

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO RIO GRANDE DO NORTE

OZENILDO GIL SILVA DE SOUZA

MAPEAMENTO DO GÁS RADÔNIO, TÓRIO E URÂNIO E DE MINERAIS PESADOS  
EM AREIAS DO RIO POTENGI-RN USADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

NATAL-RN

2017

OZENILDO GIL SILVA DE SOUZA

MAPEAMENTO DO GÁS RADÔNIO, TÓRIO E URÂNIO E DE MINERAIS PESADOS  
EM AREIAS DO RIO POTENGI-RN USADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: D.r Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto

NATAL-RN

2017

Souza, Ozenildo Gil Silva de.

S729m Mapeamento do gás radônio, tório e urânio e de minerais pesados em areias do Rio Potengi-RN usadas na construção civil / Ozenildo Gil Silva de Souza. – 2017.

80 f : il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

Orientador(a): Prof. D.r Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto.

1. Danos por agentes naturais. 2. Radiação natural – Rio Potengi-RN. 3. Radônio. 4. Minerais pesados. I. Cavalcanti Neto, Mário Tavares de. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. III. Título.

CDU 504.3(813.2)

Catálogo na Publicação elaborada pela Seção de Processamento Técnico da Biblioteca Setorial Walfredo Brasil (BSWB) do IFRN.

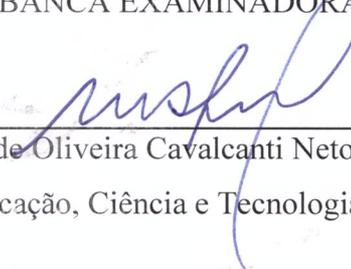
OZENILDO GIL SILVA DE SOUZA

**MAPEAMENTO DO GÁS RADÔNIO, TÓRIO E URÂNIO E DE MINERAIS  
PESADOS EM AREIAS DO RIO POTENGI-RN USADAS NA CONSTRUÇÃO  
CIVIL**

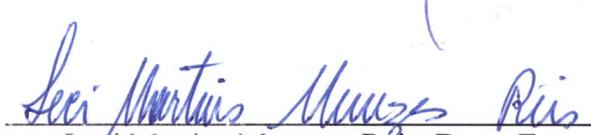
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito á obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Dissertação apresentado e aprovado em 30/08/17, pela seguinte, Banca Examinadora:

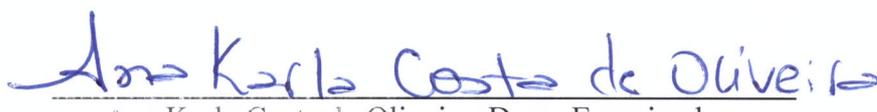
**BANCA EXAMINADORA:**

  
Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto, D.r - Presidente

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

  
Leci Martins Menezes Reis, D.ra - Examinadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

  
Ana Karla Costa de Oliveira, D.ra - Examinadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

  
Bruna Marcela Soares de Araújo, M.a - Examinadora

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

## AGRADECIMENTOS

A Deus, força suprema. Aquele em que buscamos coragem para seguir em frente em busca de nossos sonhos.

À família, pelo apoio nas horas precisas. Em especial aos meus pais Ozenir e Ligia que passaram por grandes problemas nesse período, mas que não deixaram de lutar e ter fé em dias melhores. A minha filhinha Nicole que cresce rápido a cada dia, pelo amor e carinho sincero em todos os momentos. A minha avó Letice de Azevedo Silva (*in memoriam*) que nos deixou repentinamente e que agora encontra-se nos braços do pai eterno. A Karoline Louise, companheira de momentos árdios de preocupação com a finalização desta dissertação e pela ajuda na formatação do mesmo. Aos amigos Daniel Nunes, Aniely Márcia, Olavo Vitorino e Diego Freitas pelo coleguismo, apoio e momentos de descontração, em especial Diego que ajudou bastante na produção cartográfica e organização do banco de dados.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação do Rio Grande do Norte pela disseminação de seus conhecimentos, contribuindo na minha formação como cidadão, principalmente ao professor Doutor Valdenildo Pedro pelos puxões de orelhas e correções precisas, no intuito da melhor produção do trabalho. Aos colegas da primeira turma do mestrado 2015 pelo coleguismo em todos os momentos, em especial a Gabriella Freire, Ana Valeria, Vinicius Meressiev, Robson Garcia, Andrea Castro, Sylbenia Alves e Ranieri Barbosa pela amizade construída e pela partilha de conversas extrovertidas, além de discussões acerca da produção científica.

Ao Professor Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto pela dedicação e presteza em suas colocações e informações, além de seu precioso tempo dedicado à orientação da produção deste trabalho. Aos bolsistas do grupo de pesquisa mineral do IFRN, dentre eles os alunos Aurélio e em especial a bolsista Rita pelo apoio na coleta de campo e análise dos minerais em laboratório, como também a professora Ana Karla pela ajuda na coleta de dados de campo e coleguismo fora dos horários de trabalho transmitindo energias positivas para continuar com a produção do estudo. Aos professores Thomas Campos, Júlio Navone e o bolsista Carlos Vinicius do laboratório de radioatividade natural da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pela dispensa de suas atividades para contribuir na medição do gás radônio. A técnica de laboratório Bruna Araújo pela ajuda na análise do material de areia no laboratório do IFRN, além da disseminação de informações e materiais, além das orientações sobre os procedimentos de uso e dos resultados obtidos pelo MEV/EDS. Aos membros da banca examinadora, pela contribuição e correções pertinentes para com o trabalho proposto.

