises químicas em equipamentos como: difração de raios X, fluorescência de raios X, cromatografia líquida e iônica, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia UV-Vis e espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios x.

Iniciou as atividades de pós-graduação como aluno especial em 2020 e formalizou sua matrícula no Mestrado, em Geociências (IG/Unicamp), em março de 2022, com o estudo no qual pretendia encontrar a correlação entre as características físicas e químicas do solo com as emanações de radônio. Durante esse período, participou como PED (Programa de Estágio Docente) na disciplina Geologia de Campo III (curso de Geologia da Unicamp), no segundo semestre de 2022 e primeiro semestre de 2023, quando atuou na ênfase geoquímica de águas. Ainda em 2023, visitou o Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC-CNEN) para aprender sobre o uso de medidores de radônio e permeabilidade de solos, e preparar amostras de solos para análises de isótopos radiogênicos.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho ao meu pai, que no breve período que esteve conosco, mostrou-me que o estudo é o único caminho para a liberdade.

## AGRADECIMENTOS

À sociedade que, de maneira imposta, e com todas as injustiças sociais, destinou parte dos recursos a minha formação e à conclusão desse trabalho.

À Unicamp que ofereceu todo suporte, desde minha chegada à Campinas até o meu mestrado, e na qual tenho a honra de ser servidor para retribuir um pouco do que ela me ofereceu.

Ao Instituto de Geociências da Unicamp que ofereceu toda a infraestrutura para desenvolver meu trabalho.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) por disponibilizar mão de obra e equipamentos para compor as análises relacionadas ao radônio e aos isótopos radiogênicos.

Às pessoas das diretorias da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp, que passaram pela Unidade durante a execução desse trabalho, e às pessoas do Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC), da mesma instituição, pela compreensão das horas que precisei me afastar das atividades do laboratório para executar algo relacionado ao meu mestrado.

À Agência de Inovação da Unicamp (INOVA), na pessoa da Sra. Michele Imenes, por todo o auxílio com a fixação e o acompanhamento dos amostradores de radônio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva, que me ofereceu a oportunidade de trabalhar com ele, apresentou-me a ciência da terra e me mostrou como é possível trabalhar a interdisciplinaridade para obter ótimos resultados.

Ao meu coorientador, Dr. Nivaldo Carlos da Silva, por toda ajuda na obtenção dos valores de radônio, nas interpretações dos resultados de isótopos radiogênicos, e na excelente explicação sobre os cálculos relacionados aos detectores de radônio.

A todas e todos os participantes da disciplina Geologia de Campo III (GE910, curso de Geologia da Unicamp), do segundo semestre de 2022, que ajudaram na coleta das amostras de campo.

À toda equipe de corrida GGBS-Unicamp pela convivência sempre festiva e alegre, que aliviou minhas incertezas e angústias durante todo esse período.

À minha psicóloga, Sra. Maria Pia Santoro, pela ajuda na organização dos pensamentos.

Ao meu amigo, Dr. Miguel Tayar Galante, pelas conversas sobre os mais diversos temas, dicas sobre a carreira acadêmica e companhia nos dias de descontração.

À minha esposa, amiga e companheira Flávia de Matos Rodrigues, por todo seu apoio nas mais difíceis decisões, paciência nos momentos de dúvidas, carinho nos períodos que precisei de cuidados e pela sua presença em minha vida.

## EPÍGRAFE

“Um homem não seria mais que um químico lamentável, se ele se dedicasse apenas àquele departamento do conhecimento humano”

Mary Shelley



## RESUMO

O radônio é um gás nobre e inodoro, está disperso na atmosfera da Terra junto com outros gases, sua inalação em maiores quantidades pode causar uma série de complicações à saúde, como por exemplo o câncer de pulmão. Todos os isótopos de radônio são radioativos e são formados a partir de decaimentos sucessivos de isótopos de urânio (U) e tório (Th), dessa forma, rochas e solos que contenham esses elementos podem liberar radônio para a atmosfera. A exalação desse gás é influenciada pelas características físicas e composição química e mineral dos solos e das rochas, além das influências de fatores atmosféricos. Latossolos, Nitossolos e Argissolos são encontrados em boa parte do território nacional. A mineralogia e a geoquímica destes tipos de solo são bem documentadas na literatura, porém há uma carência de estudos que apresentam os atributos químicos e físicos destes solos e a concentração da atividade de radônio no ambiente. O presente estudo obteve os valores das emanações de radônio, permeabilidade, características físicas, mineralógicas e químicas desses solos. A área de estudo foi a Fazenda Argentina, localizada a noroeste do município de Campinas. Esse local foi escolhido por ser uma área com boa proporção dos solos em estudo, além de estar próxima a universidade na qual a pesquisa foi feita, facilitando na logística de estudo, bem como a redução de despesas com viagens. Nesse estudo, foram empregadas técnicas como fluorescência de raios X (elementos maiores), difratometria de raios X (mineralogia) e difração de laser (granulometrias) para a caracterização dos solos. Medidas de emanações de radônio e permeabilidade do solo foram obtidas *in situ* com o *AlphaGUARD*<sup>®</sup> e permeâmetro RADON-JOK<sup>®</sup>, em complemento foram realizadas análises de isótopos utilizando espectrometria gama e análises da atividade da concentração de radônio utilizando Detectores de Traços de Partículas Alfas (DTPA) instalados na Agência de Inovação da UNICAMP (INOVA), prédio situado dentro da Fazenda Argentina. Utilizou-se a infraestrutura dos laboratórios do Instituto de Geociências para realização das análises geoquímicas e mineralógicas. A obtenção da atividade do isótopo de radônio (<sup>222</sup>Rn) no solo foi realizada com apoio da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-Poços de Caldas). Os resultados obtidos para o Potencial de Radônio (RP - *Radon Potencial*) indicaram o Índice de Radônio (RI - *Radon Index*) alto e médio para os pontos estudados, contrastando com os valores encontrados para a concentração da atividade de radônio detectados pelos dispositivos DTPA, em ambientes fechados, que apresentaram valores abaixo do nível de segurança definido pela OMS.

**Palavras-chave:** Clima tropical; Técnicas de Raios X; Emanações de isótopos; Transporte de gás; Radiação.

## ABSTRACT

Radon is a noble and odorless gas; it is dispersed in the Earth's atmosphere along with other gases. Inhaling it in larger quantities can cause a series of health complications, such as lung cancer. All radon isotopes are radioactive and are formed naturally from successive decays of uranium (U) and thorium (Th) isotopes. Therefore, rocks and soils that contain these elements can release radon into the atmosphere. The emission of this gas is influenced by the physical characteristics and chemical and mineral composition of soils and rocks, in addition to the influences of atmospheric factors. Latosols, Nitosols and Argisols are found in much of the national territory. The mineralogy and geochemistry of these types of soil are well documented in the literature, however there is a lack of studies that relate the chemical and physical attributes of these soils to the presence of radon in the environment. Few studies have been developed in tropical environments, particularly in Brazil. The present study obtained the values of radon emanations, permeability, physical, mineralogical, and chemical characteristics of these soils, with the aim of evaluating the relationship between these characteristics and the dissipation of radon in the environment. The study area was Fazenda Argentina, located northwest of the municipality of Campinas. This location was chosen because it is an area with a good proportion of the soils under study, in addition to being close to the university where the research was carried out, facilitating study logistics, as well as reducing travel expenses. In this study, techniques such as X-ray fluorescence (larger elements), X-ray diffraction (mineralogy) and laser diffraction (granulometry) were used to characterize the soils. Measurements of radon emanations and soil permeability were obtained in situ with AlphaGUARD® and RADON-JOK® permeameter, in addition, isotope analyzes were carried out using gamma spectrometry and radon concentration analyzes Alpha-track Detector (ATD) installed at the UNICAMP Innovation Agency (INOVA), building located within Fazenda Argentina. The infrastructure of the Geosciences Institute laboratories was used to carry out geochemical and mineralogical analyses. Obtaining the activity of the radon isotope ( $^{222}\text{Rn}$ ) in the soil was carried out with support from the National Nuclear Energy Commission (CNEN-Poços de Caldas). The results obtained for Radon Potential (RP) indicated high and medium Radon Index (RI) for the studied points, contrasting with the values found for the concentration of radon activity detected by DTPA devices, in closed places, which presented values below the safety level defined by the WHO.

**Keywords:** Tropical climate; X ray techniques; Isotope emanations; Gas transport; Radiation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Série de decaimento radioativo: A – $^{222}\text{Rn}$ , B – $^{219}\text{Rn}$ e C – $^{220}\text{Rn}$ . (adaptado ICRP 2014).....	18
Figura 2: Esquema da câmara de ionização do detector AlphaGuard. Adaptado de Saphymo GmbH (2012).....	26
Figura 3: Aspectos gerais da área de estudo (polígono). Imagem principal obtida do Google Earth. ....	30
Figura 4: Mapa geológico da Fazenda Argentina com indicação dos pontos de amostragem. Adaptado de Pereira <i>et al.</i> (2021).....	31
Figura 5: Mapa pedológico da Fazenda Argentina com indicação dos pontos de amostragem. Adaptado de Alvarenga & Ladeira (2018). ....	32
Figura 6: Pontos de amostragem (detalhes sobre a localização da área estão na Figura 2). Imagem principal obtida do Google Earth. ....	33
Figura 7: Esquema da estação de trabalho para a coleta de amostras do solo e obtenção das leituras de concentração da atividade de radônio e valores de permeabilidade. O lado do triângulo equivale a 5 m. ....	34
Figura 8: Permeâmetro RADON-JOK <sup>®</sup> (Fonte: Próprio Autor) .....	36
Figura 9: Esquema para obtenção da permeabilidade do solo: A – Instalação da sonda, B – Afastamento da ponteira, C – Instalação do permeâmetro e D – Obtenção do tempo para preencher o fole. ....	37
Figura 10: Equipamento <i>AlphaGUARD</i> <sup>®</sup> . (Fonte: Próprio Autor) .....	38
Figura 11: Indicação dos quartis de um conjunto de N medidas.....	39
Figura 12: Sequência do quarteamento das amostras.....	40
Figura 13: Moinho de jarros com os recipientes metálicos contendo as amostras e esferas para moagem. (Fonte: Próprio Autor) .....	44
Figura 14: Detectores DTPA usados neste estudo: A - Detector CR-39 e câmara de difusão (base e tampa), B – Identificação dos detectores DTPA e C - Imagem de traços nucleares alfa capturada por microscopia óptica. Adaptado de Dias (2017).....	45
Figura 15: Difratogramas das amostras com indicação das posições dos principais picos de difração dos padrões: A - Pontos A, C, E e F (Latosolos), B - Pontos B, D e G (Nitossolos) e C - Ponto H (Argissolo). Legenda: Q-Quartzo, Ct-Caulinita, Gb-Gibbsita e Hm-Hematita. ...	49

Figura 16: Difrátogramas de subamostras de solo obtidas por separação de fases: A - Sobrenadante, B - Magnética e C - Decantada. Legenda: Ct-Caulinita, Gb- Gibbsita, Hm- Hematita, Mt-Magnetita, IL-Ilmenita e Q-Quartzo. ....	51
Figura 17: Distribuição granulométrica cumulativa da média dos resultados obtidos na análise granulométrica: A - Pontos A, C, E e F (Latosolos), B - Pontos B, D e G (Nitossolos) e C - Ponto H (Argissolo). ....	53
Figura 18: Diagrama ternário de classes texturais, com a distribuição das amostras de solos do presente estudo. Adaptado de Santos <i>et al.</i> (2005). ....	54
Figura 19: Valores médios do RP apresentados por classe do solo. ....	59
Figura 20: Valores de RP dos pontos amostrados e indicações das regiões de baixo, médio e alto RI. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos detectores mais populares usados para medição de radônio. (WHO 2009).....	24
Tabela 2: Identificação dos ambientes na Agência de Inovação da UNICAMP onde foram instalados os detectores DTPA.....	34
Tabela 3: Isótopos e energias do fotopico para identificação e quantificação. ....	44
Tabela 4: Porcentagem mássica na forma de óxidos dos elementos maiores e menores obtidas por FRX, perda ao fogo (P.F. a 1200 °C) e CIA (Índice Químico de Alteração, CIA/ <i>Chemical Index of Alteration</i> ; Nesbitt & Young 1982) dos pontos estudados e ordenados por classe de solo. ....	46
Tabela 5: Estatística básica dos resultados apresentados na Tabela 4 com exceção do ponto H. ....	48
Tabela 6: Resultados do refinamento de Rietveld nos pontos estudados.....	50
Tabela 7: Média dos resultados obtidos na análise de granulometria dos pontos estudados e a razão silte/argila.....	53
Tabela 8: Concentração dos isótopos em Bq kg <sup>-1</sup> nas amostras coletadas na Fazenda Argentina. O fotopico de <sup>234</sup> Th é apresentado como <sup>238</sup> U e o fotopico do <sup>228</sup> Ra, como <sup>232</sup> Th. ....	55
Tabela 9: Valores das médias da permeabilidade e concentração da atividade de radônio nos pontos investigados e resultados do terceiro quartil do cálculo do Potencial de Radônio (RP). ....	57
Tabela 10: Valores das médias de RP obtidos pelo método de Neznal em diferentes localidades. ....	60
Tabela 11: Valores de concentração da atividade de radônio pelos detectores DTPA instalados na Agência de Inovação da UNICAMP (INOVA).....	61
Tabela 12: Concentrações da atividade de radônio em locais fechados no Brasil relatados na literatura. Adaptado de Silva & Vasconcelos (2021). ....	63

## SUMÁRIO

RESUMO .....	11
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	13
LISTA DE TABELAS .....	15
1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS.....	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
3.1 FORMAÇÃO DO RADÔNIO E MOVIMENTAÇÃO DESSE GÁS ATÉ LIBERAÇÃO NA ATMOSFERA.....	22
3.2 MEDIDAS DE RADIAÇÃO .....	23
3.2.1 <i>Detector DTPA (Detector de traços de partículas alfas)</i> .....	25
3.2.2 <i>Detector MCR (Monitor contínuo de radônio)</i> .....	25
3.3 SOLOS AVALIADOS NESSE TRABALHO .....	26
3.3.1 <i>Latossolos</i> .....	26
3.3.2 <i>Nitossolos</i> .....	28
3.3.3 <i>Argissolos</i> .....	28
4 ÁREA DE ESTUDO .....	29
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
5.1 ETAPA DE CAMPO .....	32
5.1.1 <i>Amostragem</i> .....	32
5.2 ETAPAS DE LABORATÓRIO .....	39
5.2.1 <i>Quarteamento e secagem das amostras</i> .....	39
5.2.2 <i>Análise granulométrica</i> .....	40
5.2.3 <i>Moagem para análises de difração e fluorescência de raios X</i> .....	41
5.2.4 <i>Geoquímica</i> .....	41
5.2.5 <i>Mineralogia</i> .....	42
5.2.6 <i>Análises de isótopos</i> .....	43
5.2.7 <i>Tratamento dos DTPA (Detector de traços de partículas alfas) para obtenção da concentração da atividade de radônio no ambiente interno</i> .....	44
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
6.1 GEOQUÍMICA DOS ELEMENTOS MAIORES, MENORES E ÍNDICE DE INTEMPERISMO.....	46
6.2 MINERALOGIA .....	48
6.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	52
6.4 ISÓTOPOS RADIOGÊNICOS .....	55

6.5	POTENCIAL DE RADÔNIO (RP) E ÍNDICE DE RADÔNIO (RI).....	56
6.6	DETECTORES DTPA .....	61
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....	65
8	REFERÊNCIAS .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

O radônio é um produto natural, incolor, inodoro, praticamente inerte, e um gás radioativo (Cothorn & Smith Jr 1987). É a principal fonte de radiação ionizante de origem natural na troposfera da Terra. O principal isótopo desse elemento é o  $^{222}\text{Rn}$  que tem meia vida de 3,8 dias, sendo o isótopo mais estável do radônio. O  $^{222}\text{Rn}$  (radônio) é formado a partir do  $^{226}\text{Ra}$ , este por sua vez é produto de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . Outros isótopos de radônio são produzidos pelas séries de decaimento do  $^{235}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ . A primeira série resulta no isótopo  $^{219}\text{Rn}$  que tem sua meia vida de 3,96 segundos, e a segunda, no  $^{220}\text{Rn}$ , com tempo de meia vida de 55,6 segundos. Em todas as séries de decaimento ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ), os isótopos do radônio são produtos do rádio (Figura 1). Portanto, todos os minerais que contêm rádio (abundância média na crosta/oceano =  $9 \times 10^{-11}$  %) têm também radônio (abundância média na crosta/oceano =  $9 \times 10^{-17}$  %) (Faure 1998).

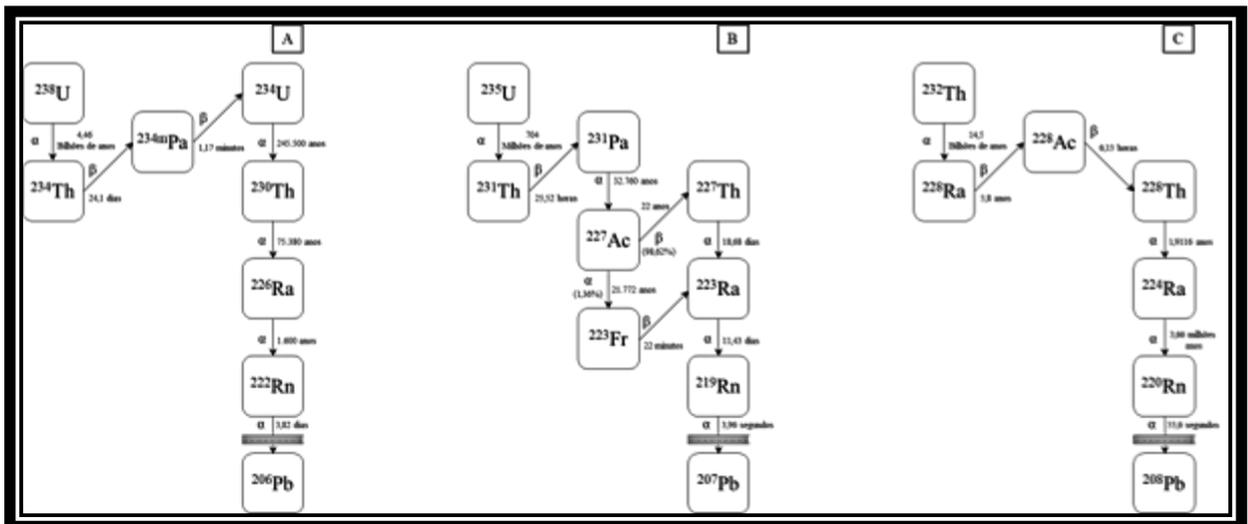


Figura 1: Série de decaimento radioativo: A –  $^{222}\text{Rn}$ , B –  $^{219}\text{Rn}$  e C –  $^{220}\text{Rn}$ . (adaptado ICRP 2014).

Durante um decaimento radioativo, os produtos, geralmente, permanecem na rocha mãe ou no solo. Entretanto, no caso do radônio (um produto gasoso), o átomo pode se movimentar, sendo liberado para a atmosfera, caso haja um espaço poroso, uma fratura ou descontinuidade nas rochas. A quantidade de radônio exalada do solo é relativamente baixa, e é rapidamente diluída no ar. Esta diluição depende de alguns fatores atmosféricos, como, por exemplo, a presença do vento. Enquanto a concentração da atividade de radônio é rapidamente diluída em ambientes abertos, o mesmo não ocorre em ambientes fechados, como residências, laboratórios e escolas, lugares onde, não havendo a ventilação adequada,

podem concentrar o radônio em níveis preocupantes à saúde humana (ICRP 2014). Regiões com a presença de rádio e urânio são potenciais fontes de exalação de radônio, assim, construções feitas em áreas contendo esses elementos podem acumular esse gás no seu interior, trazendo riscos à saúde das pessoas que ocupam esses espaços (WHO 2009).

A preocupação associada à inalação de radônio é maior em regiões de clima frio e temperado, onde residências, ambientes escolares e de trabalho recebem pouca ventilação em grande parte do ano, devido ao isolamento térmico necessário para manter a temperatura em valores aceitáveis. No Brasil, o aumento do uso de sistemas de ar-condicionado (IBGE 2024) faz com que os ambientes fiquem fechados na maior parte do tempo e muitos não apresentam o sistema de circulação adequado para que haja troca de ar, potencializando o acúmulo de radônio no local.

Estudos sobre a exposição humana ao radônio têm sido realizados por muitos anos em todo o mundo, e sua classificação como agente carcinogênico foi definida em 1988, associando-o ao câncer de pulmão (Darby *et al.* 2005, IARC 1988, ICRP 2014). Segundo Gaskin *et al.* (2018), o radônio residencial é responsável por uma significativa porcentagem da mortalidade por câncer de pulmão em todo o mundo. No Brasil a estimativa do Instituto Nacional de Câncer (INCA) para o ano de 2022 era que o câncer de pulmão seria o terceiro tipo mais frequente em homens, estando atrás dos cânceres de próstata e de cólon e reto, e o quarto entre as mulheres, perdendo para os cânceres de mama, cólon e colo do útero. Mundialmente, os três tipos de câncer de maior incidência na população mundial são: pulmão, mama feminina e colorretal (IARC 2018), sendo o tabagismo o principal responsável pela ocorrência de câncer de pulmão seguido pela inalação de radônio.

Devido à importância deste radionuclídeo, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), Organização Mundial de Saúde (OMS) e Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) recomendam que órgãos nacionais reguladores investiguem os níveis de radônio presentes, e estabeleçam seus próprios níveis de referência (ICRP 2014, WHO 2009, IAEA 2015).

O papel do radônio como indicador de processos ambientais tem sido explorado em inúmeros estudos com respeito à atividade vulcânica, questões atmosféricas, marinhas e hidrogeológicas, conforme sintetizados em trabalhos como os de Barbosa *et al.* (2015) e Baskaran (2016). Estudos da relação entre tipos mineralógicos e o potencial de radônio são discutidos em rochas (Taveira *et al.* 2021) e sedimentos (Tkaczyk *et al.* 2020).

Os solos representam as principais fontes de exalação do radônio ambiental, e estudos da exalação desse elemento têm sido conduzidos globalmente há décadas, especialmente para predição de terremotos em áreas tectonicamente ativas (Zmazek *et al.* 2003, Jaishi *et al.* 2014, Chowdhury *et al.* 2022). Em escala regional, pesquisas que comparam a presença de radônio em ambientes fechados com a radiação gama total obtida por equipamentos aerotransportados que sobrevoam grandes áreas têm demonstrado precisão para estimar os riscos de radônio em comunidades humanas. Outros estudos combinam a geologia/mineralogia e aeroradioatividade para identificar problemas de anomalias de radônio em grandes áreas (Sullivan *et al.* 1997).

O foco na radiação dos solos proveniente do radônio é importante não apenas no que se refere à prevenção, mitigação ou remediação em construções existentes, como também no planejamento de novas edificações. A prevenção do radônio primário (oriundo diretamente do solo) no ordenamento urbano necessita de estratégias de construção focadas na selagem e/ou ventilação adequada dos espaços fechados de modo a prover maior redução das concentrações da atividade do gás (WHO 2009).

Estudos sobre as rochas fontes de radônio no Brasil ainda são incipientes (Andrade *et al.* 2017). Entre as grandes províncias ígneas subaéreas do mundo, a Província Cretácea Paraná-Etendeka (Brasil-África), constituída especialmente por diabásios e basaltos de fundo oceânico, ocupa a segunda maior expressão de derrames vulcânicos na Terra, superada apenas por derrames na Bacia de Tunguska na Sibéria (Frank *et al.* 2009). Ela está relacionada à abertura do Oceano Atlântico Sul, e as rochas ali presentes deram origem a vastos segmentos de Latossolos e Nitossolos que cobrem grande parte das regiões sudeste, sul e centro oeste do Brasil.

Estudos do potencial de exalação de radônio em solos desta natureza foram realizados preliminarmente (Petta *et al.* 2013, Rebelo *et al.* 2013), mas a relação da liberação desse gás para o ambiente com as características químicas e mineralógicas desses solos ainda não foi reportada. Além dos Latossolos e Nitossolos, os Argissolos, notadamente relacionados às sequencias siliciclásticas da Província Cretácea Paraná-Etendeka, são outra classe de solos abrangentes no sul-sudeste do Brasil, com poucos estudos relacionados às emanações de radônio (Castro 2018).

Há vários tipos de medidas de radônio. A escolha de qual medidor será usado dependerá do resultado esperado. Para medidas contínuas, geralmente, é utilizado a câmara de

ionização. Dessa forma, o gás pode ser medido durante um curto período, mas de forma contínua (WHO 2009). Outro método é por meio de detectores de partículas alfa (DTPA), adotado no presente estudo. Estes detectores são baratos (menos que 1 dólar), eficientes e fáceis de armazenar e analisa. Eles consistem em um substrato plástico, o qual é sensível a partículas alfa. Essas partículas quando atingem esse substrato deixam uma marca. A quantidade dessas marcas é diretamente proporcional à concentração da atividade de radônio. Nesse caso, o detector fica instalado no ambiente escolhido para o monitoramento por alguns meses e o resultado será uma média da radiação neste tempo.

Este estudo tem o propósito de estabelecer os níveis do Índice de Radônio (chamado na literatura de RI - *Radon Index*) baseados nos valores obtidos no Potencial de Radônio (RP - *Radon Potencial*), como subsídio a futuras construções nesta área, a qual faz parte do plano de expansão da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O presente estudo foi conduzido em Latossolos e Nitossolos originários de diabásios da Formação Serra Geral e uma amostra de solo provenientes do Subgrupo Itararé, pertencentes a Bacia do Paraná. A área estudada compreende a região denominada Fazenda Argentina, localizada na cidade de Campinas-SP. O trabalho contou com a parceria entre o Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas UNICAMP e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-Poços de Caldas).

Como parte dos resultados foram obtidos os valores de geoquímica dos elementos maiores e menores, a composição mineralógica, a classe textural e os valores de concentrações de isótopos dos solos totais. A aquisição dos dados em ambientes fechados da concentração da atividade de radônio foi feita através dos detectores de traços de partícula alfas (DTPA) do tipo CR-39.

## 2 OBJETIVOS

### Objetivo geral:

Avaliar o Índice de Radônio (RI) em diferentes classes de solos, obtido por meio do Potencial de Radônio (RP), e obter a concentração da atividade de radônio em ambientes internos de construções civis sobre os solos.

### Objetivos específicos:

- Compreender nos solos a geoquímica dos elementos maiores e menores, a mineralogia, a classe textural e a concentração dos isótopos ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$ ), pertencentes a série de decaimento do radônio;
- Medir nos solos seus valores de permeabilidade e da concentração da atividade de radônio;
- Medir a concentração da atividade de radônio em edificações construídas na área de estudo.

## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

### 3.1 Formação do radônio e movimentação desse gás até liberação na atmosfera

O decaimento radioativo do rádio em grãos minerais gera o radônio e, considerando que o rádio está presente em boa parte dos materiais minerais, espera-se que o radônio seja constantemente produzido nas rochas, solos ou matrizes de aquíferos (Barbosa *et al.* 2015). Após a formação do radônio, no interior das rochas, o gás é liberado para a atmosfera por três principais mecanismos de movimentação: emanação (movimento que o radônio faz após sua formação até um espaço poroso), transporte (movimento através do solo no espaço poroso) e exalação (liberação do radônio para a atmosfera) (Baskaran 2016).

Rochas metamórficas e ígneas são reportadas como portadoras das maiores concentrações de urânio e tório, enquanto rochas sedimentares têm os menores teores desses elementos (Ribeiro *et al.* 2018). Contudo, o fator de risco do gás radônio nem sempre está relacionado, apenas, à quantidade de urânio no substrato geológico. Devem ser avaliados fatores de petrográfica e texturais da rocha e outras relações geológicas (Taveira *et al.* 2021).

Durrani & Ilic (1997) afirmam que a emanação de radônio é influenciada pela posição onde os átomos desse elemento estão no grão mineral, bem como textura, tamanho dos grãos, permeabilidade, pressão e temperatura na qual esse mineral está submetido e

Schumann (1993) demonstra que os produtos comuns ao intemperismo tais como óxidos de ferro e manganês, alumínio, sílica são importantes para geração e emissão do radônio.

Segundo Thu *et al.* (2020), um aumento no valor da umidade do solo irá favorecer a movimentação do radônio, contudo, após atingir um determinado valor de umidade, começa uma competição por espaço entre as moléculas de água e os átomos de radônio, criando um ponto de saturação, a partir desse ponto, a mobilidade do radônio irá depender mais da habilidade dos átomos deste gás se movimentarem nos grãos.

A umidade no solo também favorece à lixiviação de metais alcalinos e à acidificação do solo, e influenciam na mobilidade do urânio e tório, precursores do rádio (Ulbrich *et al.* 2009). De acordo com Schumann (1993), o radônio pode se movimentar por espaços porosos e ser aprisionado quando há baixa permeabilidade. Já Baskaran (2016) demonstra que o transporte do radônio é influenciado por fatores tais como distribuição do elemento rádio, granulometria, umidade, mineralogia, temperatura e pressão.

Minerais radioativos como uraninita ( $\text{UO}_2$ ), torianita ( $\text{ThO}_2$ ) e autunita ( $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{-}12\text{H}_2\text{O}$ ) têm em sua composição quantidades consideráveis de urânio e tório. Assim, nesses é esperada alta concentração de radônio. Atualmente, no Brasil a única mina de urânio em atividade está localizada em Caetité/Bahia (INB 2023). Apesar de se esperar um valor significativo de radônio nessas minas devido aos minerais presentes, Rosa (2014) demonstrou que a variação da concentração de radônio, antes e depois do processo de mineração em uma jazida como a localizada em Caetité não é significativa, demonstrando que mesmo em lugares onde a concentração do radônio seria diminuída conforme é extraído os elementos precursores esse valor se mantém constante.

### 3.2 Medidas de radiação

Prótons são partículas carregadas positivamente e estão localizados no núcleo atômico. Devido a essas cargas, há uma força de repulsão, que na maioria dos núcleos encontra equilíbrio com a energia de ligação nuclear que mantém o núcleo estável. Contudo, em alguns elementos a força de repulsão entre os prótons supera a força que os mantém unidos, liberando energia e/ou partículas. Esse processo é conhecido como decaimento que produz radioatividade. Elementos nos quais acontece esse processo são conhecidos como radioativos. Em 1898, Ernest Rutherford identificou três tipos de radioatividade: alfa, gama e beta. Quando um núcleo emite partículas alfa ou beta, há alteração no número de prótons,

formando outro núcleo conhecido como núcleo filho (Atkins & Jones 2012). Um exemplo desta formação de um novo núcleo é o  $^{222}\text{Rn}$ . Trata-se de um núcleo filho do  $^{226}\text{Ra}$ , pois esse sofre decaimento de uma partícula alfa com carga nuclear +2 e número de massa 4.

Produtos de decaimento do radônio, como o polônio ( $^{218}\text{Po}$  e  $^{214}\text{Po}$ ), são os responsáveis pela maior parte de radiação proveniente do radônio. Assim, a melhor maneira de avaliar qual seria o nível de radiação de um determinado local deveria ser com uso de medidores de polônio. Contudo, as medições de radônio são preferidas, devido à simplicidade e ao baixo custo. As medições de radônio podem ser de curto ou longo prazo. As medidas de curto prazo, como detector de carvão ativado ou câmara de ionização de eletro, podem indicar uma concentração média em uma determinada área. Entretanto, é preciso avaliar esses resultados, pois, dependendo da condição na qual foi obtida a medida, pode haver desvios. Por exemplo, em uma média anual, pode haver variações sazonais que influenciam a concentração do gás. Assim, detectores que fornecem uma medição integrada de longo prazo são mais indicados para estimar a dose recebida de radônio pelas pessoas (WHO 2009). Na Tabela 1 são apresentadas algumas características dos detectores de medição de radônio mais populares, sendo nesse trabalho utilizado os detectores DTPA e MCR que serão detalhados na sequência. Os detetores DCA absorvem o radônio em carvão ativado e são posteriormente analisados por contagem gama ou cintilação líquida, os detectores CIE medem a concentração média de radônio ao longo do tempo, usando um eletreto como fonte de campo elétrico e sensor e os detectores DIE usa um detector de silício para contar partículas alfa dos produtos de decaimento do radônio.

Tabela 1: Características dos detectores mais populares usados para medição de radônio. (WHO 2009)

Tipo de detector (Abreviação)	Passivo/ Ativo	Incerteza típica [%]	Período típico de amostragem	Custo
Detector de traços de partículas alfas (DTPA)	Passivo	10 – 25	1 – 12 meses	Baixo
Detector de carvão ativado (DCA)	Passivo	10 – 30	2 – 7 dias	Baixo
Câmara de ionização de eletreto (CIE)	Passivo	8 – 15	5 dias – 1 ano	Médio
Detector de integração eletrônica (DIE)	Ativo	~ 25	2 dias – ano(s)	Médio

Monitor contínuo de radônio (MCR)	Ativo	~ 10	1 hora – ano(s)	Alto
-----------------------------------	-------	------	-----------------	------

### 3.2.1 Detector DTPA (Detector de traços de partículas alfas)

Detector de traços de partículas alfas (DTPA) é um substrato plástico, podendo ser de nitrato de celulose (LR-115), Poliálil Diglicol Carbonato (PADC ou CR-39, usado nesse trabalho) ou policarbonato (Makrofol). Partículas alfas provenientes do decaimento do radônio atingem esse substrato, formando traços microscópicos chamados traços latentes. Após tratamento químico (ver seção Materiais e Métodos), os traços da radiação ficam mais evidentes, e podem ser vistos em microscópios óticos convencionais. Por meio de contagem automática ou manual desses traços, é possível determinar a concentração da atividade de radônio, pois o número de traços por unidade de superfície do substrato será diretamente proporcional à concentração da atividade desse elemento. Neste tipo de detector, o substrato plástico é envolto por uma câmara de difusão que contém um filtro, impedindo a entrada de outros produtos do decaimento do radônio (WHO 2009). Esses detectores não são afetados pela umidade, incidência de luz, baixas e moderadas temperaturas (Durrani & Ilic 1997). Desse modo, podem ser usados ao longo do ano, e não sofrem interferências do clima ou das estações do ano. Este tipo de detector é ideal para uma amostragem mais representativa de longo prazo, uma vez que os níveis de radônio variam ao longo do ano, meses e até no mesmo dia.

### 3.2.2 Detector MCR (Monitor contínuo de radônio)

Os detectores do tipo monitor contínuo de radônio (MCR) são comercializados com vários tipos de sensores, como células de cintilação, detectores de silício no estado sólido e câmaras de ionização. Nesses detectores é acoplada uma bomba que faz a movimentação do ar dentro do equipamento. Esses detectores MCR possuem circuitos eletrônicos, sendo possível a obtenção de um relatório contendo todos os resultados, inclusive os períodos de medição, com obtenção da concentração da atividade de radônio em períodos específicos, como dias, meses ou anos (WHO 2009).

O *AlphaGUARD*<sup>®</sup>, que mede radônio via detector MCR e usa o princípio de câmara de ionização, é um equipamento no qual o gás chega por difusão através de um filtro, onde apenas o <sup>222</sup>Rn pode passar. As partículas alfas emitidas durante a desintegração do radônio ionizam o ar no interior dessa câmara. Neste equipamento, ao longo de um eixo

longitudinal, encontra-se um eletrodo com potencial de 0 V. Esse eletrodo é ligado à entrada dos sinais. Estes sinais são transmitidos para rede eletrônica que faz o processamento digital (Saphymo GmbH 2012).

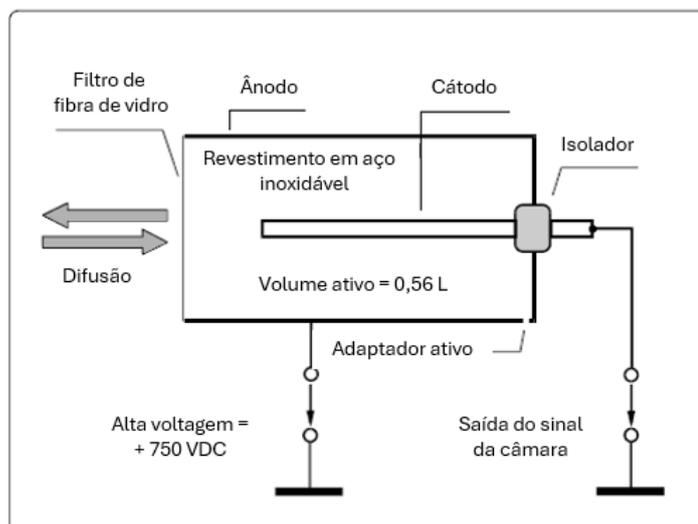


Figura 2: Esquema da câmara de ionização do detector AlphaGuard. Adaptado de Saphymo GmbH (2012).

### 3.3 Solos avaliados nesse trabalho

#### 3.3.1 Latossolos

Constituídos por material mineral, Latossolos são solos com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer horizonte A dentro de 200 cm a partir da superfície. Caso o horizonte A apresente mais que 150 cm de espessura o horizonte B estará dentro de 300 cm (EMBRAPA 2018). Esses solos são classificados em um segundo nível categórico: Brunos, Amarelos, Vermelhos e Vermelhos-Amarelos. Este estudo compreende os Latossolos Vermelhos que são definidos como solos com matiz 7,5YR ou mais amarelos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA 2018).

No terceiro nível categórico de Latossolos Vermelhos encontram-se: Perféricos, Acriféricos, Ácricos, Aluminoféricos, Distroféricos, Distróficos, Eutroféricos e Eutróficos. Para este estudo foram analisados os Distroféricos e Eutroféricos, ambos definidos como solos com teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (pelo  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de  $180 \text{ g kg}^{-1}$  a  $< 360 \text{ g kg}^{-1}$  de solo. A diferença entre eles é que no Distroféricos a saturação por bases é menor que 50% e no Eutroféricos é maior ou igual a 50%. Essas características devem ser encontradas na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA 2018).



### 3.3.2 Nitossolos

Assim como Latossolos, os Nitossolos são constituídos por material mineral, porém, apresentam horizonte B nítrico abaixo do horizonte A. Na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) contêm argila de atividade baixa ou alta desde que conjugada com caráter alumínico. Apresentam textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila iguais ou maiores que  $350 \text{ g kg}^{-1}$  de Terra Fina Seca ao Ar/TFSA desde a superfície do solo) e relação textural igual ou menor que 1,5 (EMBRAPA 2018). Esses solos são classificados em um segundo nível categórico: Brunos, Vermelhos e Háplicos. Este estudo compreende os Nitossolos Vermelhos que são definidos como solos com matiz 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (exclusive BA) (EMBRAPA 2018).

No terceiro nível categórico de Nitossolos Vermelhos encontram-se: Ta Alumínicos, Alumínicos, Distroféricos, Distróficos, Eutroféricos e Eutróficos. Para este estudo foram analisados os Nitossolos Vermelhos Eutroféricos, que são definidos como solos com saturação por bases  $\geq 50\%$  e teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (pelo  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de  $150 \text{ g kg}^{-1}$  a  $< 360 \text{ g kg}^{-1}$  de solo, ambos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA 2018).

### 3.3.3 Argissolos

São caracterizados pela presença de material mineral com argila de atividade baixa ou alta, caso esteja conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico. Seu horizonte B textural encontra-se imediatamente abaixo de horizonte A ou E, e apresenta os seguintes requisitos (EMBRAPA 2018): Horizonte plíntico e Horizonte glei, se presentes, não estarão acima nem serão coincidentes com a parte superficial do horizonte B textural. Esses solos são classificados em um segundo nível categórico: Bruno-Acinzentados, Acinzentados, Amarelos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos. Este estudo compreende os Argissolos Vermelho-Amarelos definidos como solos que não se enquadram nas outras subordens dos Argissolos (EMBRAPA 2018).

No terceiro nível categórico de Argissolos Vermelho-Amarelos encontram-se: Ta Alumínicos, Alumínicos, Ta Distróficos, Distróficos e Eutróficos. Para este estudo foram analisados os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos que são definidos como solos com

saturação por bases < 50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA 2018).

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa (Figura 2) compreende a área de expansão da Universidade Estadual de Campinas (denominada de Fazenda Argentina). Trata-se de uma gleba de 1,4 km<sup>2</sup> adquirida pela UNICAMP em 2013, e localizada a noroeste de Campinas/SP, situada ao lado do campus da Universidade. O terreno possui apenas uma pequena área com edificações, ocupadas pela Agência de Inovação da UNICAMP (INOVA). A área é margeada pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pela Universidade Estadual de Campinas Campus I e pela Rodovia Governador Adhemar Pereira de Barros (SP-340). Tem havido muita discussão sobre a forma pela qual a UNICAMP ocupará esta área, dentro de um conceito de um Hub Hub Internacional para o Desenvolvimento Sustentável, conforme o texto abaixo:

“A proposta de um Hub Internacional para o Desenvolvimento Sustentável é construir uma estrutura que combina e articula ações, por meio de parcerias e cooperações entre instituições que possuem competências e interesses voltados a prover contribuições concretas para o desenvolvimento sustentável de forma ampla, incluindo as ações que tenham impactos nos eixos social, econômico e ambiental. Sua visão é contribuir para o processo do desenvolvimento sustentável, agregando esforços nacionais e internacionais para produzir conhecimento, tecnologias inovadoras e educação das futuras gerações, mitigando e superando as fragilidades sociais, econômicas e ambientais da sociedade contemporânea.”  
(compilado de <https://www.hids.unicamp.br/>)

Assim, esta pesquisa sobre o radônio na área da Fazenda Argentina representa um background importante para futuras construções.

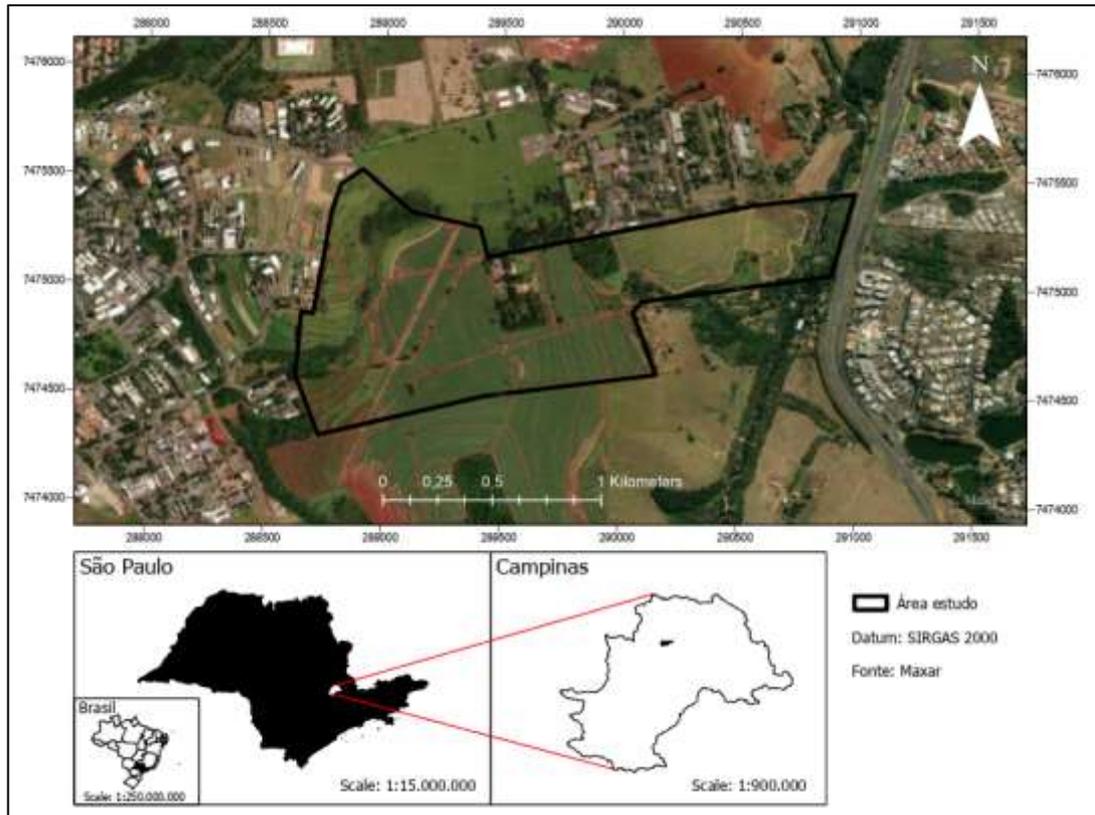


Figura 3: Aspectos gerais da área de estudo (polígono). Imagem principal obtida do Google Earth.

### ***Fisiografia***

A região de Campinas/SP apresenta clima tropical de altitude ou subtropical com verão quente e úmido, e inverno frio e seco, sob influência da Massa Tropical Atlântica e da Frontal Polar. A vegetação constitui-se de cerrados e florestas de planalto, dentre os quais, a área de estudo apresenta mata paludícola degradada. A hidrografia de Campinas é composta pela Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí. Três sistemas de aquíferos representam a hidrogeologia: Cristalino, dominado por rochas cristalinas, Diabásio formado por rochas intrusivas básicas e Tubarão que ocorre em sedimentos arenosos do Subgrupo Itararé (Iritani & Ezaki 2012, Pereira 1996).

A geomorfologia de Campinas é dividida em Planalto Atlântico, a leste, e em Depressão Periférica a Oeste. Nessa Depressão Periférica localiza-se a área de estudo (Christofolletti & Federici 1972).

### *Aspectos Geológicos e Pedológicos*

A área de estudo é composta por litologias tais como gnaisses indiferenciados do Complexo Itapira, granitoides da Suíte Granítica Jaguariúna, associação faciológica de diamictito, lamito e ritmito do Subgrupo Itararé e *sill* de diabásio (dominantes) da Formação Serra Geral (IG 2009) (Figura 3). De acordo com Alvarenga & Ladeira (2018), estas rochas geraram as classes de solo: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, Nitossolo Vermelho Eutroférico típico, Latossolo Vermelho Distroférico típico e Eutroférico típico, Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico e Eutrófico típico (Figura 4). Os Latossolos e Nitossolos são majoritários na área.

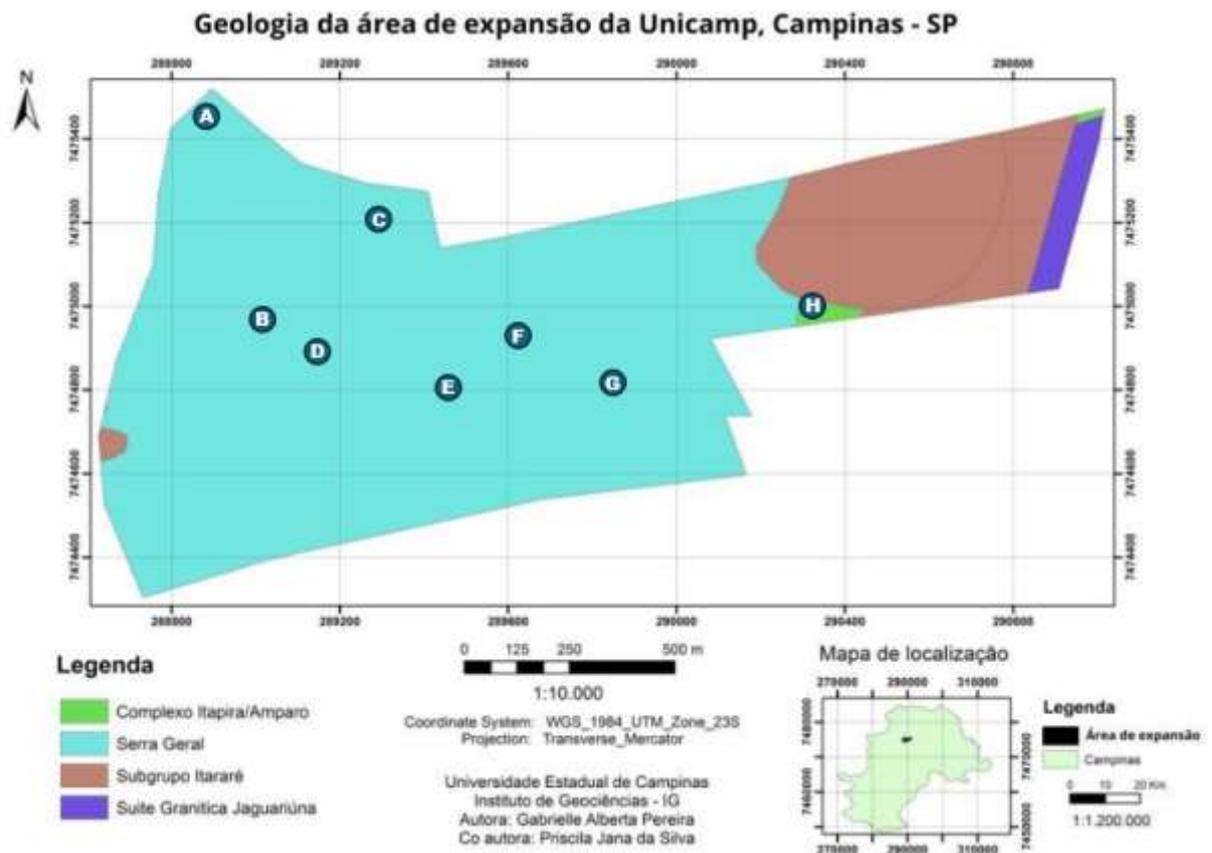


Figura 4: Mapa geológico da Fazenda Argentina com indicação dos pontos de amostragem.

Adaptado de Pereira *et al.* (2021).

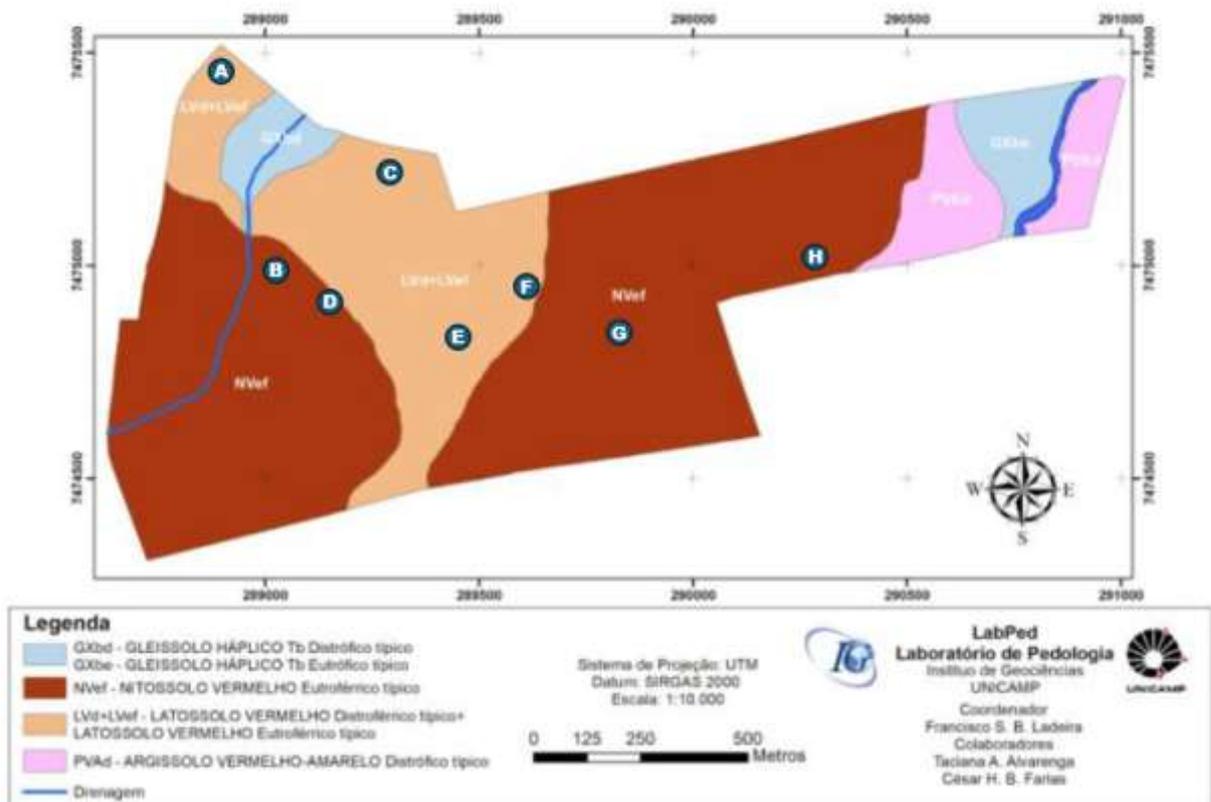


Figura 5: Mapa pedológico da Fazenda Argentina com indicação dos pontos de amostragem. Adaptado de Alvarenga & Ladeira (2018).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Etapa de campo

#### 5.1.1 Amostragem

Entre os dias 30 e 31 de agosto de 2022, foram coletadas amostras e realizadas as leituras de concentração da atividade de radônio e permeabilidade dos solos nos pontos de A ao H, conforme Figura 5. A definição desses pontos de coleta, foi baseada na classificação de Alvarenga & Ladeira (2018), com o objetivo de analisar quatro replicatas de cada classe de solo (Nitossolo e Latossolo).



Figura 6: Pontos de amostragem (detalhes sobre a localização da área estão na Figura 2). Imagem principal obtida do Google Earth.

Após a investigação das características dos solos, o ponto H, identificado como Nitossolo pela fonte consultada, apresentou aspectos diferentes dessa classe, os quais sugerem a presença da classe de Argissolos. Por essa razão, neste trabalho, optou-se por referenciar o ponto H como Argissolo. Corroboram esta classificação algumas características apresentadas na seção Resultados e Discussão.

Para as coletas, foi delimitada uma estação de trabalho, com o auxílio de cordas, com as quais se delimitou um triângulo equilátero de 5 m de lado (Figura 6). Este triângulo foi utilizado como referência para coleta dos dados.

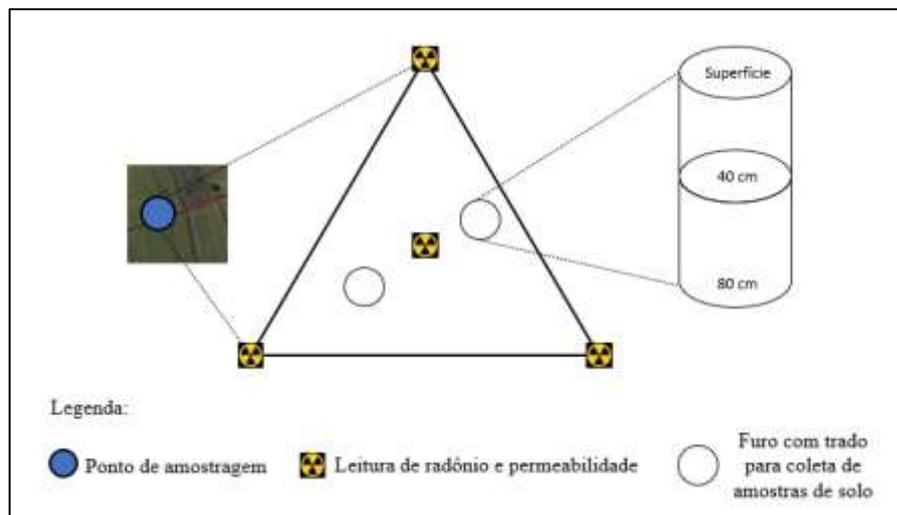


Figura 7: Esquema da estação de trabalho para a coleta de amostras do solo e obtenção das leituras de concentração da atividade de radônio e valores de permeabilidade. O lado do triângulo equivale a 5 m.

Em cada ponto de A a H, indicados na Figura 5, com trado manual com amostrador de 7 cm de diâmetro, foram feitos dois furos de 80 cm de profundidade para realizar a coleta do solo. A profundidade máxima escolhida foi classificada como horizonte B, e esta classificação foi baseada nos perfis de solos observados na área, sendo este o horizonte mais evoluído. Em cada furo, foram coletadas amostras da superfície, aos 40 cm e aos 80 cm de profundidade (Figura 6), com exceção do ponto H, no qual foi coletado apenas amostra de superfície e em 40 cm, devido à resistência física no momento da perfuração do perfil de solo. Foram totalizadas, portanto, três amostras por furo, seis amostras por ponto e 46 amostras no total. As amostras foram colocadas em sacos plásticos e identificadas para posterior análise.

Nove detectores DTPA foram instalados no interior do edifício da Agência de Inovação da UNICAMP (INOVA) localizado no ponto F (Figura 5), para o estudo da concentração da atividade do radônio em ambiente interno. Com auxílio de fita dupla face, estes detectores foram fixados na parede a uma altura entre 1,5 m e 2,0 m em relação ao piso do ambiente. Os locais de instalação estão descritos na Tabela 2. Fotos sobre os locais estudados constam no Anexo B. Esta altura de instalação é recomendada devido à altura da respiração humana (Dias 2017). Os detectores foram instalados no dia 31 de agosto de 2022 e foram retirados no dia 17 de março de 2023 (aproximadamente, 6 meses).

Tabela 2: Identificação dos ambientes na Agência de Inovação da UNICAMP onde foram instalados os detectores DTPA.

<b>Identificação do Detector</b>	<b>Ambiente</b>
2430	Sala Reunião Diretoria
2431	Sala de infraestrutura
2432	Salão Parceria
2433	Informática
2434	Copa
2435	Área de Eventos-1
2436	Sala PI
2437	Sala Administrativa
2438	Área de Eventos-1

### 5.1.1.1 Permeabilidade do solo

Os vértices e o centro do triângulo da estação de trabalho (Figura 5) foram utilizados como referência para a coleta dos dados de permeabilidade, a qual foi obtida por um permeâmetro RADON-JOK<sup>®</sup> (Figura 7). Trata-se de um equipamento portátil de manuseio relativamente simples, fabricado pela RADON V.O.S, da República Tcheca.

O procedimento se iniciou com a fixação de uma sonda com 100 cm de comprimento, mediante percussão (marreta com 5 kg), a qual é fincada no solo a uma profundidade de 80 cm (portanto, 20 cm ficam acima do solo). Esta sonda consiste em um tubo de aço (10 mm de diâmetro externo e orifício central com 5 mm), a qual dispõe de uma ponteira móvel na extremidade inferior. Após a introdução do tubo no solo, e com a ajuda de uma haste que passa através do orifício do tubo, a ponteira é afastada do tubo por meio de percussão, até gerar uma distância de 5 cm no solo (Figura 8). Ao final tem-se, um espaço vazio de 5 cm na extremidade do tubo. Nesse espaço os gases provenientes do solo ficam armazenados. Uma mangueira de silicone conecta a extremidade superior do tubo ao permeâmetro. Este equipamento mede o tempo (t) necessário para encher um reservatório sanfonado (fole) com volume de 2000 cm<sup>-3</sup>, o qual é acionado por gravidade mediante um peso, conforme Figura 7. Foram amostrados quatro pontos por estação de trabalho, e uma triplicata em cada ponto, totalizando 96 leituras. Essas leituras foram registradas e por meio da Equação 1 foi calculada a permeabilidade (Castelluccio *et al.* 2015):

$$k = \frac{(Q \cdot \mu)}{(F \cdot \Delta P)}$$

Equação 1: Permeabilidade do ar no solo.

Onde:

Q (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) = fluxo de ar na sonda = 0,002 t<sup>-1</sup>

μ (Pas) = viscosidade dinâmica do ar = 1,75<sup>-05</sup>

F (m) = Fator de forma = 0,149

ΔP (Pa) = Diferença de pressão entre a superfície e a área ativa da sonda = 2,16 kPa para um peso e 3,75 kPa para dois pesos.

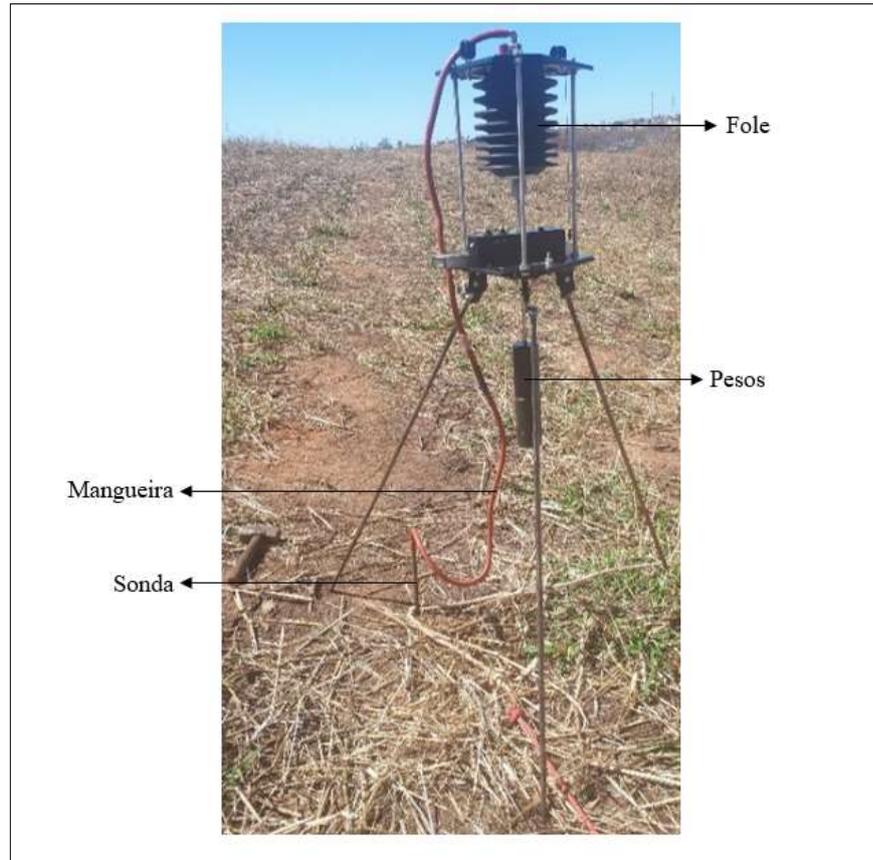


Figura 8: Permeâmetro RADON-JOK<sup>®</sup> (Fonte: Próprio Autor)

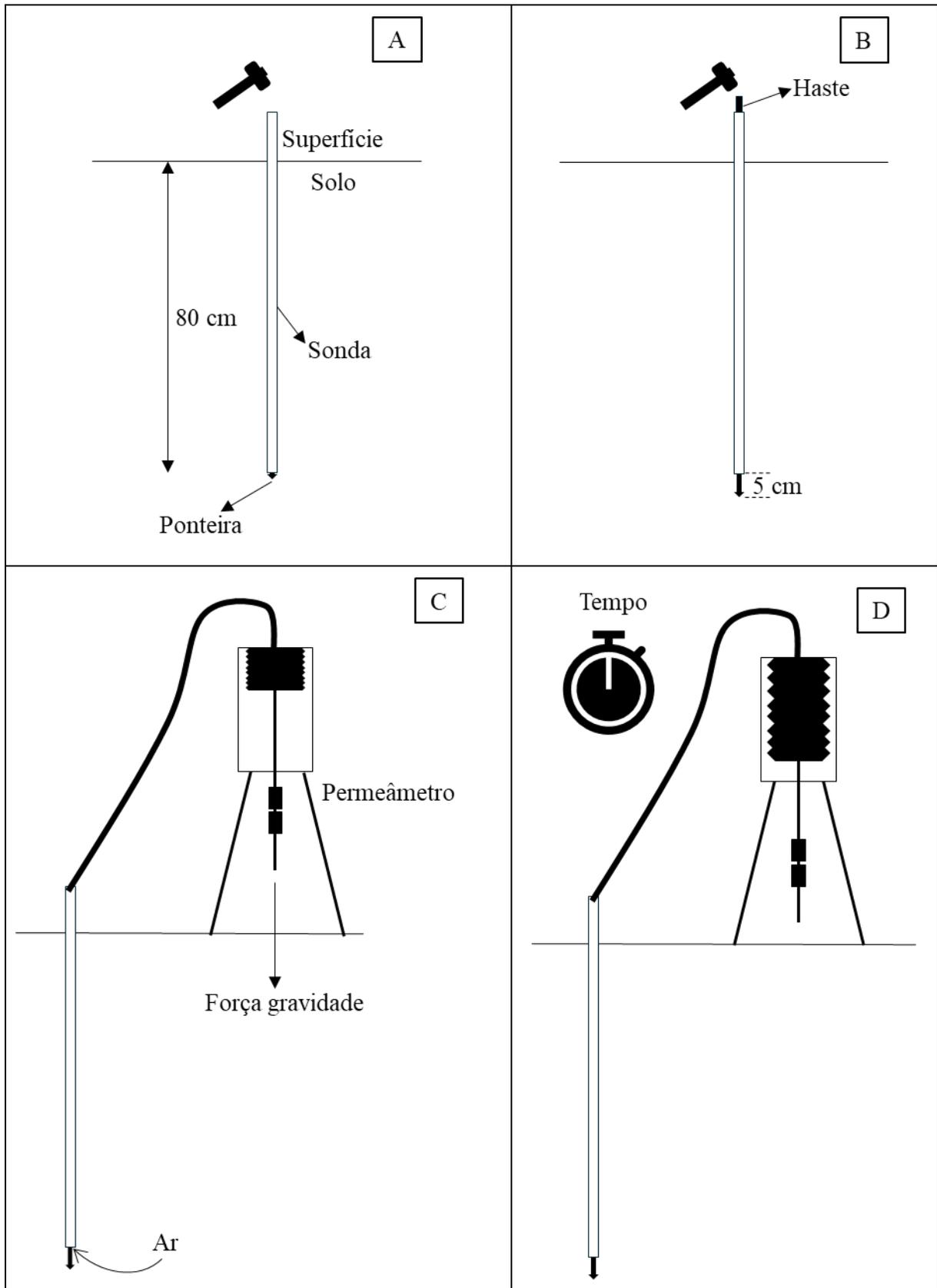


Figura 9: Esquema para obtenção da permeabilidade do solo: A – Instalação da sonda, B – Afastamento da ponteira, C – Instalação do permeômetro e D – Obtenção do tempo para preencher o fole.

Segundo Neznal *et al.* (2008), medidas que ultrapassam 1200 segundos devem ser consideradas como limite para baixa permeabilidade, e seu valor deve ser reportado como  $5,20 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ . No presente estudo, este valor foi encontrado apenas para o ponto H.

#### 5.1.1.2 Concentração da atividade de radônio

Após a leitura da permeabilidade do solo, o equipamento *AlphaGUARD*<sup>®</sup> (Figura 9) foi conectado por meio de uma mangueira à sonda fincada ao chão. Foram registrados os valores das concentrações de atividade de radônio, aproximadamente a cada minuto, durante 15 minutos. Após a leitura do primeiro vértice do triângulo, seguiu-se para o seguinte até completarem os três vértices e, finalmente, a última leitura no centro do triângulo, sendo o procedimento repetido para todos os pontos de amostragem, totalizando 480 leituras.



Figura 10: Equipamento *AlphaGUARD*<sup>®</sup>. (Fonte: Próprio Autor)

### 5.1.1.3 Potencial de radônio (RP)

Com os resultados das medidas de concentração da atividade do radônio e da permeabilidade do solo, calculou-se o valor de RP pela Equação 2, desenvolvida por Neznal *et al.* (2008):

$$RP = \frac{(C_A - 1)}{(-\log k - 10)}$$

Equação 2: Potencial de radônio.

Onde:

$C_A$  (kBq m<sup>-3</sup>) = Concentração da atividade de radônio.

$k$  (m<sup>2</sup>) = Permeabilidade.

Para classificar o RI (Índice de Radônio) dos pontos amostrados, foram utilizados os valores do terceiro quartil dos resultados obtidos do RP (Potencial de Radônio). Segundo Neznal *et al.* (2008) para fins de determinação do RI, o terceiro quartil é definido como: valor numérico que delimita os 75% dos dados de um conjunto de N medidas. É calculado da seguinte forma: os dados são organizados em ordem crescente, o terceiro quartil é o valor posicionado em N75 dessa ordem, onde N75 é igual a  $0,75N + 0,25$ , arredondado para o número inteiro inferior mais próximo (Figura 10).

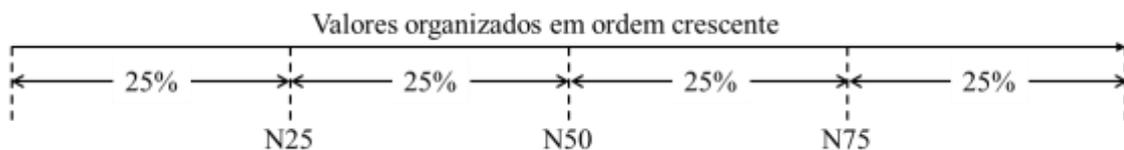


Figura 11: Indicação dos quartis de um conjunto de N medidas.

Devido à heterogeneidade dos solos e das rochas haverá dificuldades na obtenção das medidas de permeabilidade (Gruber 2013). O resultado conseguido no cálculo do terceiro quartil tem a finalidade de mitigar essa situação não ideal, e se justifica para minimizar anomalias dos resultados de permeabilidade e possíveis *outliers* (Neznal *et al.* 2008).

## 5.2 Etapas de laboratório

### 5.2.1 Quarteamento e secagem das amostras

Para fins de análises químicas e mineralógicas, em uma bancada limpa foi colocada uma folha de papel pardo e a porção da amostra coletada em campo foi distribuída

sobre essa folha. Com a ajuda de espátula plástica, foi formada uma pilha cônica com a amostra. Essa pilha foi dividida em quatro porções iguais, as quais foram juntadas em duas porções diagonais. Uma das duas porções formadas foi novamente homogeneizada, repetindo-se o processo de separação até a obtenção de uma massa suficiente de amostra para realização das análises químicas, mineralógicas e granulométricas (Figura 11).



Figura 12: Sequência do quarteamento das amostras.

### 5.2.2 Análise granulométrica

Para determinação da distribuição granulométrica da amostra, foi utilizada a técnica de difração a laser, na qual uma radiação eletromagnética na região do visível, e com comprimento de onda fixo (laser), interage com partículas dispersas da amostra. Nessa técnica, a variação angular da luz difundida permite identificar os tamanhos das partículas presentes na amostra, sendo que o ângulo de dispersão será inversamente proporcional ao tamanho da partícula (Malvern 2015).

Para realização do ensaio, foram adicionados 1 g de amostra de solo e 40 mL de solução hexametáfosfato de sódio 4% (defloculante) em tubo tipo Falcon, o qual foi colocado em um agitador orbital e mantido sobre agitação durante 24 h. Após o preparo com o defloculante, foi realizado um peneiramento úmido das amostras, em peneiras de 500, 1000 e 2000  $\mu\text{m}$ . Em seguida, a porção peneirada ( $\leq 500 \mu\text{m}$ ) foi levada ao equipamento para análise. Importante destacar que o peneiramento se fez necessário, pois o equipamento de difração a laser (*Particle Size Analyser*, marca: CILAS, modelo: 1090 L) utilizado, permite analisar somente partículas com diâmetros na faixa de 0,04  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ .

No equipamento a amostra foi homogeneizada e dispersa durante um minuto, com agitação constante, ultrassom e circulação pelo sistema. Durante todo o procedimento de análise foi utilizada água filtrada em cartucho de 0,5  $\mu\text{m}$  de porosidade, como dispersante. A obscuração da cuba de análise variou entre 5% e 30%; o controle das medidas foi realizado

pelo padrão *P3 ACIL*. Entre as análises das amostras foi realizada a leitura do branco de maneira automática pelo equipamento.

### 5.2.3 Moagem para análises de difração e fluorescência de raios X

Foram adicionados aproximadamente 20 g da amostra secada a 110 °C (24 h) ao jarro de moagem de ágata. Após fechamento do jarro, este foi levado ao moinho da marca *Glen Creston*, sendo moídas por 15 minutos (O'Connor & Chang 1986). Este tempo foi suficiente para reduzir a granulometria da amostra para tamanho <63 µm.

### 5.2.4 Geoquímica

Para análise de elementos maiores e menores foi utilizado o método fluorescência de raios X (FRX). Nessa técnica, a amostra recebe radiação proveniente de uma fonte de raios X que possibilita a retirada de elétrons das camadas mais internas do átomo. A fim de manter a estabilidade do átomo, elétrons de camadas superiores decaem ocupando essa vacância. Essa movimentação gera fótons, detectados pelo instrumento, que correspondem às diferenças de energia dos subníveis envolvidos, característicos de cada elemento. Assim, a técnica pode ser utilizada para obtenção da composição química do material (Jenkins 2012).

Inicialmente, uma porção da amostra de solo foi calcinada a 1200 °C (perda ao fogo por ignição) e os pesos inicial e final foram computados. Da amostra calcinada, foi pesado aproximadamente 1 g de amostra e 6 g de fundente (tetraborato e metaborato de lítio), e adicionou-se 1 mL de desmoldante (iodeto de lítio), seguiu-se da fusão em cadinho de platina e ouro a 1400 °C. A pastilha obtida foi enviada para análise no equipamento de fluorescência de raios X, Phillips – PW2404.

Para a realização destas análises utilizou-se o método desenvolvido por Vendemiatto & Enzweiler (2001). O controle de qualidade dos resultados foi realizado pela análise paralela de materiais de referência (GSS-2, GSS-5 e GSS-7) e de duplicatas de algumas amostras. As incertezas dos valores, expressam a exatidão dos resultados e foram estimadas pela combinação de dados de precisão e de veracidade. Os dados de precisão provêm de análises de duplicatas de amostras reais e os de veracidade de resultados do laboratório em dez rodadas do teste de proficiência *GeoPT™* da International Association of Geoanalysts (IAG) (<http://www.geoanalyst.org/>). O método de cálculo das incertezas encontra-se em Enzweiler & Vendemiatto (2013).

### 5.2.5 Mineralogia

Para identificação dos minerais presentes nas amostras de solo, foi realizada a análise de difração de raios X (DRX). Nessa técnica analítica é possível observar a estrutura cristalina, que permite a identificação dos minerais, por meio de uma varredura na amostra, em uma faixa de ângulo previamente determinada. No equipamento uma radiação monocromática é gerada por um tubo de raios X; o feixe de radiação incide na amostra sendo então difratado.

Nos valores dos ângulos em que se obtém uma interferência construtiva entre as ondas difratadas, será observado um pico de difração. Para que essa interferência ocorra, a lei de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ) deve ser satisfeita indicando, então, qual a distância entre os planos cristalinos da amostra. O conjunto dos planos é representado no difratograma.

A partir do difratograma obtido é possível comparar os dados com os padrões de referência (*International Committee for Diffraction Data – ICDD*), e por meio de uma pesquisa qualitativa identificar os minerais presentes na amostra. Uma vez identificados os minerais, o uso do método de refinamento de Rietveld permitirá obter informações semiquantitativas referentes aos materiais presentes na amostra. (Pecharsky & Zavalij 2005).

Neste trabalho, a análise mineralógica foi realizada a partir das amostras moídas, conforme descrito no item 5.2.3, que foram colocadas em porta-amostra específico, preparadas no modo *front-load* e levadas para o equipamento de difração de raios X (modelo: D2 Phaser, marca: Bruker e com ânodo de Cu com  $\lambda=1,56\text{nm}$ ). O ensaio foi feito com varreduras de 5-80°, passo de 0,02° e velocidade de 0,02°/s. Os resultados encontrados foram tratados no *software* HighScore e o banco de dados utilizado para a pesquisa qualitativa foi o *COD reference database 2012*.

#### 5.2.5.1 Separação de frações granulométricas do solo para difração de raios X

Uma das amostras coletadas de solo da classe do Latossolo foi colocada em um béquer de 2 litros juntamente com um volume de água suficiente para cobrir a amostra e realizar a dispersão dela. Após um período em agitação mecânica, foram separadas duas frações da amostra: decantada e sobrenadante. Da amostra decantada, com auxílio de um ímã, foram separadas as partículas com afinidade magnética e as siliciclásticas. Em seguida, estas duas frações foram submetidas à moagem úmida no mesmo moinho supracitado. Foram

utilizadas 3 g de amostra e 7 mL de água destilada (O'Connor & Chang 1986). Estes materiais foram utilizados para verificação da mineralogia via difração de raios X.

#### 5.2.6 Análises de isótopos

A série de decaimento do  $^{238}\text{U}$  gera o  $^{226}\text{Ra}$ , que é o precursor imediato do  $^{222}\text{Rn}$ . Ambos, urânio e rádio, devem estar distribuídos nos solos em minerais. As ações antrópicas, o modo como esses elementos interagem com os solos e suas quantidades naturais são fatores que influenciam na quantidade desses isótopos nas amostras. Portanto, conhecer a concentração desses elementos permite compreender o comportamento do radônio.

Para análise dos isótopos foi utilizada a técnica de espectroscopia gama que detecta eventos que ocorrem no núcleo atômico. A técnica consiste em coletar a radiação gama por um cristal semicondutor que transfere energia para o detector. Essa interação absorve completamente os raios gama, resultando em um fotopico com valor de energia definido. Assim, é possível comparar os valores encontrados nas amostras com os valores tabelados dos radionuclídeos (Gilmore 2008).

Para análise de isótopos ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ) foram utilizadas as amostras de solo das porções residuais da homogeneização. Optou-se por realizar a análise na mistura das três profundidades do mesmo furo. Assim, as amostras coletadas foram homogeneizadas gerando uma amostra única, e essas foram nomeadas de acordo com os pontos de A ao H.

As amostras foram inseridas em um recipiente metálico e levadas à estufa a 110 °C por 24 horas. Após esse período, foi realizada a pesagem das amostras e o recipiente retornou a estufa a 110 °C por mais duas horas. Após isso, as amostras foram novamente pesadas. Como nenhuma delas apresentou desvio superior a 2% entre as pesagens, considerou-se que a amostra atingiu peso constante, e, desse modo, pôde ser feita a próxima etapa do processo.

Após secagem, foram adicionadas 10 esferas de aço inox (diâmetro 2,54 cm) nos recipientes das amostras A–H. Os recipientes foram selados, utilizando uma recravadeira, e levados ao moinho de jarros por quatro horas com aproximadamente 30 rpm (Figura 12).



Figura 13: Moinho de jarros com os recipientes metálicos contendo as amostras e esferas para moagem. (Fonte: Próprio Autor)

Terminada a moagem, o recipiente foi aberto com auxílio de abridor de latas e a amostra foi transferida para peneira Série US No. 35 (500- $\mu\text{m}$  ou 32 mesh). A amostra foi peneirada e a fração passante foi colocada em porta-amostra específico do equipamento. Após 20 dias (tempo necessário para assegurar o equilíbrio radioativo entre o  $^{226}\text{Ra}$  e seus filhos  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ ), o procedimento analítico continuou. Dois detectores foram utilizados para realização da espectrometria gama, o detector CANBERRA HPGe e ORTEC HPGe, para os quais foram utilizados os programas Genie 2000 e Maestro, respectivamente. Na Tabela 3 estão apresentados os isótopos e os fotopicos que foram utilizados para identificação e quantificação.

Tabela 3: Isótopos e energias do fotopico para identificação e quantificação.

Isótopo	Fotopico (keV)
$^{226}\text{Ra}$	609
$^{228}\text{Ra}$	911
$^{210}\text{Pb}$	46,5
$^{234}\text{Th}$	63

Os fotopicos de  $^{234}\text{Th}$  e  $^{228}\text{Ra}$  são os apresentados nos resultados originais. Segundo Santos Júnior *et al.* (2009), essas energias podem ser utilizadas para estimar a concentração de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , respectivamente, desse modo os resultados apresentados neste trabalho consideram esse aspecto

5.2.7 Tratamento dos DTPA (Detector de traços de partículas alfas) para obtenção da concentração da atividade de radônio no ambiente interno.