## RESUMO

Um dos impactos ambientais menos perceptíveis se refere aos oriundos de elementos naturais radioativos, problemas esses diretamente ligados aos acidentes que ocorrem em usinas nucleares ou relacionados ao destino do chamado lixo atômico, que são os resíduos oriundos de materiais radioativos como o urânio para a fissão do átomo, além de problemas provocados por elementos radioativos provenientes de fontes naturais e que podem ocasionar a contração de doenças cancerígenas provocadas pelo contato dos seres humanos com esses elementos, principalmente com o urânio, tório, rádio e radônio. A presente dissertação tem como objetivo geral mapear a radiação natural do gás radônio, tório e urânio e de minerais pesados nas areias do rio Potengi-RN, usadas na construção civil. A metodologia utilizada está pautada em técnicas de campo para medição da radiação natural das areias do rio Potengi-RN com a utilização de equipamentos como o gama espectrômetro RS-125 e RS-220 e de procedimentos em laboratório para mapear teores do gás radônio nas areias a partir do uso do método de câmeras de ionização por eletretos, além de técnicas de laboratório para caracterização dos minerais pesados das areias do leito seco do rio Potengi-RN, como técnicas de detecção de Energia Dispersiva por Raio-X (EDX), de Energia Dispersiva por Espectroscopia (EDS) e da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O trabalho apresenta como resultados diferentes concentrações radioativas provenientes da presença dos elementos urânio, tório, potássio e radônio, sendo as maiores concentrações ligadas à extração mineral mecanizada e principalmente a proximidade com afloramentos rochosos ao longo do rio. Além disso, foram identificados nas areias do leito seco do rio alguns minerais pesados em destaque os Elementos Terras Raras (ETR). Conclui-se, portanto, que as técnicas utilizadas foram importantes no mapeamento dos elementos radioativos e de minerais pesados nas areias do rio e que, mesmo apresentando baixa concentração do gás radônio, qualquer exposição a esse gás é prejudicial à saúde, independentemente de seus níveis de concentração; em termos de minerais pesados o destaque fica para a identificação de ETR nos minerais arenosos aluviais. Desse modo, o uso das areias do rio Potengi-RN na construção civil deve ter uma atenção especial por parte dos órgãos reguladores e fiscalizadores para o monitoramento dos teores dos elementos radioativos e minerais pesados nessas areias, pois podem ser um fator de risco para a população em geral.

Palavras-chave: Danos por agentes naturais. Radiação Natural. Radônio. Minerais Pesados.

## ABSTRACT

One of the least noticeable environmental impacts is that of natural radioactive elements, problems that are directly related to the accidents that occur in nuclear plants or related to the destination of the so-called atomic waste, which are the residues from radioactive materials such as uranium for the fission of the atom, in addition to problems caused by radioactive elements from natural sources and which can cause the contraction of cancerous diseases caused by the contact of humans with these elements, mainly uranium, thorium, radium and radon. The present dissertation aims at mapping the natural radiation of radon, thorium and uranium gas and heavy minerals in the Potengi-RN river sands used in construction. The methodology used is based on field techniques to measure the natural radiation of the Potengi-RN river sands with the use of equipment such as the RS-125 and RS-220 spectrometer range and laboratory procedures to map the levels of radon gas in the sands the use of the electret ionization camera method, as well as laboratory techniques to characterize the heavy minerals of the dry bed sands of the Potengi-RN river, such as X-ray Dispersive Energy (EDX) detection techniques, Dispersive Energy by Spectroscopy (EDS) and Scanning Electron Microscopy (MEV). The results show different radioactive concentrations from the presence of uranium, thorium, potassium and radon elements, with the highest concentrations being related to mechanized mineral extraction and, in particular, proximity to rocky outcrops along the river. In addition, some heavy minerals were identified in the sands of the dry river bed, in particular the Rare Earth Elements (ETR). It is concluded, therefore, that the techniques used were important in the mapping of radioactive elements and heavy minerals in the river sands and that, even with low concentration of radon gas, any exposure to this gas is detrimental to health regardless of its levels of concentration; in terms of heavy minerals the highlight is for the identification of ETRs in alluvial sandy minerals. Thus, the use of the Potengi-RN river sands in the construction industry should be given special attention by the regulatory and oversight bodies to monitor the contents of the radioactive elements and heavy minerals in these sands, since they may be a risk factor for the population.