Com objetivo de obter o resultado da concentração da atividade de radônio em ambientes internos, foram utilizados detectores DTPA do tipo CR-39. As câmaras de difusão (Figura 13-A) que envolvem os substratos plásticos, devidamente identificadas (Figura 13-B), foram abertas e os detectores CR-39 (Figura 13-A) foram retirados e colocados em uma bandeja metálica específica para esta preparação. Em seguida, foram imersos durante 60 minutos no banho de solução de hidróxido de sódio 6,25 M a uma temperatura controlada de 98 °C. Na sequência, foi realizado um enxágue com água destilada, a fim de retirar o excesso de NaOH dos detectores e resfriá-los. Depois disso, os substratos foram imersos durante 20 minutos, com frequente agitação manual da bandeja, em solução 1:50 de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) para a neutralização da ação do NaOH, e a seguir imersos em água destilada durante 10 minutos, com frequente agitação. Por fim, a bandeja com os detectores foi colocada em estufa (40 °C) até a secagem completa dos detectores (Dias 2017).

Após a secagem, os substratos plásticos foram retirados da bandeja e submetidos à análise por microscopia ótica convencional automatizada. Uma imagem dos traços da radiação alfa, impressa nos detectores após o tratamento químico descrito, é mostrada na Figura 13-C. Para a análise, foi utilizado o sistema TASLImage™, composto por hardware (mesa x-y-z e microscópio óptico da marca Nikon) e software desenvolvido para a detecção, contagem e análise de traços nucleares. Todo o procedimento foi realizado no Laboratório Poços de Caldas da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

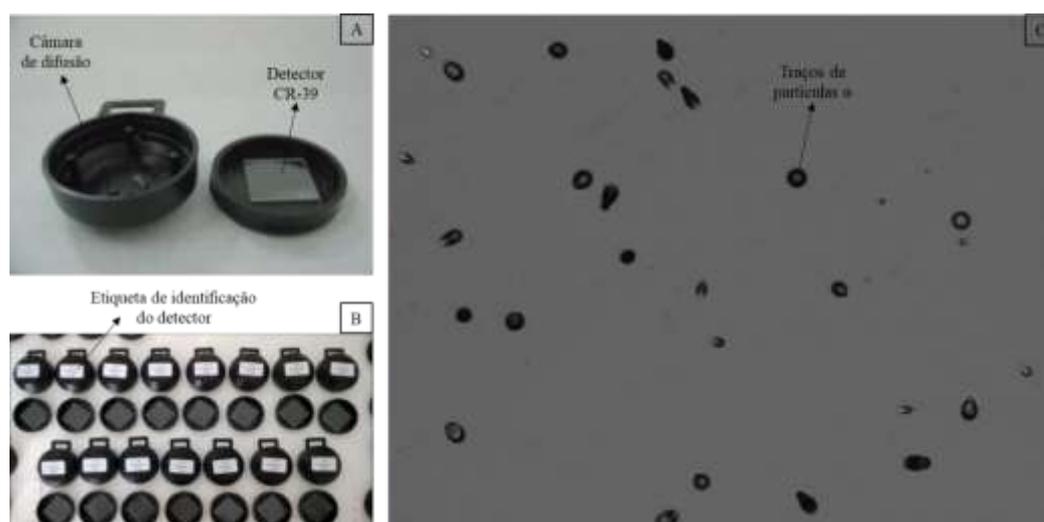


Figura 14: Detectores DTPA usados neste estudo: A - Detector CR-39 e câmara de difusão (base e tampa), B – Identificação dos detectores DTPA e C - Imagem de traços nucleares alfa capturada por microscopia ótica. Adaptado de Dias (2017).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Geoquímica dos elementos maiores, menores e índice de intemperismo

As frações mássicas dos elementos maiores e menores obtidas por FRX foram determinadas para os pontos de A ao G, na profundidade de 80 cm do solo, a mesma profundidade onde foram coletadas as leituras de permeabilidade e concentração da atividade de radônio. A exceção ocorreu no ponto H, no qual foi considerada a profundidade de 40 cm, devido a dificuldades apresentadas na etapa de amostragem (solo muito compactado). Os resultados são apresentados na Tabela 4. Observa-se que nos pontos A, C, E e F, correspondentes aos Latossolos, o valor médio da concentração de  $\text{SiO}_2$  é maior, seguido por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ . Nota-se a mesma característica no Nitossolo, referente aos pontos B, D e G. Por sua vez, os resultados obtidos no ponto H, mostraram um valor de  $\text{SiO}_2$  muito superior aos demais pontos, aspecto que sugere se tratar, de fato, de Argissolo. Em adição, o valor da relação molecular de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Ki) é igual a 6,04 no ponto H, resultado superior ao indicativo de horizonte latossólico ( $\leq 2,2$  – normalmente menor que 2,0; SiBCS).

Tabela 4: Porcentagem mássica na forma de óxidos dos elementos maiores e menores obtidas por FRX, perda ao fogo (P.F. a 1200 °C) e CIA (Índice Químico de Alteração, CIA/*Chemical Index of Alteration*; Nesbitt & Young 1982) dos pontos estudados e ordenados por classe de solo.

Classes dos solos	Pontos de amostragem	Óxidos (%mássica)										P.F. (1000 °C)	CIA	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ki)
		$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	MnO	MgO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$			
Latossolo	A	37,12	6,33	20,99	23,19	0,11	0,14	0,09	0,03	0,04	0,10	11,30	99,24	1,77
	C	41,80	4,73	22,08	19,72	0,09	0,18	0,07	0,04	0,04	0,10	10,70	99,33	1,89
	E	30,32	5,71	24,96	26,08	0,11	0,20	0,09	0,04	0,04	0,11	12,10	99,32	1,21
	F	31,42	5,33	25,00	24,59	0,10	0,20	0,06	0,03	0,03	0,12	13,20	99,52	1,26
Média		35,17	5,53	23,26	23,40	0,10	0,18	0,08	0,04	0,04	0,11	11,83	99,35	1,53
Nitossolo	B	38,72	5,48	22,63	21,19	0,10	0,16	0,08	0,04	0,04	0,10	11,00	99,30	1,71
	D	30,75	5,72	24,78	25,15	0,13	0,21	0,08	0,05	0,04	0,12	12,50	99,32	1,24
	G	30,15	6,24	23,50	26,77	0,13	0,23	0,20	0,04	0,03	0,13	12,60	98,86	1,28
Média		33,21	5,81	23,64	24,37	0,12	0,20	0,12	0,04	0,04	0,12	12,03	99,16	1,41
Argissolo	H	73,61	1,28	12,19	5,50	0,04	0,19	0,07	0,04	0,68	0,07	5,90	93,91	6,04

T - Todo o ferro da amostra foi calculado como ferro trivalente.

A média dos valores encontrados de  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  (23,40%) para os Latossolos estão dentro da faixa de 19,6% a 36,5% reportada por Ker (1997). O valor médio encontrado ( $\sim 234 \text{ g kg}^{-1}$ ) está dentro da faixa de  $\geq 180$  e  $< 360 \text{ g kg}^{-1}$  que classifica o solo como distroféricos, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS).

Nunes (2001) apresenta em seu trabalho, valor médio de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 38,53%, 19,27% e 23,17%, respectivamente, em Nitossolos. Esses valores estão próximos aos encontrados no presente estudo. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS), Nitossolos Vermelhos Eutroféricos apresentam teores de óxido de ferro de  $150 \text{ g kg}^{-1}$  a  $< 360 \text{ g kg}^{-1}$ . O valor médio de óxido de ferro encontrado no presente estudo (24,37% ou  $244 \text{ g kg}^{-1}$ ) é um indicativo dessa classe de solo, também coerente com os dados obtidos no trabalho de Alvarenga & Ladeira (2018).

Já os valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12,9%) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  (5,50%) do ponto H são próximos aos valores médios de 13,26% e 4,86%, respectivamente, apresentados por Neto (2013) para Argissolos Vermelhos e Argissolos Amarelos. De acordo com este autor, os valores destes componentes tendem a aumentar com a profundidade. Contudo, não foi possível afirmar as mesmas características neste estudo, uma vez que as análises geoquímicas foram feitas em apenas uma profundidade.

Os resultados da geoquímica podem auxiliar na avaliação do intemperismo dos solos e, portanto, no entendimento da mobilidade dos elementos durante as transformações pedogenéticas. Neste trabalho, optou-se por utilizar Índice Químico de Alteração, CIA/*Chemical Index of Alteration* (Nesbitt & Young 1982) que apresenta melhor performance em solos tropicais originários de rochas básicas (Duzgoren-Aydin & Aydin 2003, Okewale & Coop 2018). Este índice é calculado pela Equação 3:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$$

Equação 3: cálculo do CIA.

Segundo Nesbitt & Wilson (1992), valores entre 44 e 66 são característicos de solos com intemperismo baixo ou moderado. Por sua vez, em solos com intemperismo intenso, o valor do CIA pode chegar a 100. Os resultados calculados referentes aos solos estudados neste trabalho mostraram-se acima de 90, caracterizando solos com intemperismo intenso.

Por fim, a Tabela 5 mostra a estatística básica das amostras dos pontos amostrados com exceção do ponto H. Pode ser notado nesta tabela que os valores médios e a mediana são muito próximos, o que indica uma tendência de distribuição normal das frações mássicas dos elementos maiores e menores nestes solos. Além disso, os coeficientes de variação (razão do desvio padrão sobre a média) são baixos (<18%, exceto no caso do CaO, cujas frações mássicas foram muito baixas), o que sugere um padrão geoquímico de solos homogêneos (Lich, 1989).

Tabela 5: Estatística básica dos resultados apresentados na Tabela 4 com exceção do ponto H.

Estatística	Óxidos									
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>Média</b>	34,33	5,65	23,42	23,81	0,11	0,19	0,10	0,04	0,04	0,11
<b>Desv.Pad.</b>	4,79	0,55	1,58	2,59	0,02	0,03	0,05	0,01	0,00	0,01
<b>Coef.Var.</b>	13,96	9,69	6,76	10,88	15,14	16,32	49,32	17,89	13,14	10,52
<b>Mediana</b>	31,42	5,71	23,50	24,59	0,11	0,20	0,08	0,04	0,04	0,11
<b>Valor Máx.</b>	41,80	6,33	25,00	26,77	0,13	0,23	0,20	0,05	0,04	0,13
<b>Valor Mín.</b>	30,15	4,73	20,99	19,72	0,09	0,14	0,06	0,03	0,03	0,10

## 6.2 Mineralogia

Os resultados obtidos por DRX das amostras da área de estudo são mostrados nas Figuras 14-A, B e C, nas quais estão agrupadas as classes de solo. Os difratogramas indicam, no eixo das abscissas, a posição do ângulo  $2\theta$  e, no eixo das ordenadas, a intensidade do sinal. Para facilitar a visualização da comparação entre os picos de difração das amostras e os picos de difração dos padrões, foram localizados os cinco picos mais intensos dos padrões e indicados ao menos três destes nos difratogramas. Apenas para o quartzo foram utilizadas quatro posições nos difratogramas dos Latossolos e Nitossolos, e dez posições no difratograma do Argissolo.

A partir dos difratogramas obtidos foi realizada a pesquisa qualitativa para identificar os possíveis minerais presentes no solo. Posteriormente, foi feito o refinamento de Rietveld, usado para quantificar os minerais identificados. Os resultados obtidos na geoquímica foram utilizados para restringir a pesquisa qualitativa. Desse modo, apenas minerais que continham os elementos apresentados na Tabela 4 foram considerados.

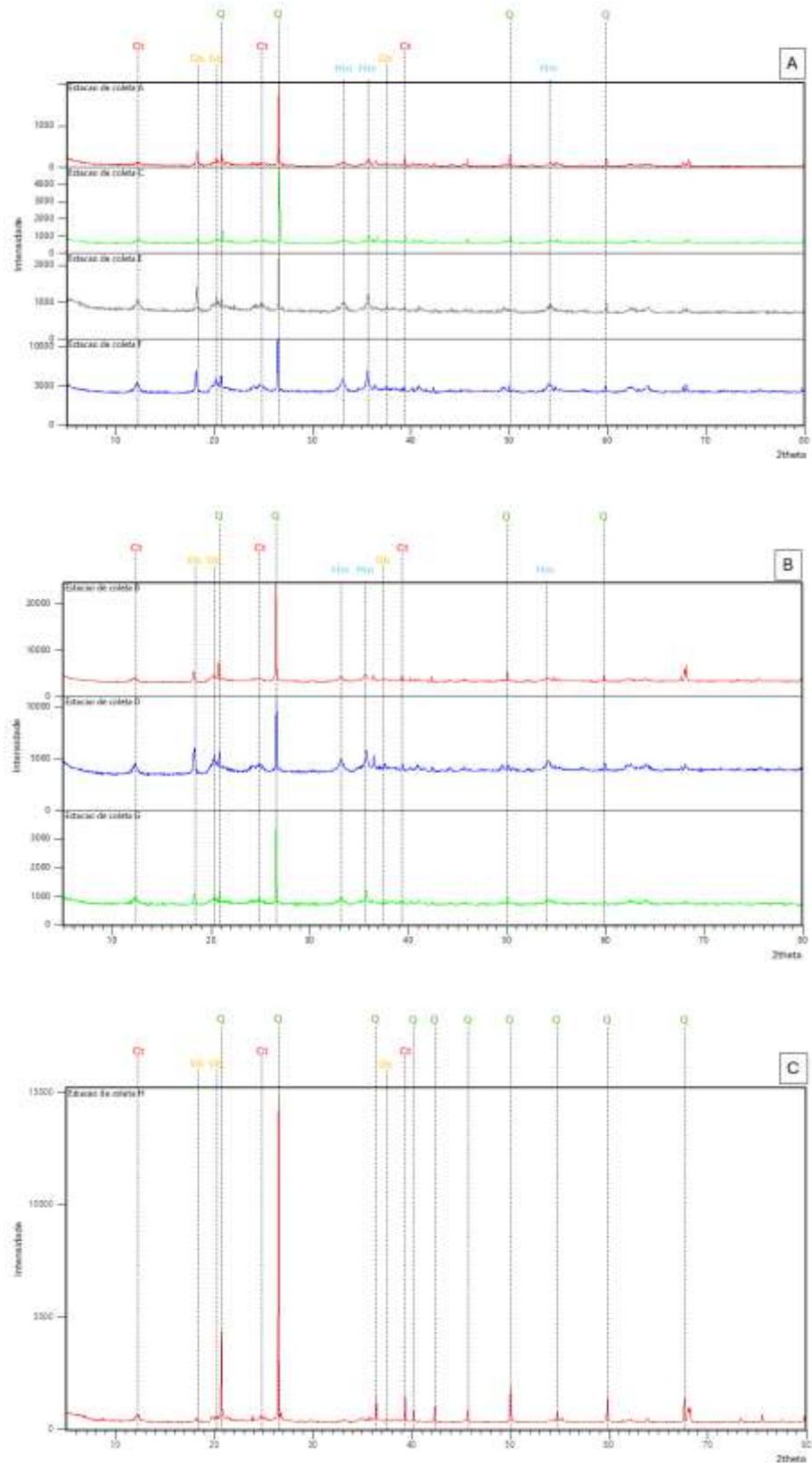


Figura 15: Difratoqramas das amostras com indicação das posições dos principais picos de difração dos padrões: A - Pontos A, C, E e F (Latossolos), B - Pontos B, D e G (Nitossolos) e C - Ponto H (Argissolo). Legenda: Q-Quartzo, Ct-Caulinita, Gb-Gibbssita e Hm-Hematita.

Observa-se que para os pontos que compreendem os Latossolos e Nitossolos, as análises de solo total resultaram na presença dos minerais: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Os estudos de Ferreira (2019) que tratam do Latossolo da mesma área pesquisada, apresentaram resultados semelhantes a estes, com exceção da goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), titanomagnetita ( $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$ ) e haloisita (polimorfo da caulinita) que não foram identificadas neste trabalho. Sugere-se que essas ausências sejam causadas pelo modo de amostragem, uma vez que Ferreira (2019) coletou as amostras em níveis de profundidade maiores (8,5 m; 6,0 m e 9,5 m). A presença de gibbsita, caulinita e óxidos de ferro, e ausência de esmectita (fórmula mais geral,  $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), está coerente com a intensidade máxima do intemperismo dos Latossolos e Nitossolos da área de estudo, que tende a lixiviar elementos alcalinos e alcalinos terrosos e manter Al, Fe e Si no perfil de alteração. Em geral, a caulinita foi o mineral dominante na maioria das amostras destes solos (Tabela 6).

Uma observação importante foi a ausência de hematita no ponto H, que compreende o Argissolo. Trata-se de um resultado compatível com o encontrado na Tabela 4, na qual o ponto H apresenta um valor de concentração de óxido de ferro abaixo dos demais. No mesmo ponto, os picos característicos do padrão de quartzo (PDF: 96-900-9667) localizados na posição  $50,109^\circ$  e  $68,096^\circ$  aparecem mais evidentes no difratograma, fato que sugere maior quantidade desse mineral quando comparado com os demais pontos (Pecharsky & Zavalij 2005). Os refinamentos de Rietveld apresentados na Tabela 6 confirmam essa hipótese.

Tabela 6: Resultados do refinamento de Rietveld nos pontos estudados.

Classe do solo	Ponto	Mineral (%)			
		Quartzo	Caulinita	Gibbsita	Hematita
Latossolo	A	35,3	27,9	23,8	13,0
	C	28,9	47,0	9,3	14,8
	E	11,9	47,9	18,9	21,2
	F	15,2	42,9	20,9	20,9
Nitossolo	B	38,7	34,0	14,7	12,6
	D	17,1	44,2	21,4	17,3
	G	23,4	43,8	12,9	19,9
Argissolo	H	66,6	32,3	1,1	-

As amostras resultantes da separação de fases sobrenadante (dominantemente silicática), magnética (óxidos de Fe e Ti) e decantada (quartzo e ilmenita) apresentaram os difratogramas, conforme Figuras 15-A, B e C. Nesses difratogramas foram identificados todos os picos anteriormente comentados, acrescidos dos picos da magnetita na fração magnética e ilmenita nas fases magnética e decantada (apenas análise qualitativa foi realizada).

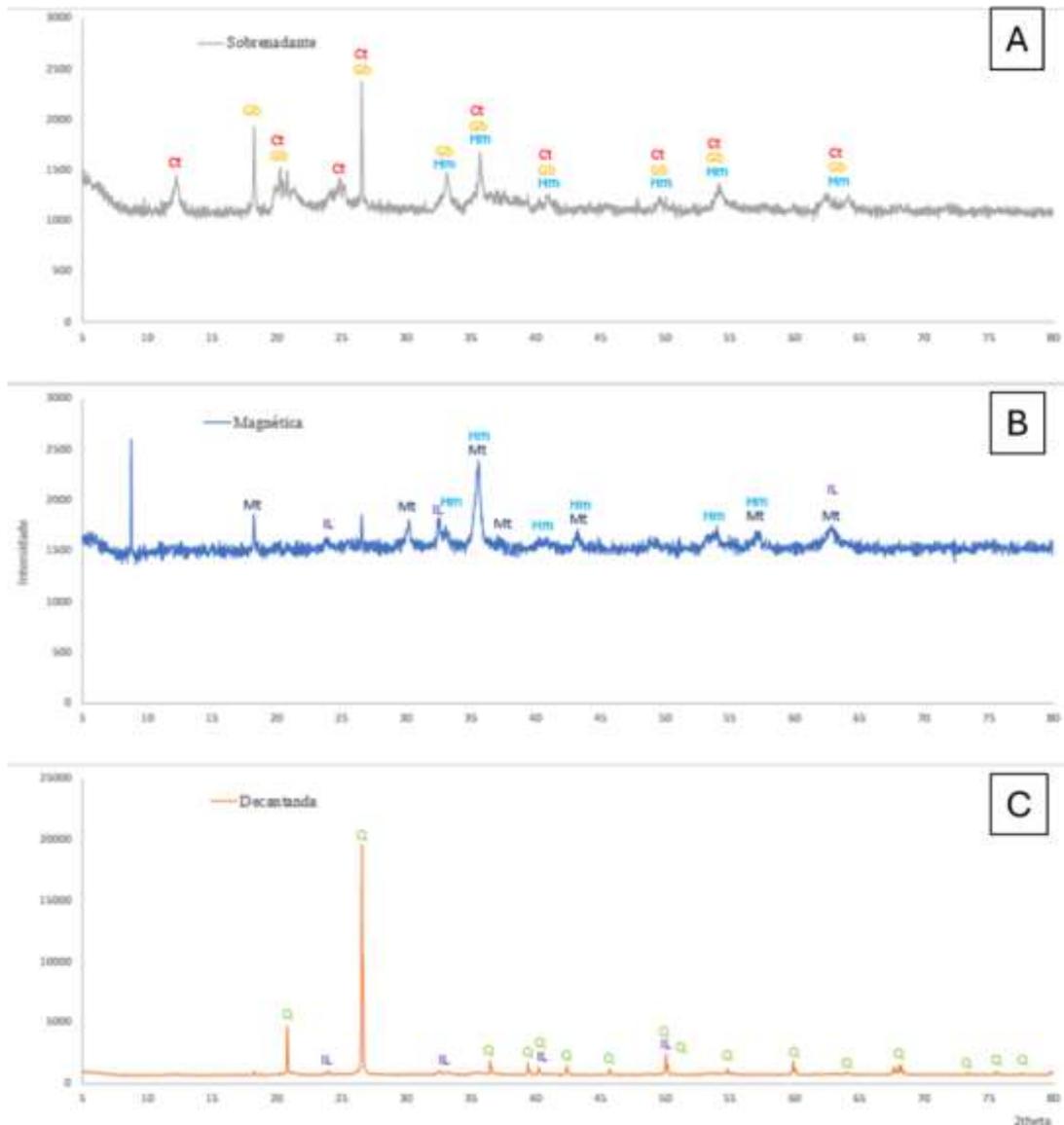


Figura 16: Difratoigramas de subamostras de solo obtidas por separação de fases: A - Sobrenadante, B - Magnética e C - Decantada. Legenda: Ct-Caulinita, Gb- Gibbsita, Hm- Hematita, Mt-Magnetita, IL-Ilmenita e Q-Quartzo.

Segundo Ferreira (1999) a fração argila do Latossolo é formada, principalmente, pelos minerais caulinita, gibbsita, goethita e hematita. Na Figura 15-A, esses minerais podem ser observados na porção sobrenadante da amostra em estudo, a exceção é o mineral goethita. Uma suposição para esse fato, que também ocorreu na difração do solo total, é que a goethita estaria em uma concentração insuficiente (<5%) para identificação e quantificação ou esse mineral pode estar ausente na profundidade coletada.

Quando observado o difratograma da porção do solo magnética, há a presença da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), outro mineral de ferro além da hematita. No solo total esse mineral não foi identificado, possivelmente, por sua baixa concentração.

Outro resultado obtido na fração magnética foi a identificação de biotita, no pico posicionado em  $8,77^\circ$ . Contudo, esse resultado precisa ser melhor investigado, uma vez que a análise foi realizada em solo derivado da Formação Serra Geral, que na porção oriental do Estado de São Paulo apresenta rochas intrusivas caracterizadas por diabásios (Machado *et al* 2005). Segundo Costa & Girardi (2004), essas rochas contêm, aproximadamente, 80-85% de plagioclásio e piroxênio (orto e clinopiroxênio) e, em menores proporções, minerais acessórios como a biotita, que não deveria ser identificada no difratograma por apresentar-se em pouca concentração. Além disso, para a pesquisa qualitativa foi definida a restrição por elementos químicos, baseada nos resultados da geoquímica. Por essa razão, o pico em questão poderia ser de algum mineral que contém um elemento não especificado nas análises de fluorescência de raios X.

A ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) foi identificada nas frações decantada e de separação magnética. A partir de imagens e microanálises de EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), Ferreira (2019) afirma a presença de ilmenita nos cristais de magnetita, formando microestrutura de exsolução. A análise do solo total realizada neste trabalho, não encontrou a ilmenita, porém os difratogramas das frações menores confirmaram os resultados observados por este autor.

### 6.3 Análise granulométrica

No peneiramento, todas as amostras de Latossolos e Nitossolos apresentaram grãos de quartzo, hematita e magnetita retidos nas peneiras de  $500\ \mu\text{m}$  e  $1000\ \mu\text{m}$ , e torrões do diabásio intemperizado, retidos na peneira de  $2000\ \mu\text{m}$ . Na amostra do Argissolo houve retenção de quartzo em todas as peneiras. Esse resultado é compatível com os encontrados na análise mineralógica, na qual a amostra de Argissolo apresentou alto teor de quartzo e nenhum pico de difração de hematita.

A partir dos resultados de difração a laser da porção  $<500\ \mu\text{m}$  foram elaborados os gráficos apresentados nas Figuras 16-A, B e C, nas quais cada gráfico representa uma classe de solo e seus pontos de amostragem.

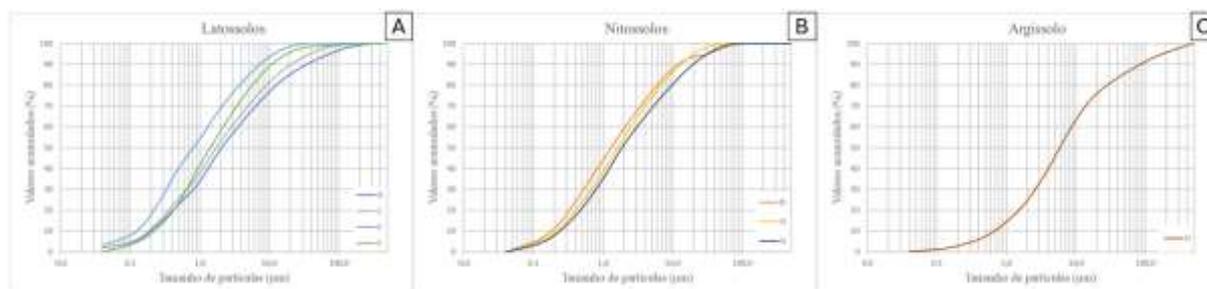


Figura 17: Distribuição granulométrica cumulativa da média dos resultados obtidos na análise granulométrica: A - Pontos A, C, E e F (Latosolos), B - Pontos B, D e G (Nitossolos) e C - Ponto H (Argissolo).

Na Figura 16 é possível observar a homogeneidade da distribuição granulométrica (frequência cumulativa) entre os pontos de mesma classe de solo, mesmo nas amostras coletadas em coordenadas distintas. Na amostra de Argissolo, não foi possível fazer essa avaliação, pois a coleta foi realizada em um único ponto, como justificada anteriormente.

Por meio dos dados obtidos nas análises de distribuição granulométrica foi elaborada a Tabela 7, na qual é apresentada a porcentagem de cada intervalo granulométrico.

Tabela 7: Média dos resultados obtidos na análise de granulometria dos pontos estudados e a razão silte/argila.