Keywords: Damage to natural agents. Natural Radiation. Radon. Heavy Minerals.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Mapa 1	–	Localização da bacia hidrográfica do rio Potengi-RN.....	34
Mapa 2	–	Distribuição dos processos minerais do ano de 2017 no município de São Gonçalo do Amarante-RN.....	35
Mapa 3	–	Localização da área de estudo no município de São Gonçalo do Amarante-RN.....	36
Mapa 4	–	Requerimentos minerários de 2017 na área de estudo.....	37
Mapa 5	–	Geologia da área de estudo.....	38
Fotografia 1	–	Medição radiométrica nas areias do rio Potengi-RN.....	42
Mapa 6	–	Pontos de coleta nas localidades Igreja Nova e Jacobina, município de São Gonçalo do Amarante-RN.....	43
Fotografia 2	–	Coleta de areia a um metro de profundidade.....	44
Figura 1	–	Tabulação dos dados no programa ArcGIS 10.1.....	44
Fotografia 3	–	Leitor Electric Voltage Reader (SPER) à esquerda. À direita Câmara E- PERM “aberta”, no centro recipiente de vidro para confinamento do material.....	45
Mapa 7	–	Amostras selecionadas para medição da concentração de radônio.....	47
Fotografia 4	–	Coletas de amostras de areia no leito seco do rio.....	47
Quadro 1	–	Sequência fotográfica do procedimento de separação de amostras e leitura nas câmaras de ionização no laboratório da UFRN.....	48
Fotografia 5	–	Separação da amostra de areia.....	50
Fotografia 6	–	Pesagem das amostras.....	51
Esquema 1	–	Procedimentos experimentais adotados.....	51
Gráficos 1	–	Valores de urânio.....	53
Gráficos 2	–	Valores de tório.....	53
Fotografia 7	–	Extração de areia de forma mecanizada.....	54
Fotografia 8	–	Extração de areia de forma manual.....	55
Mapa 8	–	Concentração de urânio no trecho do rio estudado.....	56
Mapa 9	–	Concentração de tório no trecho do rio estudado.....	57
Mapa 10	–	Concentração de potássio no rio estudado.....	58

Mapa 11	–	Radiação gamma nas areias do rio estudado.....	59
Mapa 12	–	Dose absorvida no rio Potengi-RN pelo método de Krigagem, através dos valores obtidos pelo RS-125.....	60
Gráfico 3	–	Concentrações de radônio nas amostras de areia do rio Potengi- RN.....	63
Fotografia 9	–	Afloramento rochoso no leito do rio Potengi-RN.....	64
Quadro 2	–	Principais elementos identificados pelo MEV/EDS.....	66
Gráficos 5	–	Elementos identificados nos espectros 6.....	66
Gráfico 6	–	Elementos identificados nos espectros 12.....	66
Figura 2	–	Apontamentos dos espectros nos grãos selecionados – concentração metálica de areia.....	67
Figura 3	–	Grãos de areia, onde os espectros identificaram ETR.....	68
Gráfico 7	–	Percentual dos elementos terras raras nas amostras analisadas...	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Amostras selecionadas para análise em laboratório.....	46
Tabela 2	– Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em junho/2016 na comunidade Igreja Nova, município de São Gonçalo do Amarante-RN.....	61
Tabela 3	– Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em fevereiro/2017 na comunidade Jacobina, município de São Gonçalo do Amarante-RN.....	61
Tabela 4	– Diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em junho/2017 em Igreja Nova, São Gonçalo do Amarante-RN.....	62
Tabela 5	– Resultados dos cálculos das concentrações de radônio na comunidade Igreja Nova, São Gonçalo do Amarante-RN....	62
Tabela 6	– Resultados dos cálculos das concentrações de radônio na comunidade Jacobina, São Gonçalo do Amarante-RN.....	62
Tabela 7	– Análise química semiquantitativa (EDX) da Amostra J2P1.	65

## LISTA DE SIGLAS

RMN	Região Metropolitana de Natal
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
UNCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WHO	World Health Organization
EUA	Estados Unidos da América
USEPA	United States Environmental Protection Agency
RN	Rio Grande do Norte
IDEMA	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte
GPS	Sistema de Posicionamento Global
APP	Área de Preservação Permanente
LARANA	Laboratório de Radioatividade Natural
EIC	Câmara de Ionização por Eletretos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	Espectrômetro de Energia Dispersiva
EDX	Detector de Energia Dispersiva por Raio-X
ETR	Elementos Terras Raras
SV	Sievert

## LISTA DE SÍMBOLOS

Rn	Radônio
U	Urânio
Th	Tório
K	Potássio
Bq	Bequerel
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
Ra	Rádio
Ppm	Partes por milhão
L	Litro
Gy	Gray
O	Oxigênio
Pr	Praseodímio
Pm	Promédio
Nd	Neodímio
Sm	Samário
Eu	Európio
Gd	Gadolínio
Tb	Térbio
Al	Alumínio
Ca	Cálcio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	18
2.1	CONCEPÇÕES SOBRE RADIOATIVIDADE E RADIAÇÃO	18
<b>2.1.1</b>	<b>Radioatividade no ambiente</b>	20
<b>2.1.2</b>	<b>Influências do urânio, tório e rádio no ambiente</b>	21
2.2	O GÁS RADÔNIO	23
<b>2.2.1</b>	<b>Efeitos do radônio para os seres humanos</b>	24
2.3	SOLOS ARENOSOS E AGREGADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	25
<b>2.3.1</b>	<b>Atividade de exploração mineral e suas regulamentações</b>	26
<b>2.3.2</b>	<b>Legislação específica sobre a mineração de areia no RN</b>	29
2.4	MINERAIS PESADOS	30
<b>2.4.1</b>	<b>Técnicas de caracterização de minerais por meio de EDX, MEV/EDS</b>	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA GERAL</b>	33
3.1	DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.2	ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS DA ÁREA DE ESTUDO	37
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	40
4.1	MÉTODO DE ABORDAGEM DA PESQUISA	40
4.2	MEDIÇÃO RADIOMÉTRICA	41
4.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA DETECÇÃO DO GÁS RADÔNIO	45
<b>4.3.1</b>	<b>Detecção de radônio por câmara de Ionização por Eletretos EIC (E-Perm)</b>	45
4.4	EDX: PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E ANÁLISES	50
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA COM ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (MEV/EDS)	52
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	53
5.1	RADIAÇÃO NATURAL DE URÂNIO, TÓRIO E POTÁSSIO NAS	53