Ponto	Argila (%) ≤4,00 µm	Silte (%) ≥4,00 e <62,50 µm	Areia (%) ≥62,50 e <500,00 µm	Silte/Argila
A	61,44	32,39	6,16	0,53
B	72,10	26,45	1,45	0,37
C	65,55	32,17	2,28	0,49
D	68,96	31,01	0,03	0,45
E	80,59	19,41	0,00	0,24
F	72,62	26,27	1,11	0,36
G	64,43	35,17	0,40	0,55
H	39,05	48,30	12,65	1,24

Nos solos argilosos de regiões tropicais, a relação silte/argila inferior a 0,6 no horizonte B demonstra alto grau de intemperismo (EMBRAPA 2018). Os valores encontrados na Tabela 7 para Latossolos e Nitossolos (0,41 a 0,45) corroboram os valores de CIA, que demonstraram solos com elevado grau de intemperismo (Tabela 4), nos quais predominaram a textura mais fina que a francoarenosa.

Para o Argissolo, o resultado encontrado para silte/argila (1,24) está bem acima do valor determinado para classificá-lo como solo altamente intemperizado. No entanto, como

este solo foi derivado de ritmitos da Subgrupo Itararé (ritmitos: alternâncias de camadas com diferentes granulometrias), com conseqüente presença de rochas siliciclásticas (e.g., arenitos; ricos em quartzo) torna a evolução do intemperismo químico mais difícil de diagnóstico, se comparado com o intemperismo sobre rochas vulcânicas básicas (Teixeira *et al* 2009)

Com os resultados obtidos na Tabela 7 foi possível elaborar o diagrama ternário apresentado na Figura 17. Santos *et al.* (2005) propõem a utilização deste diagrama para a determinação das classes texturais do solo.

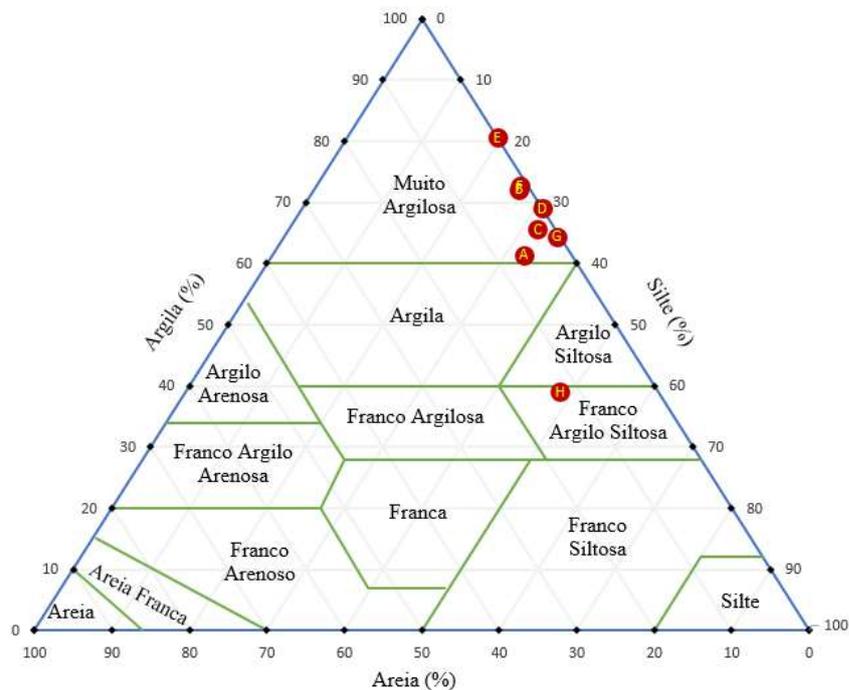


Figura 18: Diagrama ternário de classes texturais, com a distribuição das amostras de solos do presente estudo. Adaptado de Santos *et al.* (2005).

Neste diagrama é possível observar que Latossolos e Nitossolos apresentam classificação muito argilosa. Por outro lado, nota-se que a amostra do ponto H, derivada de ritmitos do Subgrupo Itararé, está situada entre as texturas argilo siltosa e franco argilo siltosa, típicas de solos derivados de rochas siliciclásticas.

#### 6.4 Isótopos radiogênicos

Os resultados obtidos para os valores de concentração dos isótopos, conforme descrito no item 5.2.6, são apresentados na Tabela 8. Nela o fotopico de  $^{234}\text{Th}$  é apresentado como  $^{238}\text{U}$  e o fotopico do  $^{228}\text{Ra}$ , como  $^{232}\text{Th}$ .

Os valores de rádio indicados na Tabela 8 se mostram importantes, pois, embora o nível de radônio não seja diretamente proporcional à concentração de rádio no solo, este isótopo é um importante indicador de potencial de radônio nos solos e nas rochas originárias, afinal trata-se do seu precursor.

Tabela 8: Concentração dos isótopos em  $\text{Bq kg}^{-1}$  nas amostras coletadas na Fazenda Argentina. O fotopico de  $^{234}\text{Th}$  é apresentado como  $^{238}\text{U}$  e o fotopico do  $^{228}\text{Ra}$ , como  $^{232}\text{Th}$ .

Classe do Solo	Amostra	$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{228}\text{Ra}$ ( $^{232}\text{Th}$ )	$^{234}\text{Th}$ ( $^{238}\text{U}$ )	$^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$
Latossolo	A	< 35	27 ± 2	53 ± 5	< 35	NC
	C	< 35	27 ± 2	55 ± 5	< 35	NC
	E	< 35	21 ± 2	38 ± 5	< 35	NC
	F	< 35	28 ± 2	43 ± 5	< 35	NC
Nitossolo	B	< 35	29 ± 2	60 ± 6	< 35	NC
	D	< 35	24 ± 2	43 ± 4	< 35	NC
	G	< 35	23 ± 2	42 ± 4	< 35	NC
Argissolo	H	75 ± 17	63 ± 4	88 ± 7	58 ± 26	0,92

NC = não calculado.

Os pontos de A a G, que compõem a classe de Latossolos e Nitossolos, apresentam valores de  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{238}\text{U}$  abaixo do limite de detecção do equipamento, valores de  $^{226}\text{Ra}$  abaixo da média da crosta terrestre ( $35 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) e valores de  $^{232}\text{Th}$  acima da média da crosta terrestre ( $30 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) (UNSCEAR 2000). Já o ponto H (Argissolo) apresenta alta concentração em todos os radionuclídeos, quando comparado às amostras das outras classes de solos. Isso está correlacionado com o valor de concentração da atividade de radônio (item 6.5), que foi maior nesta classe de solos do que no Latossolo e Nitossolo. A relação  $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$  foi calculada apenas para o ponto H, para o qual o valor obtido foi de 0,92, resultado que indica equilíbrio secular entre os dois radionuclídeos, e sugere que estes advêm do mesmo material que deu origem a esse solo, e não de um processo de contaminação externo ou de ação antrópica. Em geral, os valores obtidos pela análise de espectroscopia gama não foram significativos para afirmar a presença de radônio no solo.

Segundo Ferreira (2013), minerais acessórios, levemente radioativos, como zircão e apatita, são os principais responsáveis pela radioatividade nas rochas ígneas. Os resultados

das concentrações dos radionuclídeos, em rochas graníticas do escudo cristalino paranaense, variam de 9 Bq kg<sup>-1</sup> a 164 Bq kg<sup>-1</sup> para o <sup>232</sup>Th, e de 5 Bq kg<sup>-1</sup> a 91 Bq kg<sup>-1</sup> para o <sup>226</sup>Ra. Ferreira (op. cit.) relaciona esses valores à exalação de radônio. Desse modo, uma sugestão para melhor entender a formação do radônio na Fazenda Argentina, seria analisar os isótopos na rocha mãe em pesquisas futuras.

Durante o intemperismo, o tório fica concentrado nos solos residuais de climas tropicais devido a sua relativa imobilidade (Peixoto *et al* 2016), essa pode ser uma explicação para a concentração de <sup>232</sup>Th ter apresentado valor superior aos demais isótopos. Apesar dos resultados obtidos estarem acima da média terrestre que é de 30 Bq kg<sup>-1</sup>, deve ser observado que este isótopo faz parte da série de decaimento que origina o <sup>220</sup>Rn, que tem meia-vida de 55,6 s. Portanto, esse valor não deve ser expressivo na concentração total do radônio.

Os pequenos percentuais de <sup>210</sup>Pb apresentados nos resultados, provavelmente estão relacionados a baixa mobilidade e biodisponibilidade desse elemento (Cardoso *et al* 2009). Segundo Langmuir (1997), um aumento no valor de pH do solo, tende a diminuir a mobilidade/biodisponibilidade do <sup>210</sup>Pb independente do teor total de radionuclídeo no solo. Porém, a análise do pH não fez parte do trabalho e deve ser considerada para estudos posteriores.

#### 6.5 Potencial de Radônio (RP) e Índice de Radônio (RI).

Na Tabela 9 são apresentados os valores da média da permeabilidade e concentração da atividade de radônio e o terceiro quartil do RP. Essa forma de apresentação foi escolhida para facilitar a comparação dos resultados de concentração da atividade de radônio e da permeabilidade com outros trabalhos, e para classificar o RI do ponto estudado.

Tabela 9: Valores das médias da permeabilidade e concentração da atividade de radônio nos pontos investigados e resultados do terceiro quartil do cálculo do Potencial de Radônio (RP).

Classe do solo	Ponto	Permeabilidade (m <sup>2</sup> )	[Rn] (kBq m <sup>-3</sup> )	RP*
Latossolo	A	1,86·10 <sup>-11</sup>	49,43	80,23 (1,97 – 105,89)
	C	1,25·10 <sup>-11</sup>	49,84	62,06 (14,22 – 72,89)
	E	1,05·10 <sup>-11</sup>	45,99	58,04 (10,95 – 70,49)
	F	2,77·10 <sup>-11</sup>	26,51	56,82 (28,07 – 76,55)
Média		1,73·10 <sup>-11</sup>	42,94	64,29
Nitossolo	B	1,21·10 <sup>-11</sup>	53,88	83,39 (30,08 – 93,76)
	D	1,51·10 <sup>-11</sup>	45,76	65,47 (40,14 – 73,78)
	G	8,68·10 <sup>-12</sup>	38,19	40,63 (25-62 – 51,53)
Média		1,20·10 <sup>-11</sup>	45,94	63,16
Argissolo	H	5,20·10 <sup>-14</sup>	73,14	26,13 (8,01 – 33,50)
Média Geral		1,31·10 <sup>-11</sup>	47,84	59,10

\*De acordo com a Equação 2. terceiro quartil do RP e valores máximos e mínimos entre parênteses.

O alto valor da concentração de atividade de radônio encontrado no ponto H, está de acordo com os valores apresentados na Tabela 9, na qual todos os isótopos que fazem parte da série de decaimento do radônio apresentam valores acima dos outros pontos estudados.

As concentrações das atividades de radônio encontradas para a classe dos Latossolos variam entre 26,51 kBq m<sup>-3</sup> a 49,84 kBq m<sup>-3</sup>, valores próximos aos reportados no trabalho de Lara *et al.* (2015), no qual o valor apresentado para a classe do Latossolo Vermelho foi de 14,1 kBq m<sup>-3</sup> e para Latossolo Vermelho Perférico foi de 60,6 kBq m<sup>-3</sup>. Segundo WHO (2009), a concentração da atividade de radônio varia substancialmente conforme a estação do ano, ao longo dos dias e até de horas. Desse modo, uma comparação ainda mais precisa dos valores poderia ser feita com uma amostragem com intervalos maiores, preferencialmente no prazo de um ano. Os resultados deste trabalho estão abaixo de um estudo desenvolvido em Poços de Caldas, em pontos nos quais não foi descrita a classe do solo. Ali, a concentração média da atividade de radônio foi de 192 kBq m<sup>-3</sup>, bem maior que a média encontrada na Fazenda Argentina (47,84 kBq m<sup>-3</sup>).

Um dos aspectos importantes deste trabalho é a permeabilidade contrastante entre os Latossolos e Nitossolos versus Argissolos, embora uma única amostra represente este último. A alta permeabilidade dos solos pode aumentar os níveis de radônio nos minerais que compõem os solos, de duas maneiras: 1) Em solos altamente permeáveis, a migração do

radônio por difusão é favorecida, podendo atingir vários metros de profundidade. Assim, o radônio pode se acumular em um volume muito maior do solo; 2) Solos permeáveis permitem o transporte rápido do radônio sob diferenças de pressão muito pequenas, uma vez que o fluxo do gás no solo é proporcional à permeabilidade (Cothorn & Smith 1987).

Rebello *et al.* (2003) afirmam que a umidade é outro fator que interfere na permeabilidade dos solos devido ao fluxo de ar mais limitado. Quando há excesso de umidade poderá haver bloqueio dos poros, impedindo a migração do radônio, diminuindo o valor de RP e alterando a classificação do RI. No presente estudo, as medidas de permeabilidade foram realizadas durante a estação seca do ano. Desse modo, os poros estavam livres ou com uma pequena quantidade de água. Isto, sem dúvida, favorece a circulação de gases no solo e, conseqüentemente, aumenta o valor de permeabilidade (Lu *et al.* 2013).

A permeabilidade também está diretamente relacionada com a textura do solo. Quanto menor for o tamanho dos grãos, menor é a área dos vazios entre eles e maior é a resistência ao fluxo da água no solo (Head, 1994). No diagrama ternário de classes texturais (Figura 17), os pontos que correspondem aos Latossolos e Nitossolos são classificados como solos muito argilosos, portanto, pouco permeáveis. Por sua vez, no ponto H esperava-se que houvesse maior permeabilidade devido a distribuição granulométrica, contudo não foi o resultado encontrado para esse ponto. Uma possibilidade é que a espessura do solo no local de coleta seja pequena, e a resistência mecânica ali encontrada seja reflexo do horizonte rochoso. A estrutura dos solos é outro fator que altera o valor de permeabilidade. Quanto maior a compactação, menor será o valor de permeabilidade (Lu *et al.* 2013). Silva *et al.* (2009) demonstraram que a permeabilidade diminui com o aumento da densidade do solo, e esta está relacionada a uma alteração da geometria, volume e distribuição dos poros (Lima *et al.* 2005), que podem reduzir os caminhos e o volume total de espaço poroso disponíveis para o fluxo de ar.

Pereira *et al.* (2021) demonstram que o Argissolo, presente na área de estudo, apresenta um baixo valor de permeabilidade de água, e atribuem o resultado ao processo de compactação do horizonte B desse solo. Essa pode ser outra explicação para que o ponto H, apesar de apresentar partículas maiores, tenha um valor de permeabilidade menor. Importante destacar que para a obtenção destes dados foi usado o valor limite para permeabilidade  $5,20 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ , uma vez que nesse ponto o tempo de aquisição do resultado foi superior a 1200s (Neznal *et al.* 2008).

Com os resultados de RP foi possível obter a média desses valores por classe de solo com o objetivo de entender, a partir das comparações entre as exalações de radônio, qual é a classe mais segura para construções civis. Na Figura 18, é apresentado o histograma que correlaciona o valor de RP e a classe do solo.

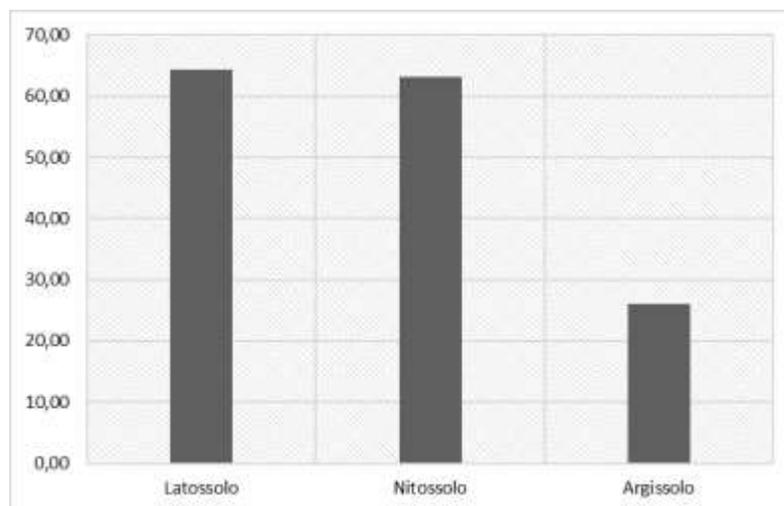


Figura 19: Valores médios do RP apresentados por classe do solo.

Por meio da análise do histograma é possível observar que as classes de Latossolo e Nitossolo apresentaram maiores valores de RP, ou seja, maior exalação de radônio, o que sugere mais riscos para futuras instalações. Uma alternativa para ocupação dessa área é buscar estratégias de prevenção e mitigação para diminuir a concentração do radônio no ambiente interno das construções. Dentre essas estratégias, WHO (2009) destaca:

- Vedação das superfícies em contato com o solo;
- Barreiras para gases do solo;
- Ventilação passiva e ativa no espaço situado entre o solo e o primeiro pavimento de um imóvel;
- Despressurização ativa e passiva do solo e ventilação equilibrada.

De acordo com os dados da Tabela 9, é possível notar que os resultados de RP foram mais altos para Latossolo, assim como apresentado por Lara *et al.* (2015). Assim como o presente trabalho, Lara *et al.* (2015) apresentaram coletas realizadas na estação seca do ano. Dessa forma, os poros do solo estavam livres, ou seja, com maior permeabilidade, o que favorece a mobilidade do gás e, conseqüentemente, aumenta o valor de RP. Outra aproximação entre os resultados dos dois trabalhos, é a tendência de o Argissolo apresentar valor menor de RP do que o Latossolo. Essa predisposição permite afirmar que, entre

Latossolo e Argissolo, esta última seria a opção mais segura para construção, no que se refere a exalação de radônio.

Para efeitos de comparação dos resultados de RP obtidos neste trabalho e em outros que utilizaram o mesmo método, foram considerados quatro estudos: dois no Brasil, um no Canadá e outro na Hungria. Os valores estão apresentados na Tabela 10. Pode ser notado que o resultado médio de RP do presente estudo foi superior aos dos demais, exceto com relação à Poços de Caldas, sabidamente anômala para radônio (Santos *et al.*, 2015). Segundo Peake e Schumann (1993), as características geológicas do ambiente são primordiais para a avaliação do potencial de radônio de uma região, além da radiação de fundo e permeabilidade do solo. Esses aspectos ajudam a justificar as variações de valores observadas na Tabela 10.

Tabela 10: Valores das médias de RP obtidos pelo método de Neznal em diferentes localidades.

<b>Localidade</b>	<b>RP</b>	<b>Referência</b>
<b>Fazenda Argentina</b>	43,68	Este trabalho
<b>RMBH*</b>	33,16	Lara (2017)
<b>Poços de Caldas</b>	70,27	Santos <i>et al</i> (2015)
<b>Canadá</b>	12,80	Chen <i>et al</i> (2012)
<b>Hungria</b>	7,70	Beltran-Torres <i>et al</i> (2023)

\* Região Metropolitana de Belo Horizonte

Os valores de RP foram utilizados para expressar o RI que classifica o risco do radônio a ser liberado para o ambiente. O trabalho de Neznal *et al* (2008) foi utilizado para essa classificação, sendo: se  $RP < 10$ , então RI é baixo; se  $10 \leq RP < 35$ , então RI é médio e se  $RP > 35$ , então RI é alto.

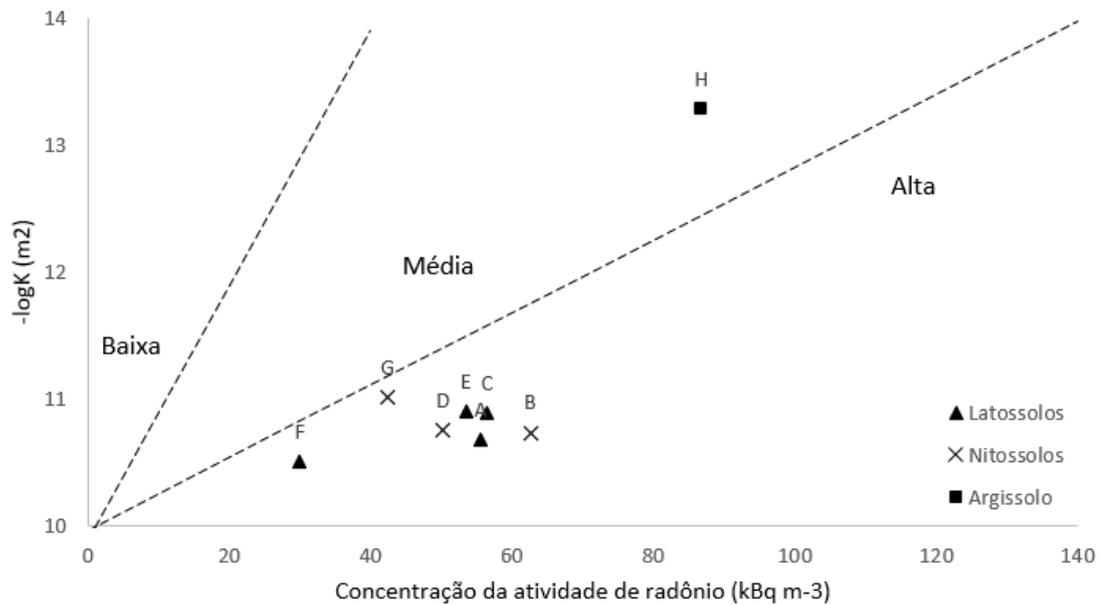


Figura 20: Valores de RP dos pontos amostrados e indicações das regiões de baixo, médio e alto RI.

Na Figura 19 é possível observar que todos os pontos analisados no presente estudo estão com valores de RP na região de RI alto, com exceção do ponto H que está dentro da região de RI média. Contudo, como apresentado no item 6.6, os valores de concentração da atividade de radônio no interior da construção civil, localizada na área de estudo, ficaram abaixo do nível de segurança, isso demonstra que uma maior amostragem é necessária para melhor classificação do RI.

## 6.6 Detectores DTPA

Os resultados obtidos para os valores de concentração da atividade de radônio em ambientes internos, conforme descrito no item 5.2.7 estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Valores de concentração da atividade de radônio pelos detectores DTPA instalados na Agência de Inovação da UNICAMP (INOVA).

Identificação do Detector	Concentração da atividade de radônio (Bq m <sup>-3</sup> )
2410	31 ± 11
2430	30 ± 10
2431	31 ± 10
2432	50 ± 20
2433	37 ± 12
2434	17 ± 8
2435	20 ± 8
2436	34 ± 11
2437	51 ± 22
2438	25 ± 7
<b>Média</b>	<b>33 ± 11</b>

O menor valor de RI encontrado refere-se ao detector 2434, com  $17 \pm 8 \text{ Bq m}^{-3}$ , e o maior ao do 2437, com  $51 \pm 22 \text{ Bq m}^{-3}$ . O tipo de construção e a ventilação do ambiente ajudam na interpretação destes resultados. Enquanto o amostrador 2434 foi instalado na copa (Figura B.5 do Anexo II), um espaço amplo e com ventilação constante, o detector 2437 foi fixado na sala administrativa (Figura B.8 do Anexo II), um local com pequenas dimensões em que o uso do ar-condicionado é costumeiro. Ambientes com pouca ventilação tendem a concentrar mais o gás em seu interior devido à baixa renovação do ar. O contrário ocorre em espaços maiores e ventilados, nos quais o gás é dissipado devido ao fluxo de ar (WHO 2009). Importante notar que, embora  $51 \pm 22 \text{ Bq m}^{-3}$  seja o maior valor de concentração da atividade de radônio encontrado na análise, ele está abaixo do nível de segurança recomendado pela OMS, que é de  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ . Observa-se que fluxo de ar também interfere nos resultados referentes às demais salas. Por exemplo, a área de eventos (Figura B.6 do Anexo II), que possui um amplo espaço, com pé-direito alto e diversas entradas e saídas de ar, apresentou o segundo menor valor de concentração de atividade de radônio ( $20 \pm 8 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Um ambiente que chamou a atenção foi a sala de informática (Figura B.4 do Anexo II) que, mesmo sendo um espaço com pequenas dimensões, não apresentou um resultado elevado ( $37 \pm 12 \text{ Bq m}^{-3}$ ). É importante destacar que esse local possui uma janela que fica aberta a maior parte do dia, permitindo uma contínua renovação do ar.

Vale salientar que as edificações que constituem a INOVA passaram por um processo de restauração e revitalização em 2018. Rachaduras em pisos e paredes, bem como juntas de construções e lacunas de pisos suspensos, favorecem a difusão do radônio para o ambiente interno. A recuperação e modernização dos espaços podem ter reparado esses defeitos na estrutura dos edifícios, e proporcionado vedação mais efetiva para evitar a difusão do gás, o que corroboraria os resultados baixos encontrados.

Com intuito de comparar os resultados obtidos na Fazenda Argentina com outros estudos, foi usada a tabela de Silva & Vasconcelos (2021), em que aparecem as concentrações da atividade de radônio em residências e locais fechados em diversas localidades do Brasil. Essas informações são reproduzidas na Tabela 12 com a inclusão da área estudada. As localidades repetidas na Tabela 12 indicam a mesma região, porém são referentes a estudos diferentes.

Tabela 12: Concentrações da atividade de radônio em locais fechados no Brasil relatados na literatura. Adaptado de Silva & Vasconcelos (2021).

Localidades, Estado	Concentração da atividade de radônio (Bq m <sup>-3</sup> )		
	Mínima	Média	Máxima
Cidades, RN e CE*	3,20	17,70	140,00
Araxá, MG	258,00	663,00	1634,00
Baixada Santista, SP	56,00	124,00	168,00
Brasília, DF	72,00	116,00	156,00
Campinas, SP	27,90	54,80	150,80
Campinas, SP	16,70	81,90	310,00
Curitiba e Campo Largo, PR	5,00	321,20	640,00
Fazenda Argentina, SP (Este estudo)	17,00	33,00	51,00
Lages Pintadas, RN	20,00	376,00	3723,00
Lucrécia, RN	56,60	260,60	2098,70
Natal, RN	3,20	15,40	40,00
Natal, RN	5,00	55,40	160,00
Niterói, RJ	0,10	12,30	67,90
Poços de Caldas, MG	33,00	150,00	665,00
Poços de Caldas, MG	12,00	140,00	1024,00
Poços de Caldas, MG	7,2	104,20	1645,30
Porto Alegre, RS	17,00	42,60	103,00
Rio de Janeiro, RJ	< 5,0	43,00	200,00
Rio de Janeiro, RJ	14,00	84,00	247,00
Rio de Janeiro, RJ	0,00	25,20	101,00
RMBH**, MG	18,50	148,00	2671,40
RMBH**, MG	-	115,00	-
São Vicente, SP	68,00	217,00	610,00
São Paulo, SP	33,00	107,00	561,00
São Paulo, SP	-	142,00	-
Timóteo, MG	0,10	104,60	673,00

\* Natal, Nova Cruz, São Paulo do Potengi, Barcelona, Pedro Avelino, Bodó, Currais Novos, Angicos, Santana do Matos, Assú e Mossoró (RN) e Fortaleza (CE).