	AREIAS DO RIO POTENGI	
5.1.1	Teores de urânio (U)	55
5.1.2	Teores de tório (Th)	57
5.1.3	Teores de potássio (K)	58
5.1.4	Gamma total e dose radiométrica	59
5.2	O GÁS RADÔNIO NAS AREIAS DO RIO POTENGI	61
5.3	IDENTIFICAÇÃO DE MINERAIS PESADOS POR EDX	65
5.4	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AREIAS DO LEITO SECO DO RIO POTENGI	65
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – Planilha de campo: dados radiométricos	77
	ANEXO A – Diretrizes para submissão à Revista REDE	78
	ANEXO B – Comprovante de submissão do artigo científico na revista REDE	80

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, os principais problemas ambientais de grande escala estão ligados ao desmatamento de vegetação em florestas e área de várzea, ao efeito estufa ocasionado pelo aumento da temperatura, à chuva ácida, bem como aqueles ligados à contaminação de águas e dos solos, seja pela disposição de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos ou mesmo pela presença de minerais pesados. Entende-se por problemas ambientais alterações provocadas pela interferência humanas ou por fenômenos naturais sobre os diferentes ecossistemas terrestres, o que acaba acarretando para o desequilíbrio do ambiente, comprometendo a qualidade de vida das pessoas.

Um dos impactos ambientais pouco perceptível está ligada aos impactos provocados pelos elementos naturais radioativos no meio ambiente. Em muitos casos, os impactos envolvem acidentes em usinas nucleares ou provocados pela destinação inadequada do lixo atômico, uma vez que, esses são resíduos que contém materiais radioativos como o urânio, tório, rádio e radônio. Além desses problemas, os elementos naturais radioativos (naturais por existirem na natureza) podem provocar sérios riscos para os seres humanos, como na contração de doenças cancerígenas, por exemplo.

Em todo o mundo, muitos acidentes são registrados associados a aspectos como a liberação de material radioativo de dentro de reatores nucleares, o que acaba ocasionando a contaminação do meio ambiente e provocando doenças como o câncer e mesmo a morte de seres humanos, de animais e da vegetação (CARDOSO, 2006).

Os problemas ligados a radioatividade, podem ocasionar efeitos negativos e irreversíveis para a saúde humana, já que podem causar efeitos de longa duração e em diferentes escalas, o que faz com que o meio ambiente necessite de muito tempo para sua recuperação. Deste modo, tanto os seres humanos como o ambiente em que vivem são expostos continuamente a radiações ionizantes oriundas tanto de fontes naturais quanto artificiais (antropogênicas). Este último corresponde aos radionuclídeos gerados a partir das atividades humanas e liberados para o meio ambiente conforme o uso na atividade de fabricação bélica, como as bombas atômicas a partir da operação de centrais nucleares que podem provocar acidentes, como no caso da usina de Chernobyl (SANTOS, 2010).

Por outro lado, as fontes naturais de radiação são oriundas dos raios cósmicos, principalmente do sol e de radionuclídeos originados dos sistemas geológicos. Uma das principais fontes de radiação natural é proveniente do Radônio (de massa 222), que é encontrado nos materiais de construção civil, tanto os agregados como material de cantaria,

mármore, granito, cimento entre os principais, como também nos solos e nas rochas (BELLINTANI; GILI, 2002).

Assim, somos expostos à radiação natural devido quase que exclusivamente pela presença de átomos radioativos no ambiente (AQUINO, 2012).

Desse modo, tanto as rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares emitem radiação e contém urânio e, nesse caso, o urânio acaba emitindo continuamente radônio para o ambiente (FIANCO, 2011). Desse modo, a concentração de radônio é encontrada nas rochas sedimentares e nos solos, principalmente nas rochas bauxita, fosfáticas, bentonita e em sedimentos arenosos (MUJALLI, 2015).

Os radionuclídeos primordiais como urânio, tório e potássio concentram-se principalmente nas rochas ígneas (magma) ácidas, como o granito, o que não acontece nas rochas básicas e ultrabásicas. As rochas sedimentares são caracterizadas pelo seu baixo nível de radioatividade, exceto os arenitos e as rochas fosfáticas que apresentam concentrações significativamente altas de radionuclídeos naturais (AQUINO, 2012).

A identificação dos elementos radionuclídeos citados acima é fundamental, uma vez que, esses elementos são precursores de outros elementos encontrados na sua série de decaimento radioativo, como no caso do elemento altamente cancerígeno o radônio. Além disso os radionuclídeos são distribuídos em diferentes concentrações por toda crosta terrestre, sendo então imprescindível sua identificação e quantificação. Assim, a formação de novas substâncias radioativas se dá em consequência do decaimento de outra substância radioativa previamente existente, como no caso das séries do urânio e tório que podem formar o radônio.

Em relação à série de decaimento do tório, este se dá a partir da presença do elemento químico de ocorrência natural, o tório-232 ( $^{232}\text{Th}$ ). Entre esse elemento até o decaimento para o radônio-220, inclui alguns elementos como: actínio, bismuto, chumbo, polônio e rádio, sendo a série do urânio ou série do rádio ditada a partir do urânio-238. Essa série de decaimentos radioativos é aquela que está no foco dos trabalhos dessa dissertação, em virtude da presença do radônio-222 (BRITO, 2013).

A concentração de radônio varia de acordo com as características locais, variando assim de um lugar para outro. No entanto, em regiões como no Nordeste brasileiro, as concentrações de radônio em ambientes internos e externos não variam muito, devido às influências climáticas (clima quente), assim as residências ficam mais tempo abertas devido ao calor da região, contribuindo para uma menor exposição ao gás (AQUINO, 2012).

A areia enquanto recurso mineral é uma importante fonte de agregados para a construção civil. Constitui-se em depósitos superficiais de vales de rios e depósitos litorâneos

que geralmente não sofreram processo de compactação e são considerados como materiais não consolidados (BROW, 1995).

As areias podem ser caracterizadas como minerais leves ou pesados, sendo este último um mineral de alta densidade, maior que 2,85. Como exemplo de minerais pesados tem-se o ouro, o diamante, os elementos de terras raras que ficam depositados no fundo dos rios, ao contrário dos minerais leves como o quartzo e feldspato que são carreados a partir da dinâmica fluvial (GUERRA, 2008).

O rio Potengi apresenta-se como o terceiro rio mais importante do estado do Rio Grande do Norte (RN) em termos de área e de abastecimento d'água, ficando atrás apenas dos rios Piranhas-Açu e Apodi-Mossoró. Assim, o rio Potengi se destaca por sua localização, cortando vários municípios da Região Metropolitana de Natal (RMN), onde reside a maior população do estado, com isso, seu destaque fica por conta da sua história, por onde se deu a entrada dos colonizadores no estado do então Rio Grande, além de seus diversos usos ao longo do tempo que vão bem além do abastecimento d'água e para a irrigação em áreas rurais, mas como também na exploração das areias depositadas em seu leito, principalmente para o uso na construção civil (FERREIRA NETO, 2015).

O autor Ferreira Neto (2015) aponta ainda que a exploração de areias que atendem ao setor da construção civil se dá em depósitos de natureza aluvionar que compreende a exploração nos leitos ativos dos rios, como em planícies de inundação e em terraços fluviais. E que atualmente os principais locais de exploração de areias para a construção civil da RMN são nos sedimentos aluvionares de idade quaternária das bacias do rio Potengi e do rio Trairi; esses se destacam como um dos principais depósitos de areias aluvionares do estado.

A partir disso, surge a problemática da radiação emanada por elementos naturais de U, Th, K e Rn. A distribuição desses elementos radioativos pode ocasionar em problemas para o ambiente e para as pessoas que estão em contato direto ou indireto com esse mineral arenoso.

Com base nessa contextualização, o estudo foi norteado pelos seguintes questionamentos: Em que medida os níveis de gás radônio, urânio, tório e minerais pesados estão distribuídos nas areias do rio Potengi-RN, usadas na construção civil?

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral foi mapear a concentração do gás radônio, tório e urânio, além dos minerais pesados em areias do rio Potengi, usadas na construção civil.

De modo específico, os objetivos adotados foram:

- a) Verificar níveis de radônio em amostras de areias mediante o uso de câmaras de ionização de eletreto (EIC);
- b) Mapear níveis de radiação natural de urânio, tório e potássio emanada pelas areias do rio mediante medições radiométricas;
- c) Utilizar técnicas de geoprocessamento para cartografar áreas com maior ou menor radiação ao longo do leito seco do rio;
- d) Identificar os principais fatores ambientais associados à presença de elementos radioativos nas areias do rio, especificamente no trecho correspondente ao município de São Gonçalo do Amarante-RN;
- e) Caracterizar os minerais pesados e/ou elementos químicos presentes nos concentrados de amostras de areias.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O escopo da pesquisa baseia-se na radiação ionizante proveniente das fontes naturais, mais especificamente a radiação oriunda das areias, principalmente nos depósitos aluvionares.

A escolha pelos depósitos aluvionares do rio Potengi, no trecho que corresponde às comunidades de Igreja Nova e Jacobina, situadas na zona rural do município de São Gonçalo do Amarante-RN, na RMN, se justifica pelo fato de ser o principal local de extração de areia que atende à demanda da construção civil da grande Natal, partindo da necessidade de se conhecer se o principal material utilizado na construção civil contém minerais radioativos e minerais pesados que possam interferir na saúde da população Natalense usuária deste produto. De tal modo, observa-se que poucos estudos envolvem a mineração de areia em leitos de rio e a radiação natural emitida pelos minerais que constituem esses sedimentos, principalmente a radiação ionizante do radônio que pode contribuir para o desenvolvimento de doenças respiratórias, principalmente o câncer de pulmão (COSTA, 2011).

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco seções. A primeira consiste na introdução do estudo, na qual se contextualizou o tema, o problema e a questão central, seguindo-se dos objetivos, da justificativa da escolha do tema e da estruturação do trabalho.

A segunda refere-se ao referencial teórico do estudo. Nesta seção, foram discutidos os termos principais para a pesquisa, como: a radioatividade e radiação no ambiente; influências do Urânio, Tório e Rádio no ambiente; o gás radônio, suas fontes naturais e efeitos para a saúde humana, além da caracterização de minerais pesados e técnicas utilizadas para identificação.

A terceira tratou da metodologia ou dos materiais e métodos adotados para a realização da investigação, na qual foram apresentadas a caracterização geográfica da área de estudo e etapas da pesquisa, além dos métodos e procedimentos técnicos adotados.

A quarta seção consiste na apresentação e discussão dos principais resultados da pesquisa em relação à construção do mapeamento de gás radônio, tório e urânio e minerais pesados em areias do rio Potengi, usadas na construção civil.