\*\* Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Silva & Vasconcelos destacam que 60% dos resultados apresentaram valor superior ao nível de segurança recomendado pela OMS (100 Bq m<sup>-3</sup>). Já o valor encontrado na Fazenda Argentina está abaixo do resultado médio de 139,69 Bq m<sup>-3</sup> obtido por meio da Tabela 12, sendo, inclusive, menor do que os resultados referentes à Campinas-SP. Importante observar que os maiores valores médios no trabalho de Silva & Vasconcelos

foram encontrados na cidade de Poços de Caldas, município reconhecido pela presença de variações radioativas e de jazidas de urânio e tório.

As Tabelas 9 e 11 apresentam diferentes interpretações para o risco associado a construções na área de estudo. Enquanto os valores de RP encontrados classificam a área como alto ou médio RI, os valores da concentração da atividade de radônio em ambientes fechados estão abaixo do limite sugerido pela OMS. Essa divergência entre classificações de risco é explicada pela permeabilidade encontrada no solo no momento da amostragem, uma vez que a concentração de radônio é a mesma em ambos os métodos. Esta diferença pode ser minimizada aumentando o período de amostragem nos solos, uma vez que para análise de concentração em ambientes internos, os detectores DTPA ficaram instalados por um período de 6 meses, enquanto o detector MCR foi utilizado com intervalos, durante dois dias.

Conforme já mencionado, a umidade interfere na permeabilidade dos solos, podendo haver bloqueio dos poros (Rebello *et al.* 2003), diminuindo o valor de RP e alterando a classificação do RI. Assim, idealmente, a amostragem do detector MCR deve ser feita no período de um ano para resultados mais consistentes, o que permitiria uma comparação mais factual entre as técnicas utilizadas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

De acordo com as características definidas por Alvarenga e Ladeira (2018), o solo do ponto H é classificado como Nitossolo. Entretanto, após a avaliação dos resultados obtidos na geoquímica, mineralogia e granulometria foram encontradas divergências quanto a essa classificação. O valor alto da relação molecular  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , encontrado pela geoquímica; a diferença entre os valores de minerais presentes nos solos, evidenciada na mineralogia e, a classificação da textura entre argilo siltosa e franco argilo siltosa, observada na granulometria, fundamentam a hipótese de que o ponto H não deve ser classificado como Latossolo ou Nitossolo. Devido à localização do ponto em uma intersecção de três formações rochosas (Complexo Itapira/granitoides, Formação Serra Geral/diabásios e Subgrupo Itararé/ritmitos) e na fronteira de duas classes de solos (Nitossolo e Argissolo), este trabalho assumiu a classificação Argissolo como ideal para o ponto H, porém, tais particularidades necessitam de um estudo pormenorizado para uma classificação precisa da classe desse solo. Ainda no ponto H, a porcentagem de silte e areia foi maior do que a encontrada nos outros pontos. Contudo, o valor de permeabilidade do ponto H foi o menor dentre os pontos estudados, resultado possivelmente da compactação do horizonte B desse solo, processo que reduz os caminhos e o volume total de espaço poroso necessários para o fluxo de ar. Alternativa a isso pode ser a predominância do horizonte C no local da amostragem.

Os valores de concentração do isótopo de  $^{238}\text{U}$  nos solos das classes de Latossolos e Nitossolos ficaram abaixo do limite de detecção do equipamento de espectrometria gama. Por outro lado, a análise realizada com o *AlphaGUARD*<sup>®</sup> mostrou uma concentração da atividade de radônio acima do reportado na literatura para os Latossolos. Como o  $^{238}\text{U}$  é o núcleo pai do  $^{222}\text{Rn}$ , e o urânio não foi detectado nas amostras de solo, uma possibilidade é que o  $^{238}\text{U}$  esteja concentrado na rocha mãe e tenha sido mobilizado durante o processo pedogenético. Para confirmar esta suspeita, seria adequado realizar uma análise desse isótopo nas rochas que compõem a área investigada em estudos posteriores.

A amostragem da permeabilidade e da concentração da atividade de radônio foram realizadas durante uma semana do inverno brasileiro. Os valores encontrados de RP (Potencial de Radônio) para os Latossolos e Nitossolos classificam esses pontos com alto RI (Índice de Radônio). Vale a pena observar que a estação seca favorece a movimentação do ar no solo e, conseqüentemente, aumenta o valor de permeabilidade, o que facilita a exalação do

radônio. Portanto, os resultados são uma fotografia desse período do ano, com suas temperaturas, ventos e umidade característicos.

Foi possível correlacionar a classe do solo com o valor de RP. Solos que têm sua classe definida como Latossolos e Nitossolos tendem a apresentar maiores valores de RP quando comparados à classe dos Argissolos. Sendo assim, dentre os pontos estudados, aquele classificado como Argissolo é a opção mais segura para construções, com o objetivo de mitigar a concentração de atividade de radônio em ambientes internos.

Apesar dos altos valores de RP indicarem alto RI na classe dos Latossolos e Nitossolos, os valores dos detectores de DTPA obtidos nos ambientes internos estudados, ficaram abaixo do nível de segurança recomendado pela OMS. Desse modo, não há necessidade de preocupações relacionadas à concentração da atividade de radônio nos ambientes internos analisados. Como foi observado nas edificações estudadas, construções que priorizem a ventilação dos espaços livres e ocupados, a preferência por ambientes amplos, a vedação das superfícies e possíveis rachaduras e com manutenção periódica permitem a limitação da infiltração do radônio em ambientes internos.

Devido à classificação do radônio como agente carcinogênico, responsável por uma significativa porcentagem da mortalidade por câncer de pulmão em todo o mundo, órgãos de regulamentação internacionais recomendam que as agências nacionais reguladoras estabeleçam seus níveis de referência para este gás. Diante dessa importância, e levando em consideração que no Brasil as políticas para regulamentação e mitigação ainda não são totalmente desenvolvidas, sugere-se a elaboração de um mapa de potencial de radônio em estudos posteriores. Uma análise de RP em todas as classes de solo do Brasil, a fim de estabelecer uma correlação entre os dois objetos, tal como foi apresentado neste trabalho, contribuiria na elaboração de um primeiro mapa de potencial de radônio. Este mapa facilitaria a identificação da variação da exalação de radônio, o que auxiliaria em projetos para novas construções, que garantam a segurança no que se refere ao radônio e diminuam os riscos à saúde das pessoas que ocupam ou ocuparão esses espaços.

## 8 REFERÊNCIAS

- Alvarenga T.A. & Ladeira F. S. B. 2018. Mapeamento detalhado dos solos na fazenda argentina (Campinas-SP). XXVI Congresso de Iniciação Científica Unicamp.
- Andrade M. V. S., Cruz, R. A., EL HAJJ, T. M., SILVA, N. C. 2017 Avaliação de radônio em agregados utilizados na construção civil. Conference: XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios. Belém, Pará, Brazil
- Baskaran, M. 2016 *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. Springer Geochemistry, 276 pp.
- Barbosa S.M., Donner R.V., Steinitz G. 2015. Radon applications in geosciences – Progress & Perspectives, *The European Physical Journal*, **224**: 597-603.
- Beltrán-Torres S., Szabó K. Z., Tóth G., Tóth-Bodrogi E., Kovács T., Szabó, C. 2023. Estimated versus field measured soil gas radon concentration and soil gas permeability. *Journal of environmental radioactivity*, **265**: 107224.
- Cardoso G. V., Sobrinho N. M. B. A., Wasserman A. V., Mazur, N. 2009. Geoquímica de radionuclídeos naturais em solos de áreas circunvizinhas a uma unidade de mineração e atividade de urânio, *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, **33**: 1909-1917.
- Castelluccio M., De Simone G., Lucchetti C., Moroni M., Salvati F., Tuccimei P. 2015. A new technique to measure in situ soil gas permeability, *Journal of Geochemical Exploration*, **148**: 56-59.
- Castro L.S.O., 2018 Detecção de radônio e filhos em ambientes de convívio humano na cidade de Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Ambiental, UNESP, 54 p.
- Chen J., Moir D., MacLellan K., Leigh E., Nunez D., Murphy S., Ford, K. 2012. Soil radon measurements in the Canadian cities. *Radiation protection dosimetry*, **151(1)**: 172–174.
- Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., Bora D.K. 2022. Simultaneous monitoring of soil  $^{222}\text{Rn}$  in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor, *Natural Hazards*, **112**: 1477–1502.
- Christofoletti A. & Federici H. 1972. *A Terra campineira: Análise do quadro natural*. Ind. gráf. Mousinho. 101 pp.
- Cothorn C.C. & Smith Jr J.E. (Eds.). 1987. *Environmental Radon*. Plenum Press, New York, 369 pp.
- Curi, N. & Franzmeier, D.P. , 1987. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**:153-158

- Da Costa P. C. C. & Girardi V. A. V. 2004. Petrografia e química mineral dos diques máficos da região Crixás-Goiás, Estado de Goiás, *Revista do Instituto de Geociências – USP*, **4**: 27-42.
- Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J.M., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., TomáBek L., Whitley E., Wichmann H.E., Doll R. 2004. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *BMJ.*, **330**: 223-228.
- Dias D. C. S. 2017. Estudos de validação da técnica de detectores de estado sólido de traços nucleares para determinação de radônio-222 no ar e monitoramento em centros de educação infantil de Poços de Caldas-MG. Dissertação de Mestrado, Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Alfenas, 111 p.
- Durrani S.A. & Ili R. 1997. *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, World Scientific, London, 387 pp.
- EMBRAPA – Empresa brasileira de pesquisa agropecuária 5º ed. 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, Brasília, 356 pp.
- Enzweiler J. & Vendemiatto M.A. 2013. Estimativa da incerteza de medição na determinação de elementos maiores e menores em rochas silicáticas por espectrometria de fluorescência de raios X com resultados de controle de qualidade”, *Geochimica Brasiliensis*, **27(2)**: 152-160.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2018. Uso de ar condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota técnica EPE 30.
- Faure G. (Ed.) 1998. *Principles and Applications of Geochemistry: A Comprehensive Textbook for Geology Students*. 2º ed., Upper Saddle River Printice – Hall, New Jersey, 600 pp.
- Ferreira A. O. 2013. Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do Estado do Paraná e sua utilização na construção civil. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 114 p.
- Ferreira M. M., Fernandes B., Curi N. 1999. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, **23**: 507-514.
- Ferreira R. B. 2019. Geoquímica e geofísica em latossolo vermelho originado do diabásio da formação serra geral, sob extremo intemperismo, Campinas-SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 173 p.

- Frank H.T., Gomes M.E.B., Formoso M.L.L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America, *Pesquisas em Geociências*, **36** (1): 49-57.
- Gaskin J., Coyle D., Whyte J., Krewksi D. 2018. Global Estimate of Lung Cancer Mortality Attributable to Residential Radon, *Environmental Health Perspectives*, **126**: 057009(1-8).
- Gilmore G. 2008. *Practical gamma-ray spectrometry*. 2nd ed, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 389 pp.
- Gruber V., Bossew P., De Cort M., Tollefsen T. 2013. The European map of the geogenic radon potential, *Journal Of Radiological Protection*, **33**: 51-60.
- Head K. H. 1994. *Manual of Soil Laboratory Testing, Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*, Pentech Press, London , 440 pp.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. 2015. *Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*, Viena, 90 pp.
- IARC - International Agency for Research on Cancer. 1988. *IARC Monographs On The Evaluation Of Carcinogenic Risks To Humans. Man-made mineral fibres and radon*, Lion, 309 pp.
- IARC - International Agency for Research on Cancer. 2018. Latest global cancer data: Cancer burden rises to 18.1 million new cases and 9.6 million cancer deaths in 2018, *IARC Press Realease*, **263**.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7752#resultado>. Acessado em 27 jun 2024.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection. 2014. *Radiological Protection against Radon Exposure*. ICRP Publication 126, Ann. 43, 77 pp.
- INB – INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL 2023. Produção de urânio. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Urânio/Produção>. Acessado em 19/12/2023.
- INCA – Instituto Nacional de Câncer. 2022. *Estimativa 2023: incidência de câncer no Brasil*, Rio de Janeiro, 162 pp.
- Iritani M. A & Ezaki S. 2012. *As águas subterrâneas do Estado de São Paulo*, Secretaria de Estado do Meio Ambiente-SMA, São Paulo, 104 pp.
- IG – Instituto Geológico. 2009. Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Campinas (SP). São Paulo. Relatório Técnico IG, v. 2, 127 p.
- Jenkins, R. 2012. *X-Ray Fluorescence Spectrometry*, 2º ed., John Wiley & Sons, New Jersey 232 pp.

- Jaishi H.P., Singh S., Tiwari R.P., Tiwari R.C. 2014. Analysis of soil radon data in earthquake precursory studies. *Annals Of Geophysics*. **57**:1-5.
- Ker J.C. 1997. Latossolos Do Brasil: Uma Revisão, *Geonomos*, **5(1)**:17-40.
- Machado F. B., Nardy A. J. R., de Melo R. P., de Oliveira M. A. F., Squisato E. 2005. As rochas intrusivas da formação Serra Geral na porção leste da bacia do Paraná no estado de São Paulo: Aspectos petrográficos e geoquímicos – Resultados preliminares. *Geociências*, **24-1**: 5-17.
- Malvern. 2015. *A basic guide to particle characterization*, Malvern whitepaper, 24 pp.
- Neto A. L. & Almeida J. A. 2013. Caracterização morfológica e química de Argissolos com horizontes subsuperficiais escurecidos em Santa Catarina. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, **12**: 294-303.
- Nesbitt H.W. & Young G.M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**:1523–1543.
- Neznal M., Neznal M., Matolín M., Barnet I., Miksova J. 2008. The new method for assessing the radon risk of building sites. *RADON v.o.s.* 94 pp.
- Nunes W. A. G. A., Ker J. C., Schaefer C. E. G. R., Fernandes Filho E. I., Gomes F. H., 2001. Relação solo-paisagem-material de origem e gênese de alguns solos no domínio do “Mar de Morros”, Minas Gerais, *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, **25**: 341-354.
- Langmuir, D. 1997. *Aqueous environmental geochemistry*, Printice-Hall, New York. 600pp.
- Lara E., Rocha Z., Palmieri H. E. L., Santos T. O., Rios F.J., Oliveira A.H. 2015. A Radon concentration in soil gas and its correlations with pedologies, permeabilities and  $^{226}\text{Ra}$  content in the soil of the Metropolitan Region of BeloHorizonte – RMBH, Brazil. *Radiation Physics and Chemistry*, **116**: 317-320.
- Lima H. V. D., Lima, C. L. R. D., Leão, T. P., Cooper, M., Silva, A. P. D., Romero, R. E. 2005. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **29**: 677-684.
- Lu S-F., Han Z-J., Xu L., Lan T-G., Wei X., Zhao T-Y. 2023. On measuring methods and influencing factors of air permeability of soils: An overview and a preliminary database. *Geoderma*, **435**: 116509.
- O'Connor B. H. & Chang W-J. 1986. The Amorphous Character and Particle Size Distributions of Powders Produced with the Micronizing Mill for Quantitative X-Ray Powder Diffractometry. *X-Ray Spectrometry*, **15**: 267-270.

- Pecharsky, V. K. & Zavalij, P. Y. 2005. *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*, Springer Science, New York, 732 pp.
- Peixoto C.M., Fernandes P.R.M., Rodrigues P.C.H., Carvalho Filho C.A., Feliciano V.M.D. 2016. Distribuição das Concentrações de Atividade de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  em Amostras de Solo do Estado de Minas Gerais. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, **4(2)**: 1-18.
- Pereira G. A., De-Campos A. B., Silva P. J., Carvalho D. 2021. Lógica fuzzy aplicada a elaboração de carta geotécnica de aptidão à urbanização da área de expansão da Unicamp - Campinas, SP. *Unesp Geociências*, **40**: 1137 – 1145.
- Pereira S. Y. 1996. Proposta de representação cartográfica na avaliação hidrogeológica para o estudo de planejamento e meio ambiente, exemplo da região metropolitana de Campinas-SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 209 p.
- Petta R.A., Campos T.F.C., Nascimento P.S.R. 2013. Geoprocessamento no monitoramento da radioatividade natural das instalações de petróleo do Canto do Amaro (RN). *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- Rebello A.M.A., André V.L. Bittencourt A.V.L., Mantovani L.E. 2003. Modelos De Exalação De Radônio Em Paisagens Tropicais Úmidas Sobre Granito. *Boletim Paranaense de Geociências*, **52**: 61-76.
- Ribeiro F.C.A., Silva J.I.R., Lima E.S.A., Amaral Sobrinho N.M.B., Perezc D.V., Lauria D.C. 2018. Natural radioactivity in soils of the state of Rio de Janeiro (Brazil): Radiological characterization and relationships to geological formation, soil types and soil Properties. *Journal of Environmental Radioactivity*, **182**: 34-43.
- Rosa R. O. 2014. Avaliação do impacto radiológico atmosférico de uma unidade de mineração e beneficiamento de urânio. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 190 pp.
- Santos Júnior J. A., Amaral R. S., Silva C. M., Menezes R. S. C., Bezerra J. D. 2009. Estudo comparativo entre os detectores HPGe e NaI(Tl) na determinação de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em amostras de solo. *Scientia Plena*, **5**: 4.
- Santos M. T., Silva N. C., Guerrero E. T. Z., Navarro F. C., Oliveira R. J. 2015. Determination of Geogenic Radon Potential (GEORP) in Pocos de Caldas - Brazil. *In: INAC 2015: International Nuclear Atlantic Conference Brazilian Nuclear Program State Policy for a Sustainable World*.
- Santos R.D., Lemos R.D., Santos H.D., KER J.C., Anjos L.D., Shimizu S.H. 2005. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Embrapa, 5 ° ed, p. 12-37.

- Saphymo GmbH. 2012 - *AlphaGUARD*<sup>®</sup> - Portable Radon Monitor. Frankfurt, 59 pp.
- Schumann R.R. 1993. The radon emanation coefficient: an important tool for geologic radon potential estimations. *International Radon Conference*, **4**: 40-47.
- Silva Á. P. D., Leão T. P., Tormena C. A., Gonçalves A. C. A. 2009. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **33**: 1535-1545.
- Silva C. R. & Vasconcelos D. 2021. Avaliação dos níveis de radônio em ambientes fechados no Brasil: uma visão geral. *Revista Virtual de Química*, **13(6)**: 1372-1383.
- Sullivan K.T., Mose D.G., Mushrush G.W. 1997. Mineralogy and Aeroradioactivity as Indicators of Radon Hazard Zones. *Energy Sources*, **19:7**: 651-660.
- Taveira N.F., Guimarães F.S., Santos T.O., Rios F.J., Franklin M.R., Diniz A.C., Neto A.D., Menezes M.A.B.C., Rocha Z. 2021. Study of the relationship between mineralogical types and potential radon in rocks of the region of Serra do Gandarela – Quadrilátero Ferrífero-MG. *Brazilian Journal Of Radiation Sciences*, **09-01A**. 01-19.
- Teixeira W., Fairchild T., Toledo C. M., Taioli F. 2009. Decifrando a Terra 2ed. Companhia Editora Nacional, São Paulo, 623 pp.
- Tkaczyk A.H., Koch R., Ipbüker C., Järvelill J., Serv A., Sas Z. 2020. Correlation between radon release, radioactivity and mineralogy: a case study of Estonian black sands. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **326**: 75-86.
- Thu H.N.P., Thang N.V., Hao L.C. 2020. The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion. *Journal of Environmental Radioactivity*, **216**: 1-13.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2020. *Sources and effects of ionizing radiation*, New York. 659 pp.
- Vendemiatio M.A. & Enzweiler J. 2000. Routine Control of Accuracy in Silicate Rock Analysis by X-Ray Fluorescence Spectrometry. *Geostandards Newsletter*, **25**: 283-291.
- WHO - World Health Organization. 2009. *Handbook on indoor radon: a public health perspective*. WHO Press, Geneva, 94 pp.
- Zmazek B., Todorovski L., Dmeroski S., Vaupoti W.J., Kobal I. 2003. Application of decision trees to the analysis of soil radon data for earthquake prediction. *Applied Radiation and Isotopes*, **58**: 697–706.

## ANEXO A

Tabela A.1: Dados e resultados da permeabilidade.

<b>Estação de coleta A</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	6,00	3,33E-04	1,81E-11
	2	5,50	3,64E-04	1,98E-11
	3	5,42	3,69E-04	2,01E-11
<b>2</b>	1	6,93	2,89E-04	1,57E-11
	2	6,89	2,90E-04	1,58E-11
	3	6,80	2,94E-04	1,60E-11
<b>3</b>	1	4,57	4,38E-04	2,38E-11
	2	4,62	4,33E-04	2,35E-11
	3	4,65	4,30E-04	2,34E-11
<b>4</b>	1	6,80	2,94E-04	1,60E-11
	2	7,10	2,82E-04	1,53E-11
	3	7,09	2,82E-04	1,53E-11
<b>Estação de coleta B</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	14,84	1,35E-04	7,33E-12
	2	14,93	1,34E-04	7,28E-12
	3	14,87	1,34E-04	7,31E-12
<b>2</b>	4	15,00	1,33E-04	7,25E-12
<b>2</b>	1	6,22	3,22E-04	1,75E-11
<b>2</b>	2	6,23	3,21E-04	1,75E-11
<b>3</b>	3	6,13	3,26E-04	1,77E-11
<b>3</b>	1	18,47	1,08E-04	5,89E-12
<b>3</b>	2	19,38	1,03E-04	5,61E-12
<b>4</b>	3	18,45	1,08E-04	5,89E-12
	4	18,46	1,08E-04	5,89E-12
	5	18,69	1,07E-04	5,82E-12

<b>Estação de coleta C</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	8,98	2,23E-04	1,21E-11
	2	8,80	2,27E-04	1,24E-11
	3	8,74	2,29E-04	1,24E-11
<b>2</b>	1	9,31	2,15E-04	1,17E-11
	2	9,38	2,13E-04	1,16E-11
	3	9,29	2,15E-04	1,17E-11
<b>3</b>	1	7,81	2,56E-04	1,39E-11
	2	7,86	2,54E-04	1,38E-11
	3	7,74	2,58E-04	1,41E-11
<b>4</b>	1	9,08	2,20E-04	1,20E-11
	2	9,01	2,22E-04	1,21E-11
	3	8,96	2,23E-04	1,21E-11
<b>Estação de coleta D</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	6,27	3,19E-04	1,73E-11
	2	6,41	3,12E-04	1,70E-11
	3	6,22	3,22E-04	1,75E-11
<b>2</b>	1	5,91	3,38E-04	1,84E-11
	2	5,94	3,37E-04	1,83E-11
	3	5,89	3,40E-04	1,85E-11
<b>3</b>	1	8,03	2,49E-04	1,35E-11
	2	8,08	2,48E-04	1,35E-11
	3	8,14	2,46E-04	1,34E-11
<b>4</b>	1	9,74	2,05E-04	1,12E-11
	2	9,67	2,07E-04	1,12E-11
	3	9,60	2,08E-04	1,13E-11
<b>Estação de coleta E</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	24,45	8,18E-05	4,45E-12
	2	24,25	8,25E-05	4,48E-12
	3	24,17	8,27E-05	4,50E-12
<b>2</b>	1	11,72	1,71E-04	9,28E-12
	2	11,67	1,71E-04	9,32E-12
	3	11,75	1,70E-04	9,26E-12
<b>3</b>	1	4,71	4,25E-04	2,31E-11
	2	4,89	4,09E-04	2,22E-11
	3	4,95	4,04E-04	2,20E-11
<b>4</b>	1	19,59	1,02E-04	5,55E-12
	2	19,28	1,04E-04	5,64E-12
	3	19,19	1,04E-04	5,67E-12

<b>Estação de coleta F</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	3,57	5,60E-04	3,05E-11
	2	3,29	6,08E-04	3,31E-11
	3	3,64	5,49E-04	2,99E-11
<b>2</b>	1	4,96	4,03E-04	2,19E-11
	2	4,95	4,04E-04	2,20E-11
	3	4,90	4,08E-04	2,22E-11
<b>3</b>	1	4,20	4,76E-04	2,59E-11
	2	4,21	4,75E-04	2,58E-11
	3	4,01	4,99E-04	2,71E-11
<b>4</b>	1	3,43	5,83E-04	3,17E-11
	2	3,47	5,76E-04	3,13E-11
	3	3,53	5,67E-04	3,08E-11
<b>Estação de coleta G</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	15,58	1,28E-04	6,98E-12
	2	15,52	1,29E-04	7,01E-12
	3	15,51	1,29E-04	7,01E-12
<b>2</b>	1	13,75	1,45E-04	7,91E-12
	2	13,80	1,45E-04	7,88E-12
	3	13,94	1,43E-04	7,80E-12
<b>3</b>	1	10,09	1,98E-04	1,08E-11
	2	10,10	1,98E-04	1,08E-11
	3	10,21	1,96E-04	1,07E-11
<b>4</b>	1	11,83	1,69E-04	9,19E-12
	2	12,06	1,66E-04	9,02E-12
	3	11,80	1,69E-04	9,22E-12
<b>Estação de coleta H</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	1	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	2	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	3	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
<b>2</b>	1	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	2	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	3	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
<b>3</b>	1	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	2	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	3	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
<b>4</b>	1	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	2	1200,00	1,67E-06	5,20E-14
	3	1200,00	1,67E-06	5,20E-14

Tabela A.2: Dados e resultados do GEORP.

Estação de coleta A				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	33700	3750	48,09
	2	69000	2110	100,01
	3	61700	1950	89,27
	4	59600	1940	86,18
	5	73000	2380	105,89
	6	51100	2350	73,68
	7	48300	3140	69,56
	8	61100	2130	88,39
	9	57600	2060	83,24
	10	55000	1980	79,42
	11	68300	2380	98,98
	12	57100	2110	82,51
	13	46700	2150	67,21
	14	52600	2020	75,89
	15	51900	1980	74,86
2	1	34800	3650	49,71
	2	50300	2440	72,50
	3	48500	2770	69,86
	4	61000	2160	88,24
	5	49700	1880	71,62
	6	44200	2580	63,53
	7	60200	2200	87,06
	8	42500	1990	61,03
	9	52200	2020	75,30
	10	56400	2180	81,48
	11	47300	2100	68,09
	12	43500	1840	62,50
	13	44200	2250	63,53
	14	58900	2310	85,15
	15	52100	2120	75,15
3	1	2340	1000	1,97
	2	49300	3060	71,03
	3	50700	3290	73,09
	4	45700	3320	65,74
	5	54500	2590	78,68
	6	54300	2020	78,39
	7	47700	3180	68,68
	8	52300	2170	75,45
	9	49300	1760	71,03
	10	55600	1980	80,30
4	1	3270	2460	3,34
	2	44700	2720	64,27
	3	50500	1890	72,80
	4	52000	1980	75,01
	5	43100	2790	61,92
	6	55500	2140	80,15
	7	44000	2000	63,24
	8	45400	1900	65,30
	9	43000	1860	61,77
	10	46200	1970	66,48
	11	48600	2010	70,00
	12	45800	1980	65,89
	13	55600	2260	80,30
	14	48500	2060	69,86
	15	38000	1790	54,42

<b>Estação de coleta B</b>				
<b>Ponto</b>	<b>Leituras</b>	<b>Concentração da atividade de Radônio (Bq m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Erro</b>	<b>GEORP</b>
<b>1</b>	1	23200	3350	30,08
	2	69400	2210	92,67
	3	70200	2300	93,76
	4	56700	1970	75,47
	5	68900	2350	91,99
	6	64700	2300	86,30
	7	69700	2500	93,08
	8	54300	2030	72,21
	9	65000	2380	86,71
	10	51400	2000	68,28
	11	62700	2360	83,59
	12	66700	2480	89,01
	13	62400	2400	83,19
	14	60700	2340	80,88
	15	63900	2450	85,22
<b>2</b>	1	46200	1830	61,24
	2	60800	2370	81,02
	3	44600	1940	59,07
	4	43200	1910	57,17
	5	53300	2220	70,86
	6	61100	2460	81,43
	7	39100	2250	51,62
	8	47400	2130	62,87
	9	62100	2560	82,78
	10	45000	2090	59,61
	11	51000	2270	67,74
	12	45300	2140	60,02
	13	53500	2320	71,13
	14	62000	2600	82,65
	15	54000	2440	71,81
<b>3</b>	1	50900	1830	67,61
	2	57200	2060	76,14
	3	48300	1840	64,08
	4	66500	2410	88,74
	5	48600	1950	64,49
	6	61100	2350	81,43
	7	42100	2110	55,68
	8	69200	2640	92,40
	9	69100	2520	92,27
	10	67100	2600	89,56
	11	67400	2620	89,96
	12	66600	2680	88,88
	13	45400	2050	60,16
	14	62500	2550	83,32
	15	55000	2330	73,16
<b>4</b>	1	36700	2770	48,37
	2	47300	2030	62,73
	3	46900	2080	62,19
	4	54000	2290	71,81
	5	42900	2030	56,77
	6	53900	2350	71,67
	7	50700	2300	67,34
	8	53600	2350	71,27
	9	43600	2100	57,72
	10	35500	2400	46,74
	11	53400	2350	70,99
	12	37000	1950	48,77
	13	45700	2160	60,56
	14	40800	2050	53,92
	15	35400	1900	46,61

Estação de coleta C				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	27000	4110	29,11
	2	61600	2200	67,85
	3	45600	2770	49,94
	4	63000	2330	69,42
	5	47600	1580	52,18
	6	66100	2500	72,89
	7	44900	1920	49,15
	8	52700	2150	57,89
	9	61800	2460	68,08
	10	48600	2080	53,30
	11	52600	2210	57,78
	12	62700	2520	69,09
	13	51700	2240	56,77
	14	57900	2400	63,71
	15	58700	2460	64,61
2	1	13700	3750	14,22
	2	55300	2210	60,80
	3	49300	2040	54,08
	4	57500	2340	63,26
	5	46800	1490	51,28
	6	50700	2190	55,65
	7	54600	2350	60,02
	8	56000	2400	61,58
	9	42500	1510	46,47
	10	60400	2530	66,51
	11	61500	2600	67,74
	12	40100	2000	43,78
	13	45860	2170	50,23
	14	45800	2170	50,16
	15	53100	2390	58,34
3	1	46700	1990	51,17
	2	52500	2180	57,66
	3	46400	2040	50,83
	4	37400	1830	40,76
	5	39800	1980	43,44
	6	30400	3090	32,92
	7	63000	2580	69,42
	8	21800	2320	23,29
	9	56100	2450	61,70
	10	50400	2300	55,31
	11	51800	2340	56,88
	12	59900	2590	65,95
	13	55200	2540	60,69
	14	41800	2100	45,68
	15	40400	2060	44,12
4	1	47800	2090	52,40
	2	57900	2430	63,71
	3	52000	2300	57,10
	4	47300	2200	51,84
	5	60200	2610	66,29
	6	47900	2280	52,51
	7	56300	2540	61,92
	8	37900	2050	41,32
	9	45100	2210	49,38
	10	45900	2260	50,27
	11	48200	2340	52,85
	12	55800	2540	61,36
	13	56800	2580	62,48
	14	55800	2580	61,36
	15	46500	2340	50,95

Estação de coleta D				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	39700	2810	51,44
	2	53700	2120	70,05
	3	45200	1860	58,76
	4	48700	2060	63,41
	5	40500	2320	52,51
	6	46400	2020	60,35
	7	48400	2110	63,01
	8	36900	1790	47,72
	9	54700	2320	71,38
	10	49800	2190	64,87
	11	50000	2250	65,14
	12	33700	3090	43,47
	13	48900	2220	63,67
	14	48600	2200	63,27
	15	46400	2150	60,35
2	1	34500	2250	44,53
	2	44000	1910	57,16
	3	42300	1900	54,90
	4	48100	2090	62,61
	5	50400	2190	65,67
	6	49600	2180	64,60
	7	40500	1970	52,51
	8	50200	2230	65,40
	9	34500	2450	44,53
	10	43200	2050	56,10
	11	56200	2450	73,38
	12	50400	2270	65,67
	13	38600	1610	49,98
	14	44100	2120	57,29
	15	53600	2410	69,92
3	1	48200	2090	62,74
	2	45400	2030	59,02
	3	39500	2490	51,18
	4	45500	2090	59,15
	5	51900	2300	67,66
	6	48200	2210	62,74
	7	47800	2200	62,21
	8	50400	2290	65,67
	9	43300	2120	56,23
	10	41900	2090	54,37
	11	36800	1930	47,59
	12	45000	2170	58,49
	13	34400	2020	44,40
	14	45100	2200	58,62
	15	55400	2480	72,31
4	1	39800	2390	51,58
	2	50600	2250	65,93
	3	54600	2400	71,25
	4	50400	2300	65,67
	5	51700	2340	67,40
	6	36100	2110	46,66
	7	53400	2410	69,66
	8	47500	2270	61,81
	9	42400	2110	55,03
	10	44900	2220	58,36
	11	42200	2160	54,77
	12	56500	2570	73,78
	13	48700	2370	63,41
	14	45000	2280	58,49
	15	31200	2090	40,14

Estação de coleta E				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	55700	2130	60,53
	2	64700	2090	70,49
	3	53300	1910	57,87
	4	61300	2110	66,72
	5	52600	1750	57,10
	6	45800	2660	49,57
	7	57400	2080	62,41
	8	56200	2030	61,08
	9	63000	2260	68,60
	10	54000	2020	58,65
	11	56000	2090	60,86
	12	53900	2050	58,53
	13	49100	1910	53,22
	14	44900	2070	48,58
	15	59000	2210	64,18
2	1	45100	2580	48,80
	2	38900	3160	41,94
	3	50700	1860	54,99
	4	44100	2650	47,69
	5	41000	3340	44,26
	6	41700	2380	45,04
	7	50900	1970	55,22
	8	42100	1920	45,48
	9	45300	1830	49,02
	10	40200	2810	43,38
	11	42500	1830	45,92
	12	33600	3520	36,07
	13	21500	3640	22,68
	14	11600	3480	11,73
	15	10900	3370	10,95
3	1	49800	1850	54,00
	2	44700	2830	48,35
	3	38600	3330	41,61
	4	39300	2530	42,38
	5	50600	1980	54,88
	6	42500	2530	45,92
	7	40800	2740	44,04
	8	32800	3470	35,19
	9	42000	2460	45,37
	10	46200	1940	50,01
	11	48100	2010	52,12
	12	47900	2000	51,90
	13	45900	1970	49,68
	14	37500	3150	40,39
	15	37900	2880	40,83
4	1	37200	3090	40,06
	2	39400	2420	42,49
	3	40100	3170	43,26
	4	52500	2110	56,99
	5	54500	2170	59,20
	6	49300	2090	53,44
	7	40500	2680	43,71
	8	60700	2480	66,06
	9	54200	2260	58,87
	10	57500	2410	62,52
	11	54200	2320	58,87
	12	39600	2910	42,71
	13	48100	2160	52,12
	14	52200	22800	56,65
	15	47700	2160	51,67

Estação de coleta F				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	29500	3490	55,94
	2	32600	3440	62,02
	3	29900	3510	56,73
	4	23500	3700	44,16
	5	24000	3420	45,14
	6	30800	3300	58,49
	7	29400	3390	55,74
	8	25400	3580	47,89
	9	22500	3630	42,20
	10	21700	3570	40,63
	11	32100	3260	61,04
	12	17100	3470	31,60
	13	27500	3540	52,01
	14	27800	3410	52,60
	15	20600	3780	38,47
2	1	20900	3630	39,06
	2	31700	3390	60,26
	3	33300	3360	63,40
	4	31000	3310	58,88
	5	25600	3620	48,29
	6	29000	3220	54,96
	7	36300	2780	69,29
	8	24300	3910	45,73
	9	33600	2760	63,99
	10	29800	2950	56,53
	11	30100	3420	57,12
	12	25600	3650	48,29
	13	24300	3620	45,73
	14	26600	3390	50,25
	15	22100	3580	41,42
3	1	27000	3470	51,03
	2	31300	3350	59,47
	3	28900	3520	54,76
	4	27200	3750	51,43
	5	31800	3190	60,45
	6	27600	3420	52,21
	7	28400	3450	53,78
	8	30800	3320	58,49
	9	28900	3290	54,76
	10	23500	3280	44,16
	11	34300	3110	65,36
	12	25500	3230	48,09
	13	31000	2930	58,88
	14	40000	2660	76,55
	15	25500	3470	48,09
4	1	19300	3420	35,92
	2	20500	3580	38,27
	3	22500	3640	42,20
	4	26200	3510	49,46
	5	22000	3720	41,22
	6	22500	3770	42,20
	7	20300	3600	37,88
	8	29200	3440	55,35
	9	16300	3380	30,03
	10	22900	3550	42,99
	11	15300	3480	28,07
	12	21700	3610	40,63
	13	21500	3630	40,24
	14	22400	3570	42,00
	15	27900	3090	52,80

Estação de coleta G				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	40100	2980	38,38
	2	37200	3180	35,53
	3	45900	1900	44,07
	4	43100	2500	41,32
	5	39300	2350	37,59
	6	42500	2340	40,73
	7	45400	1920	43,58
	8	39600	2110	37,89
	9	44100	1900	42,30
	10	31200	3040	29,64
	11	48100	2030	46,23
	12	38500	2930	36,81
	13	50000	2120	48,09
	14	34700	2990	33,08
	15	34900	2790	33,27
2	1	42700	1750	40,93
	2	32200	2730	30,62
	3	49900	2040	47,99
	4	28400	3680	26,89
	5	53500	2160	51,53
	6	33700	3210	32,09
	7	35900	1600	34,25
	8	32100	2590	30,52
	9	33900	1500	32,29
	10	34000	3120	32,39
	11	34900	2820	33,27
	12	35100	2910	33,47
	13	41500	2540	39,75
	14	32900	2330	31,31
	15	40400	1910	38,67
3	1	36900	1490	35,24
	2	42400	1970	40,63
	3	31000	2420	29,44
	4	45700	1940	43,87
	5	33600	1970	32,00
	6	40400	2190	38,67
	7	33800	2740	32,19
	8	36200	2880	34,55
	9	38900	1860	37,20
	10	46500	2070	44,66
	11	32200	1740	30,62
	12	44100	2000	42,30
	13	35400	1990	33,76
	14	32500	2920	30,92
	15	39900	1910	38,18
4	1	33800	3250	32,19
	2	35400	2430	33,76
	3	38000	2470	36,31
	4	42400	1870	40,63
	5	27100	3020	25,62
	6	33700	2220	32,09
	7	33500	2740	31,90
	8	30800	1720	29,25
	9	37600	2190	35,92
	10	46500	2080	44,66
	11	39400	2170	37,69
	12	42000	1980	40,24
	13	31900	1550	30,33
	14	34400	1710	32,78
	15	39400	1890	37,69

Estação de coleta H				
Ponto	Leituras	Concentração da atividade de Radônio (Bq m <sup>-3</sup> )	Erro	GEORP
1	1	27300	2980	8,01
	2	37900	3180	11,24
	3	55500	1900	16,60
	4	57500	2500	17,20
	5	62900	2350	18,85
	6	50300	2340	15,01
	7	58200	1920	17,42
	8	54700	2110	16,35
	9	64000	1900	19,18
	10	61300	3040	18,36
	11	46700	2030	13,92
	12	60300	2930	18,06
	13	46500	2120	13,86
	14	66800	2990	20,04
	15	59200	2790	17,72
2	1	51800	1750	15,47
	2	73100	2730	21,95
	3	72600	2040	21,80
	4	71800	3680	21,56
	5	78900	2160	23,72
	6	82200	3210	24,73
	7	95200	1600	28,68
	8	86500	2590	26,04
	9	86100	1500	25,91
	10	90100	3120	27,13
	11	63300	2820	18,97
	12	90400	2910	27,22
	13	72800	2540	21,86
	14	87200	2330	26,25
	15	78100	1910	23,48
3	1	54800	1490	16,38
	2	73200	1970	21,99
	3	86800	2420	26,13
	4	101000	1940	30,45
	5	81900	1970	24,63
	6	99700	2190	30,05
	7	78300	2740	23,54
	8	97800	2880	29,48
	9	91600	1860	27,59
	10	111000	2070	33,50
	11	76800	1740	23,08
	12	79400	2000	23,87
	13	77100	1990	23,17
	14	93300	2920	28,11
	15	99400	1910	29,96
4	1	<2000	NI	NC
	2	<2000	NI	NC
	3	<2000	NI	NC
	4	<2000	NI	NC
	5	<2000	NI	NC
	6	<2000	NI	NC
	7	<2000	NI	NC
	8	<2000	NI	NC
	9	<2000	NI	NC
	10	<2000	NI	NC
	11	<2000	NI	NC
	12	<2000	NI	NC
	13	<2000	NI	NC
	14	<2000	NI	NC
	15	<2000	NI	NC

<2000 = Não mensurável

NI = Não informado

NC = Não calculado

**ANEXO B**

Figura B. 1: Sala de reunião diretoria (CR-39 - 2430).



Figura B. 2: Sala de infraestrutura (CR-39 - 2431).



Figura B. 3: Salão Parceria (CR-39 - 2432).



Figura B. 4: Informática (CR-39 - 2433).



Figura B. 5: Copa (CR-39 - 2434).



Figura B. 6: Área de eventos - 1 (CR-39 - 2435).



Figura B. 7: Sala PI (CR-39 - 2436).



Figura B. 8: Sala Administrativa (CR-39 - 2437).



Figura B. 9: Área de eventos -2 (CR-39 - 2438).

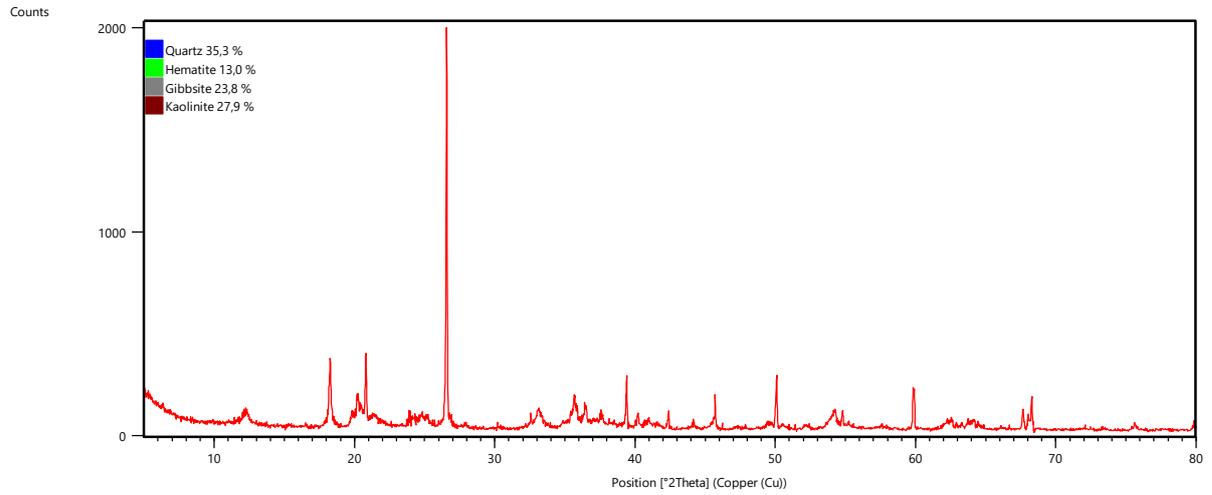


Figura B. 10: Difratoograma estação de coleta A.

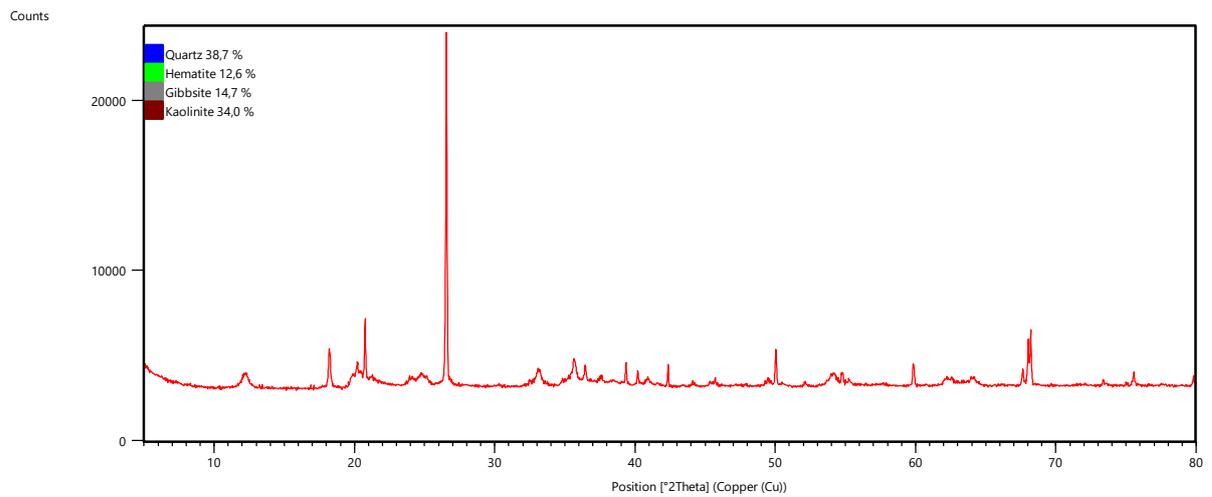


Figura B. 11: Difratoograma estação de coleta B.

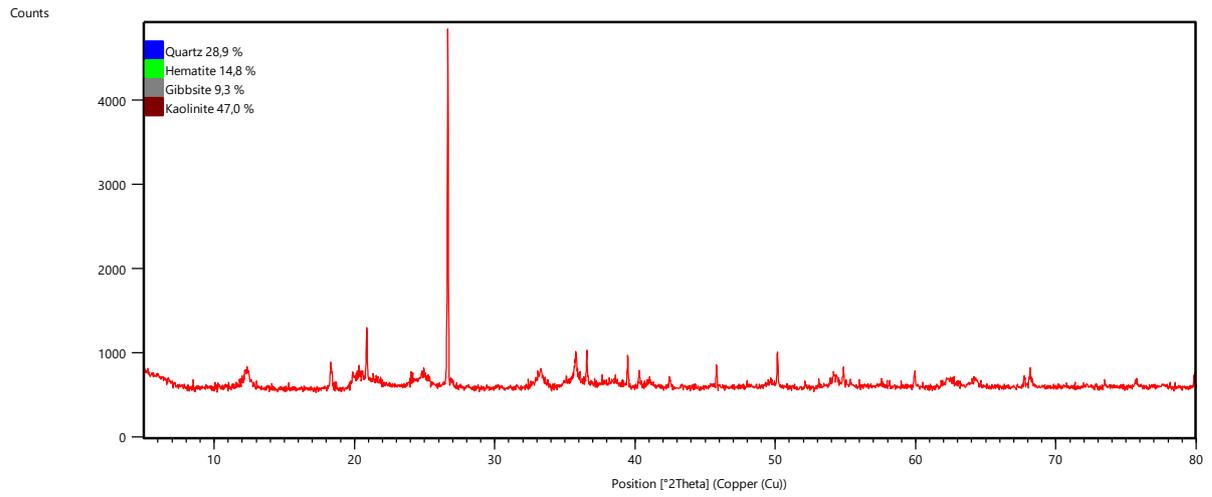


Figura B. 12: Difratoograma estação de coleta C.

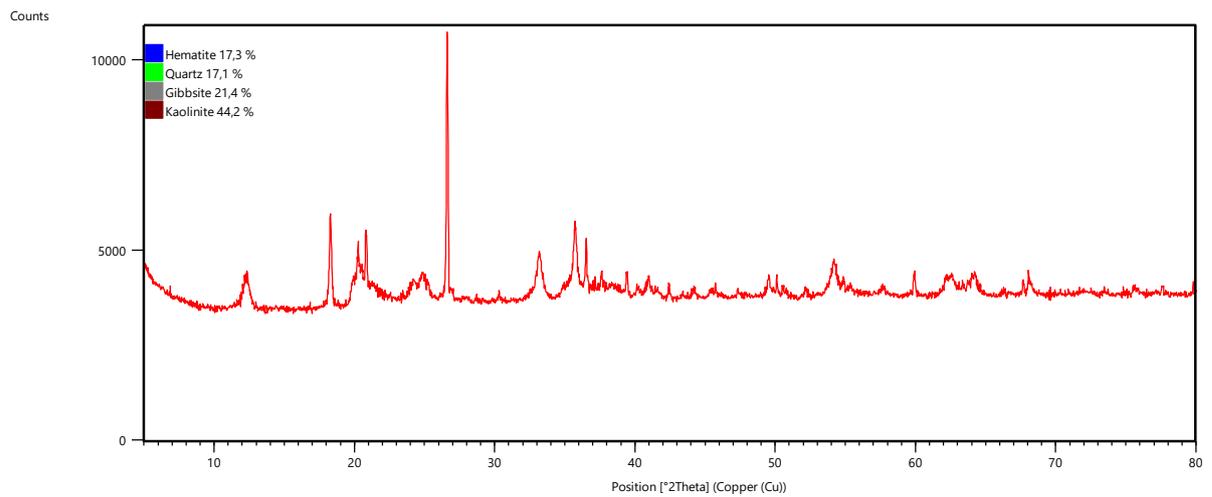


Figura B. 13: Difratoograma estação de coleta D.

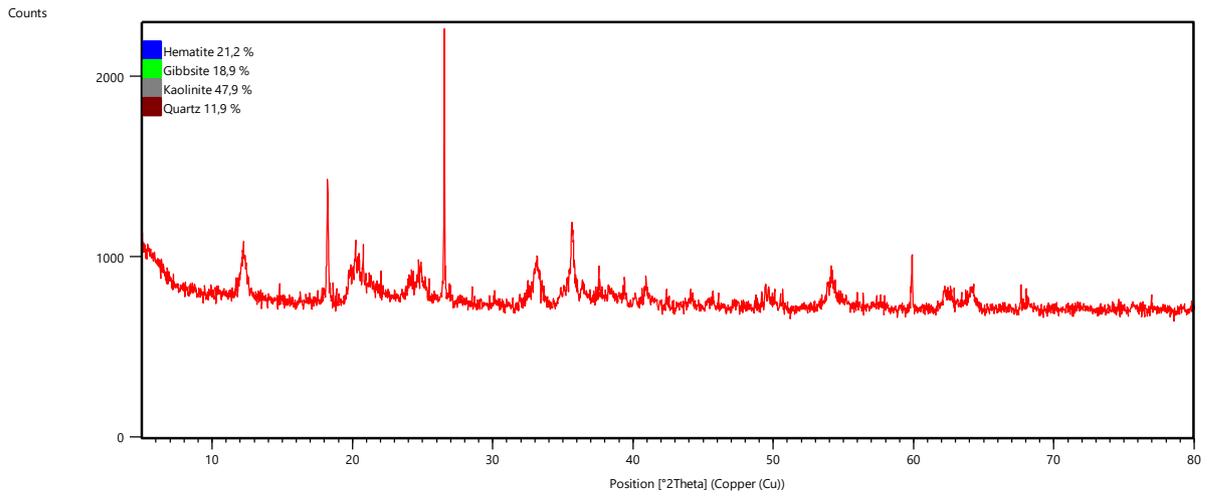


Figura B. 14: Difratoograma estação de coleta E.

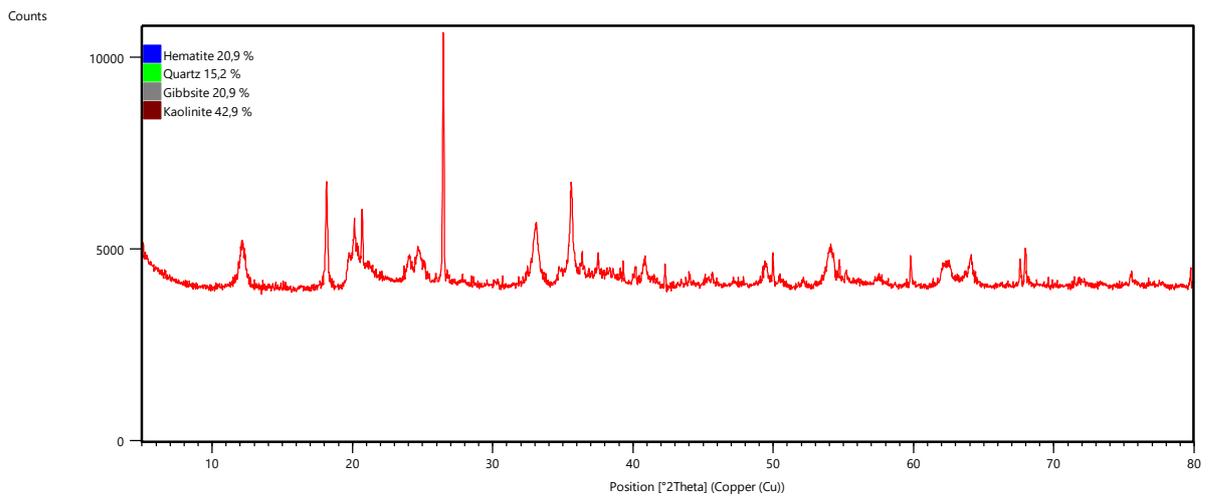


Figura B. 15: Difratoograma estação de coleta F.