Por fim, na quinta seção, é apresentada a conclusão do estudo em pauta, seguida pelas referências utilizadas.

Como finalização desta dissertação, foi elaborado um artigo científico intitulado “Caracterização da radiação natural das areias do rio Potengi no trecho equivalente ao município de São Gonçalo do Amarante-RN”, submetido para publicação (ANEXO A) na revista Rede: Revista Eletrônica do PRODEMA ISSN 1982-5528, versão on-line, classificada como B2 na área de Ciências Ambientais, o qual está disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br>.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O embasamento teórico da pesquisa em foco serviu para evidenciar aquilo que já foi escrito sobre o tema em estudo, no caso tudo aquilo que está relacionado à radioatividade e radiação no ambiente; Influências do Urânio, Tório e Rádio para o ambiente; sobre o gás radônio, suas principais fontes naturais e seus efeitos na saúde humana, além da caracterização de minerais pesados e as técnicas utilizadas para identificação.

### 2.1 CONCEPÇÕES SOBRE RADIOATIVIDADE E RADIAÇÃO

Antes de discorrer sobre o conceito de radioatividade, vale salientar que em muitos casos os termos radioatividade e radiação são confundidos, mas, para evitar essa confusão, deve se entender que os dois termos são distintos e que os átomos radioativos são aqueles que emitem radiação.

Os estudos sobre radioatividade remontam ao ano de 1896, em que estudiosos como Henri Becquerel pesquisaram sobre a relação entre substâncias fosforescentes e os raios X. Com isso, observou-se que os sais de urânio emitiam um tipo de radiação. Após os estudos de Becquerel, mais tarde o casal Curie (Pierre Curie e Marie Curie) descobriu que outros elementos também emitiam esse tipo de radiação, como o Polônio e o Rádio. Assim, estas descobertas modificaram completamente a ciência emergente da radioatividade. (CHASSOT, 1995).

A radioatividade passa a ser aprimorada nas décadas seguintes pelos pesquisadores Ernest Rutherford e Frederick Soddy que explanaram sobre diversas propriedades da radioatividade e de seus elementos radioativos (MERÇON; QUADRAT, 2004).

Em termos genéricos, como aponta o minidicionário Aurélio (2000), o termo radioatividade significa a propriedade que tem certos átomos de emitir espontaneamente partículas, por efeito de uma instabilidade dos seus núcleos.

Em termos conceituais, a radioatividade é considerada como a alteração espontânea de um tipo de átomo em outro com a emissão de radiação para atingir a estabilidade, assim a radioatividade é uma propriedade de determinados tipos de elementos químicos radioativos emitirem radiações, ou seja, um fenômeno que acontece de forma natural e artificial (BELLINTANI; GILI, 2002).

A instabilidade ou estabilidade do núcleo depende da quantidade de energia que está agregada a ele. Os núcleos instáveis, também chamados de núcleos radioativos, contribuem

significativamente na exposição do homem a fenômenos nucleares. Com isso, quando um núcleo é instável, o mesmo possui energia excedente e, de acordo com o princípio da radioatividade, esse núcleo instável procura liberar o excedente, alcançando um estado menor de energia (AQUINO, 2012). Ou seja, a liberação de energia radioativa acontece a partir da transformação do núcleo instável (desintegração nuclear), onde o núcleo passa a perder partículas alfa, beta e gama.

Corroborando com esta ideia, Bellintani e Gili (2002) destacam que a energia liberada pelos átomos instáveis, radioativos, é denominada de radiação ionizante e existem três tipos dessa radiação emitida pelos átomos radioativos: a radiação alfa, beta e gama.

Em relação às partículas alfa, beta e gama, destacamos que a partícula alfa ( $\alpha$ ) está associada à emissão de um conjunto de partículas positivas, constituídas por dois prótons e dois nêutrons para estabilizar um núcleo com excesso de energia. Essas são mais pesadas que as betas e radiações gama, pelo fato de ter pequeno alcance de penetração podendo até ser barradas por uma simples folha de papel (BARBOSA, 2011).

A partícula Beta ( $\beta$ ) pode ser emitida de todos os tamanhos de núcleos. Quando uma partícula beta é negativa (elétron) significa que o núcleo instável é rico em nêutrons, contudo, quando o núcleo instável é rico em prótons significa que ele emitirá um pósitron, ou seja, uma partícula com mesma massa de elétron, mas carga positiva (BARBOSA, 2011).

Em contrapartida, as radiações gama ( $\gamma$ ) equivalem a raios eletromagnéticos de alta frequência, assim, no núcleo, estes raios são produzidos através do rearranjo das partículas e buscam eliminar o excedente de energia. Os raios gama, por não possuírem massa nem carga, acabam interagindo menos com a matéria, diferentemente do que acontece com as partículas ionizantes. A partir desta característica, os raios gama têm um grande poder de penetração (BARBOSA, 2011).

Todo esse processo de liberação de energia a partir da emissão de partículas ou ondas eletromagnéticas são chamadas de radiação (AQUINO, 2012).

A radiação é definida pela física e significa a propagação de energia de um ponto a outro no espaço ou em meio material. Assim, qualquer radiação pode causar risco à saúde humana, levando em consideração o tempo de exposição e intensidade sobre a mesma (BELLINTANI; GILI, 2002).