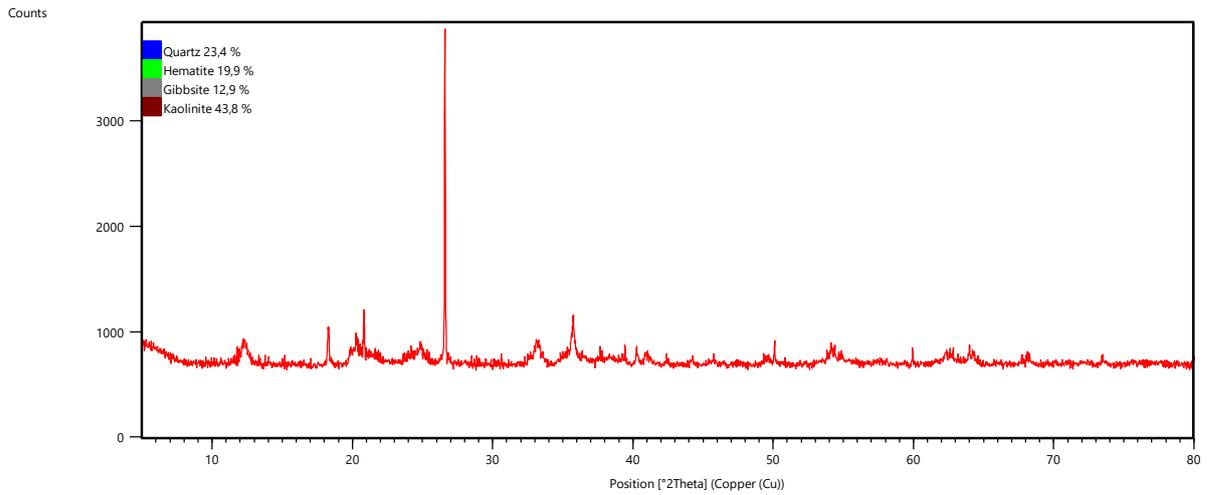


Figura B. 16: Difratoograma estação de coleta G.

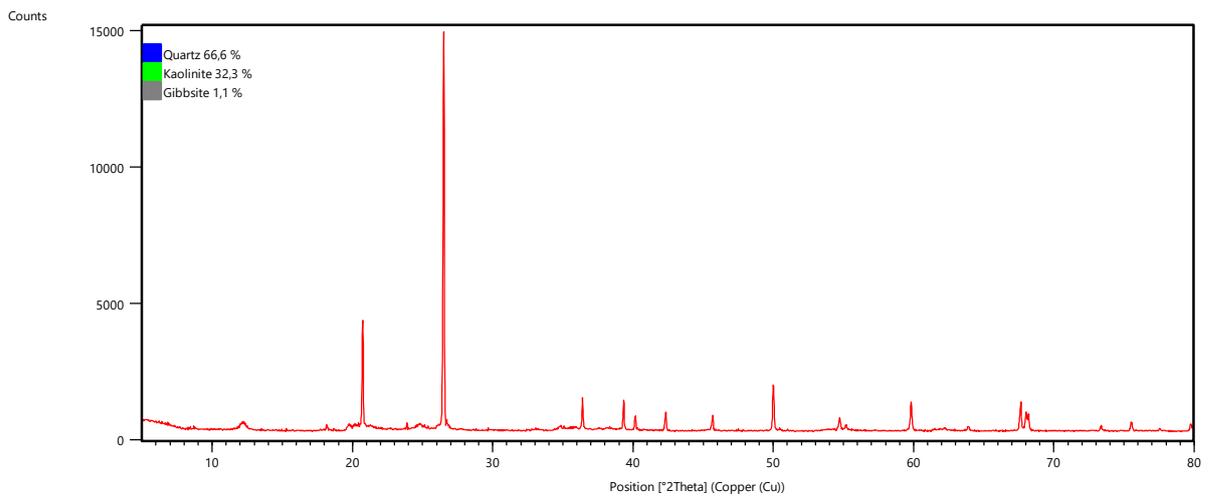


Figura B. 17: Difratoograma estação de coleta H.

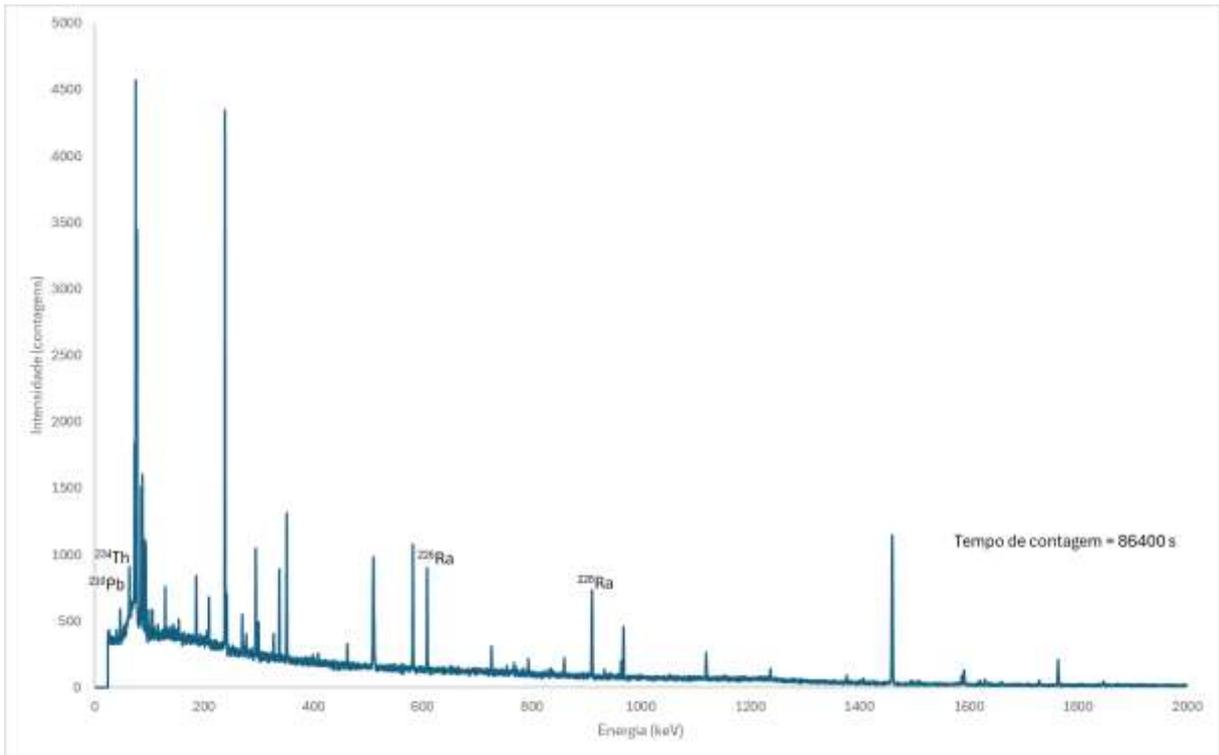


Figura B. 18: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta A.

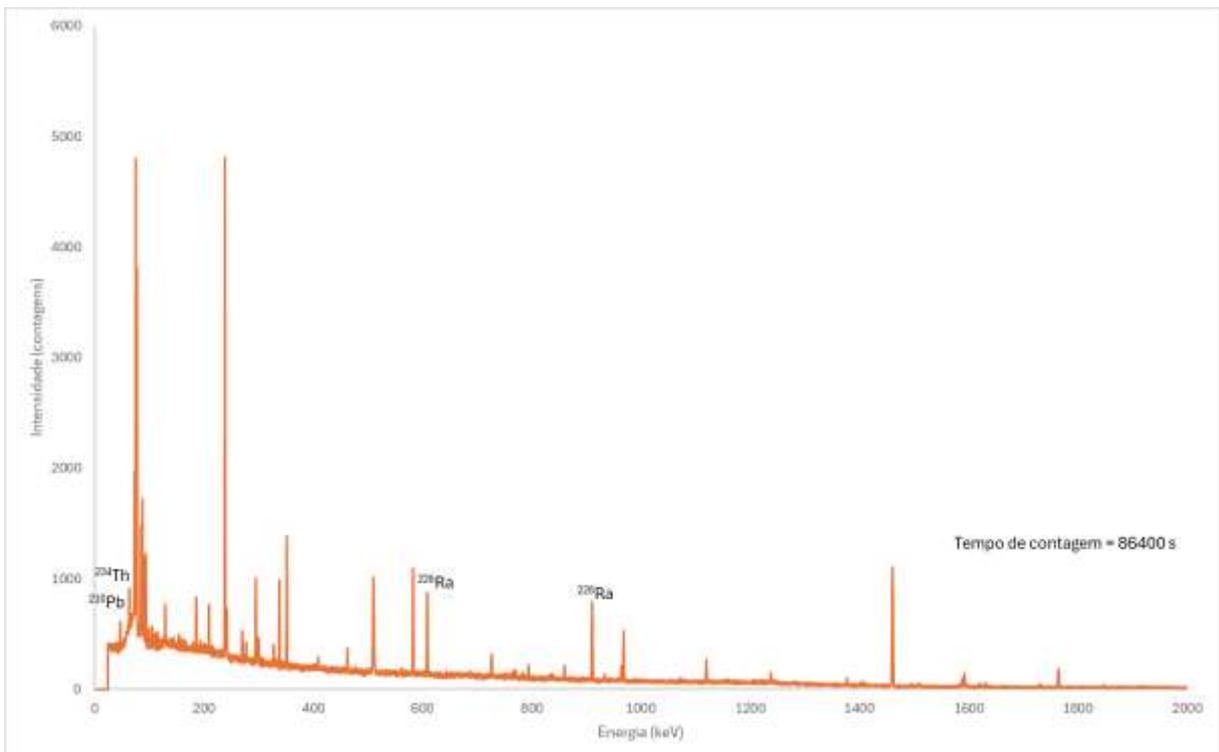


Figura B. 19: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta B.

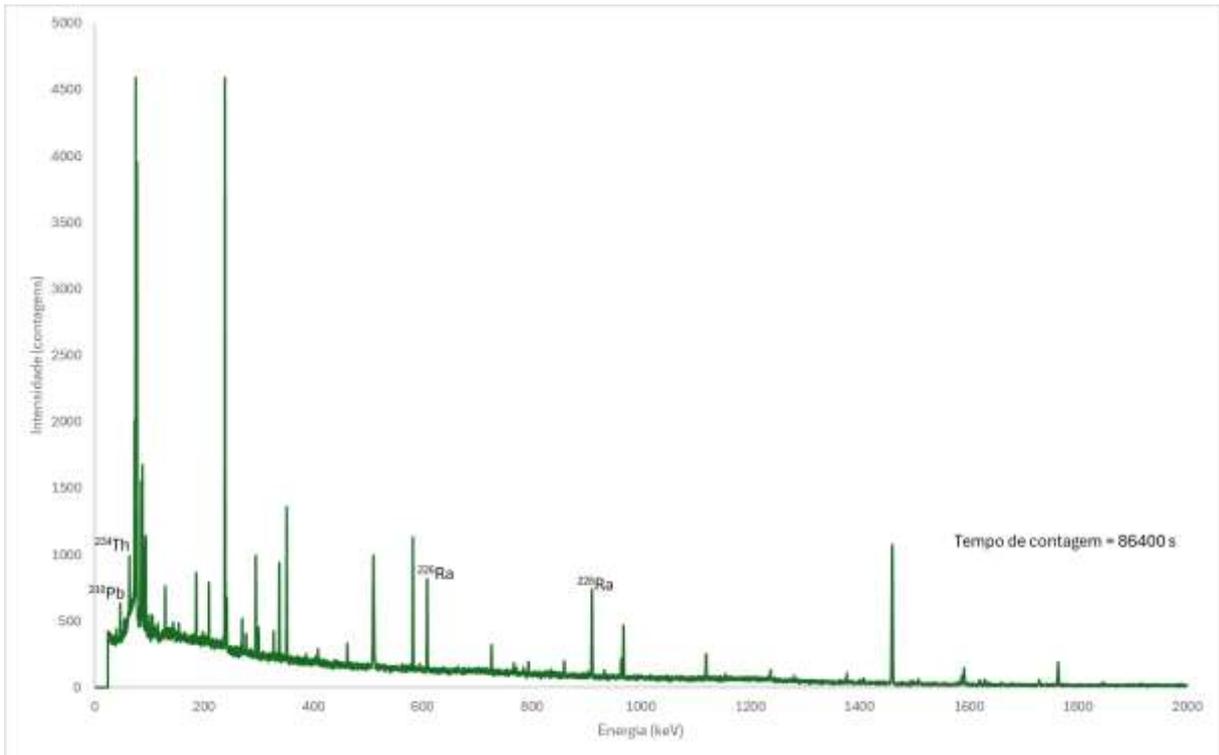


Figura B. 20: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta C.

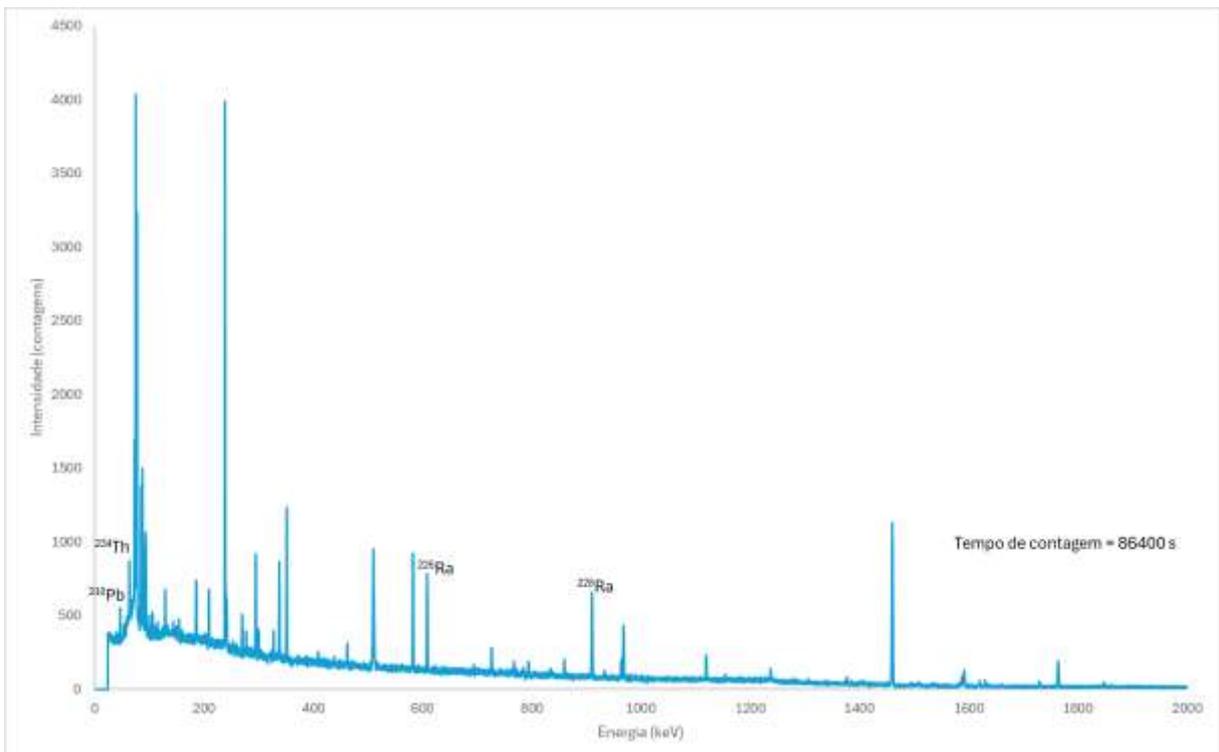


Figura B. 21: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta D.

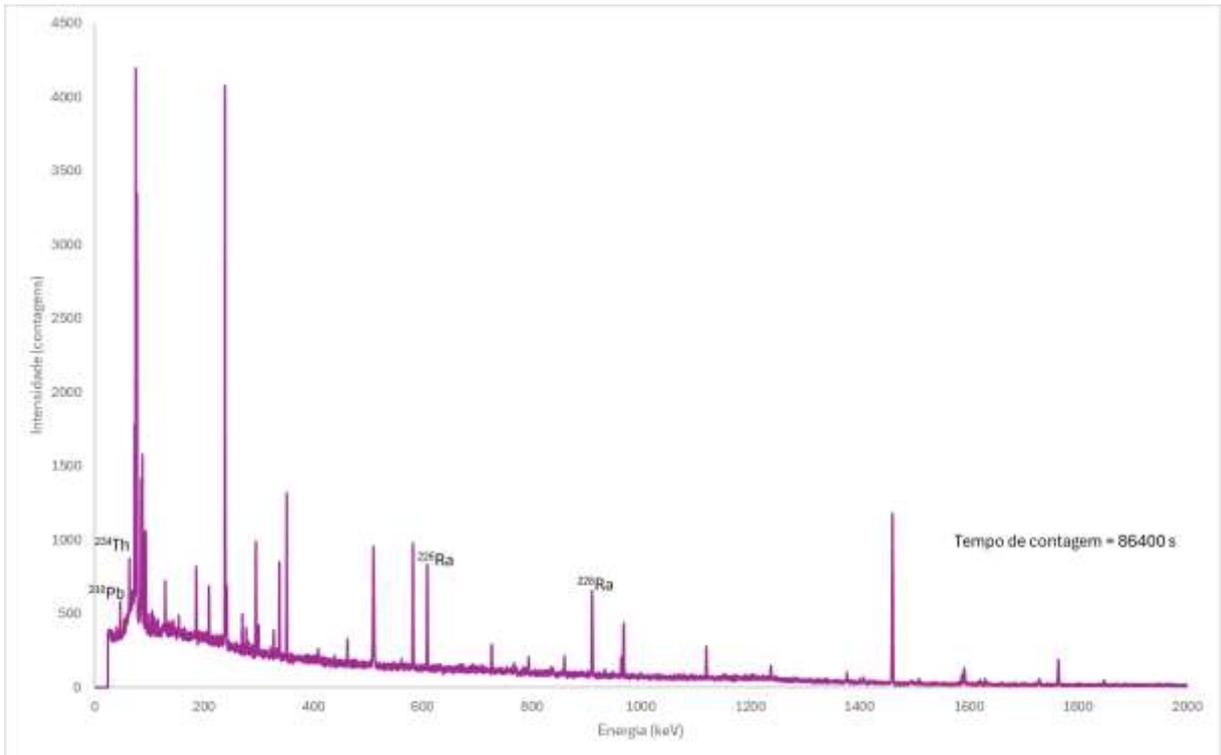


Figura B. 22: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta E.

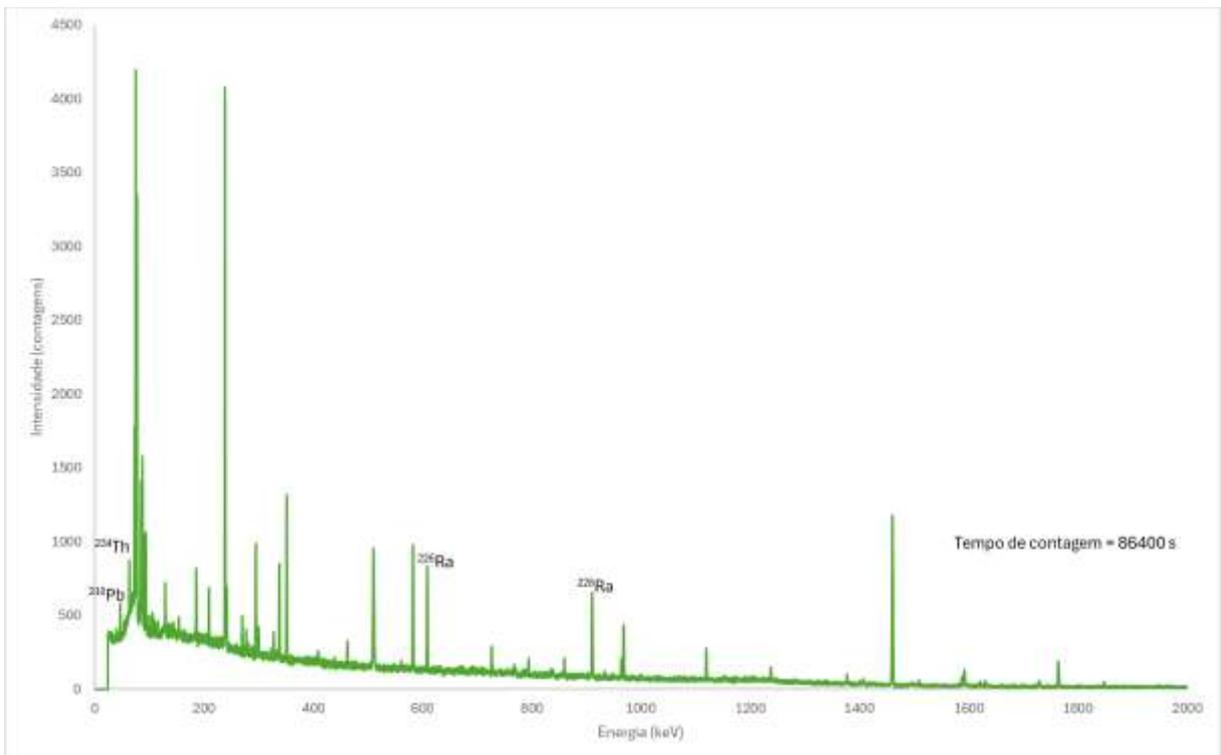


Figura B. 23: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta F.

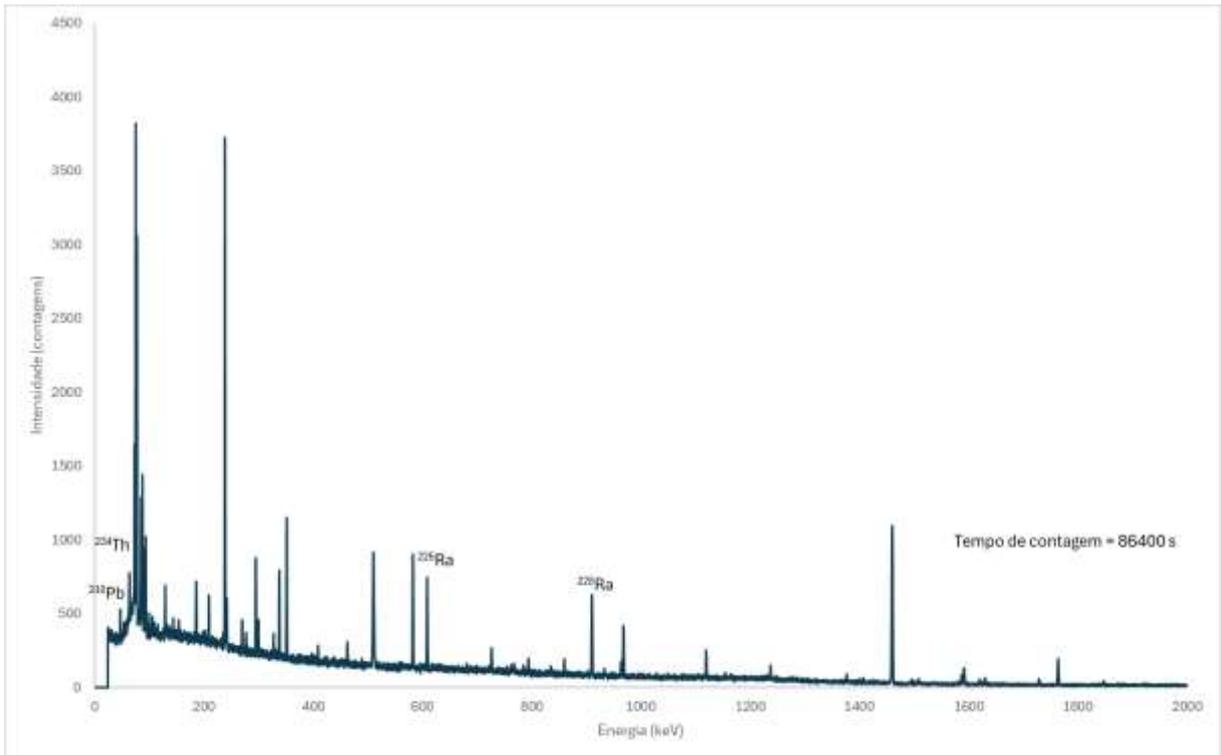


Figura B. 24: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta G.

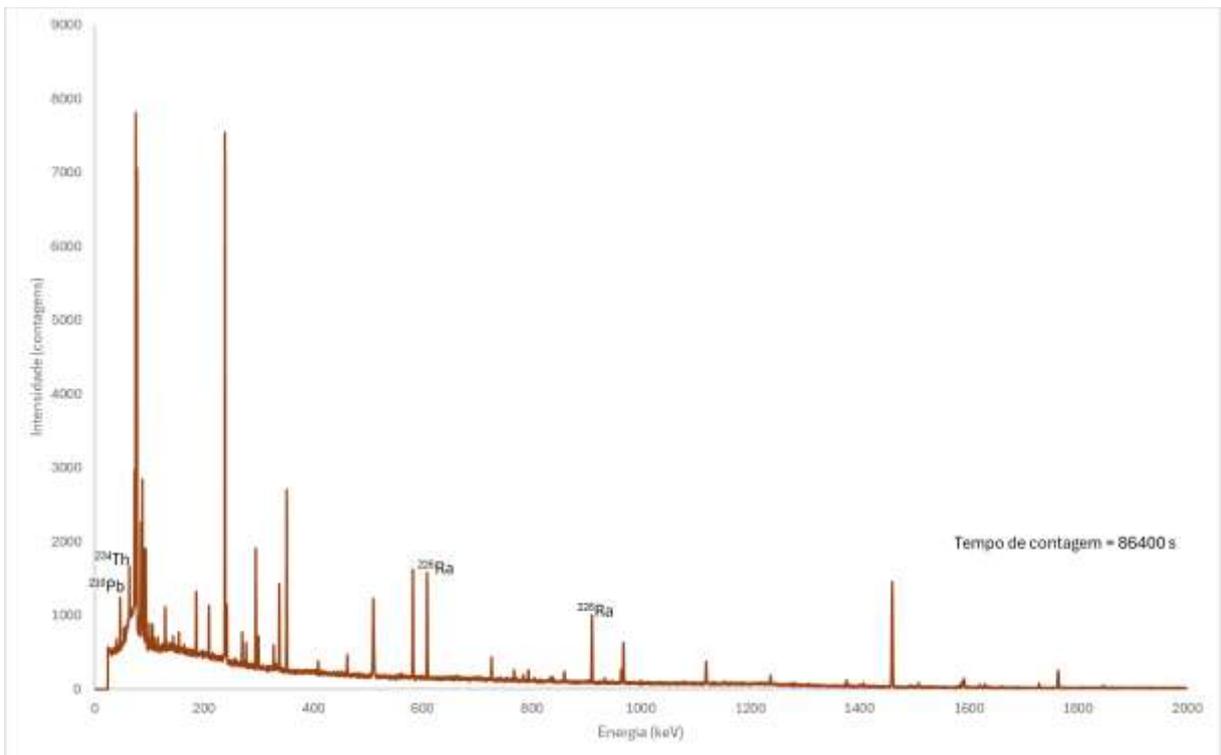


Figura B. 25: Espectro de raios gama de alta resolução da estação de coleta H.