As principais fontes de radiação causadas por fontes terrestres são advindas de materiais radioativos distribuídos em solos e rochas. E esses níveis de radiação distinguem-se de lugar para lugar, conforme as diferentes concentrações na crosta terrestre (PETTA; CAMPOS, 2013).

### 2.1.1 Radioatividade no ambiente

Os seres humanos e o ambiente em que vivem são expostos continuamente a radiações ionizantes oriundas tanto de fontes naturais, quanto artificiais (antropogênicas). Este último corresponde aos radionuclídeos gerados a partir das atividades humanas e liberados para o meio ambiente conforme o uso na atividade de fabricação bélica, como as bombas atômicas e conforme operação de centrais nucleares que podem provocar acidentes, como no caso da usina de Chernobyl (SANTOS, 2010).

Por outro lado, as fontes naturais de radiação são oriundas dos raios cósmicos, principalmente do sol e de radionuclídeos originados dos sistemas geológicos.

Para Eisenbud e Gesell (1997), a radiação por fontes naturais se dá de três formas de acordo com sua origem: cosmogênicos, primordiais e secundários. A primeira é gerada a partir dos raios cósmicos com núcleos estáveis, gerados na estratosfera e troposfera e caracterizados como de meia vida curta, emissores de energia beta de pequena energia. Os radionuclídeos primordiais são ligados à própria formação e origem da terra, ou seja, aqueles provenientes da crosta terrestre, e existem até os dias atuais, uma vez que possuem isótopos radioativos com meia vida longa, como no caso dos elementos Potássio ( $^{40}\text{K}$ ) e Rúbido ( $^{87}\text{Rb}$ ), além dos elementos importantes ambientalmente como os da série radioativa do Urânio (U) e Tório (Th); todos esses elementos são encontrados principalmente nas rochas e solos. Por último, os radionuclídeos secundários são aqueles provenientes dos produtos e decaimento do Urânio e Tório, sendo eles importante elemento natural causador de impactos radiológicos.

Os radionuclídeos primordiais como Urânio, Tório e Potássio concentram-se principalmente nas rochas ígneas (Magmáticas) ácidas, como o granito, o que não acontece nas rochas básicas e ultrabásicas. Já as rochas sedimentares são caracterizadas pelo seu baixo nível de radioatividade, exceto os arenitos e as rochas fosfáticas que apresentam concentrações significativamente altas de radionuclídeos naturais.

A relação em percentual entre a radiação natural e artificial corresponde a 81% da dose anual de radiação recebida pela população como oriunda de fontes naturais de radiação e os outros 19% de fontes artificiais (BELLINTANI; GILI, 2002). Desse modo, pode-se observar que os radionuclídeos (cosmogênicos, primordiais e secundários) são os principais responsáveis pela maior parcela da dose recebida pelo homem decorrente da radiação natural

A United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) aponta que a dose efetiva anual média resultante de fontes naturais seja de 2,40

mSv, sendo que 85% deste valor é atribuído aos radionuclídeos primordiais: 14% atribuídos ao K-40, 17% resultante das séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  (exceto o radônio) e 54% devido à exposição ao radônio (UNSCEAR, 2000).

### 2.1.2 Influências do Urânio, Tório e Rádio no ambiente

O urânio é um elemento químico instável conforme suas propriedades nucleares, foi descoberto por Klaproth em 1789 na Alemanha, e é conhecido principalmente por sua radioatividade. Na época, o urânio ainda não era visto como um vilão, ou seja, como algo perigoso. Mas, a partir da observação de uma amostra de  $\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2$  em uma chapa fotográfica, Henry Becquerel descobriu a radioatividade deste elemento, constatando que a radiação advinda do sal de urânio havia criado uma imagem na lâmina.

Destacamos ainda que o urânio, em sua forma natural, não apresenta um índice de alta radiação, mas seus isótopos sim, com destaque para seus dois isótopos naturais  $\text{U}^{238}$  e  $\text{U}^{235}$ . A nomenclatura urânio deriva do planeta Urano e é o último elemento natural da tabela periódica, com número atômico 92 e massa de 238,03, pertencente à família dos metais de transição interna, ou seja, grupo dos actinídeos.

Na natureza, o urânio é disposto na crosta terrestre com concentrações que variam de 0,008 a 8,2 ppm, e é encontrado principalmente em rochas e minérios como em areia monazítica, águas salgadas e doces (CAMARGO, 1994).

O tório é um elemento (metal) da família dos actinídeos e pertence ao grupo 3B da tabela periódica, possui número atômico igual a 90. Este elemento foi descoberto por volta de 1828 pelo sueco Jöns Jacob Berzelius, que analisou um óxido, chamado por ele de "tória" em homenagem ao deus do trovão "Thor". Possui apenas um isótopo primordial presente na natureza, o tório de massa atômica 232. No entanto, esse isótopo corresponde a 100% de abundância, sendo assim quatro vezes mais abundante que o urânio.

Assim, o tório é encontrado em pequenas quantidades na maioria das rochas e solos, além disso é facilmente solúvel em água e não evapora do solo ou da água para a atmosfera (CAMARGO, 1994).

A partir do exposto, é importante estudar o tório, já que ele transmite o  $^{220}\text{Rn}$  (torônio), através da série de decaimento radioativo natural do tório ( $^{232}\text{Th}$ ). Portanto, solos contendo uma quantidade razoável de tório irão produzir também uma quantidade considerável de torônio, que é um isótopo do radônio. É importante destacar ainda que, sob o ponto de vista da proteção radiológica, o torônio não assume grande relevância, uma vez que

sua meia-vida curta de aproximadamente 55 segundos limita sua trajetória do solo para os ambientes de convívio humano (LARA, 2013).

Santos (2010) destaca ainda que os ambientes ricos em matéria orgânica atuam como um forte ligante para o urânio e o tório.

Outro destaque é que o urânio e o tório são fontes de isótopos naturais para o rádio (Ra) e são encontrados principalmente em rochas e minerais que contém esses elementos (LARA, 2013). A autora destaca ainda que o urânio e o tório presentes em rochas ígneas estão associados, principalmente, a minerais radioativos; já as rochas sedimentares possuem maior concentração de U e Th.

O rádio é um metal alcalino terroso, pertence ao grupo 2<sup>a</sup> e tem uma maior mobilidade no meio ambiente em relação ao urânio e o tório. Além disso, os processos geoquímicos ligados ao rádio estão intimamente relacionados ao radônio, uma vez que o <sup>222</sup>Rn é originado a partir do decaimento do <sup>226</sup>Ra.

Estudar sobre esses três elementos é de fundamental importância, uma vez que o urânio, tório e rádio são os precursores do radônio na série de decaimento do U, estando distribuídos em diferentes concentrações na crosta terrestre. Essa variação nas concentrações se dá, principalmente, de acordo com as interferências físicas ocorridas no ambiente e tipo de rocha e solo da região, como aponta Cavalcanti Neto; Rocha da Rocha (2010, p. 137):

Alguns dos principais contribuintes da exposição radioativa natural para o ser humano são os elementos naturais radioativos, conhecidos como isótopos radioativos, presentes em rochas, solos, água, atmosfera e nos organismos vivos, conforme atestado pela UNSCEAR (2000). Eles fazem parte das séries radioativas do Potássio (<sup>40</sup>K), Urânio (<sup>238</sup>U), Tório (<sup>232</sup>Th) e de outros elementos.

Em relação à série de decaimento do tório, este se dá a partir da presença do elemento químico de ocorrência natural, o tório-232 (<sup>232</sup>Th). Entre o tório-232 até o decaimento para o radônio-220, inclui alguns elementos como: actínio, bismuto, chumbo, polônio e rádio. Contudo, a série do urânio ou série do rádio é ditada a partir do urânio-238. Essa série de decaimentos radioativos é aquela que está no foco dos trabalhos dessa dissertação, em virtude da presença do radônio-222 (BRITO, 2013).

Desse modo, verifica-se que a formação de novas substâncias radioativas se dá em consequência do decaimento de outra substância radioativa previamente existente, como no caso das séries do urânio e tório que podem formar o radônio.

## 2.2 O GÁS RADÔNIO

O radônio é um gás naturalmente radioativo, presente em todo tipo de ambiente e gerado principalmente nos solos que estão enriquecidos por urânio, tório e rádio. É um gás inerte, o que implica que ele não reage ou combina com outros elementos. O radônio é um elemento químico de símbolo Rn e de número atômico igual a 86 (86 prótons e 86 elétrons), com massa atômica de 222,02 g/mol, e pertence à família dos gases nobres (AFONSO, 2004).

Foi descoberto em 1901 por Ernest Rutherford, o qual determinou através de um experimento a massa molar da “emancipação do rádio”, sendo então considerado o primeiro experimento com isolamento do radônio. Recebe esse nome por ter sido descoberto a partir do ar que circundava os raios de rádio, sendo chamado então de emancipação de rádio. Mas foi a partir de Willian Ramsay e Robert Whyttaw-Gray que se experimentou o isolamento do radônio em quantidades visíveis. Por volta de 1910, esses estudiosos verificaram que o radônio era o gás mais denso até então conhecido, com massa molar já citada (AFONSO, 2004).

O radônio corresponde ao isótopo  $^{222}\text{Rn}$  e apresenta três isótopos de curta duração e o de meia vida mais longo de 3,823 dias. Os isótopos derivados do urânio que dá origem ao rádio e conseqüentemente ao radônio, é um importante emissor alfa, e se desintegram emitindo uma partícula alfa. Com isso, o radônio permanece por mais tempo em suspensão no ar atmosférico e, uma vez inalado, pode facilmente se depositar nas vias aéreas e no pulmão (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2013).

Ao se desintegrar, o radônio-222 decai para o polônio-218, que é outro importante emissor alfa, ou seja, o polônio-218 que se desintegra emitindo também partícula alfa (BRITO, 2013).

Por ser um gás, o radônio pode ser encontrado no ambiente humano, através do solo, mananciais, construções. Vale destacar que muitas águas minerais e termais contêm grandes concentrações de radônio, ou seja, as águas subterrâneas contêm mais radônio do que as superficiais por estar em um ambiente confinado, o que facilita a reposição pelo decaimento do rádio (COLE, 1993).

Deste modo, o radônio, por ser um gás radioativo presente em solos e rochas, sobe até a superfície através de suas fissuras. No entanto, como é mais denso do que o ar, o radônio tende a se concentrar nas camadas mais baixas da atmosfera, ou seja, acaba depositando seus produtos sobre a biosfera, onde está a vegetação, os cursos d'água e no próprio solo (BROWN et al, 1987).

### 2.2.1 Efeitos do radônio nos seres humanos

A desintegração do radônio gera partículas radioativas do tipo alfa, que permanecem no ar podendo ser inaladas e depositadas no epitélio das vias aéreas. Essas partículas provocam danos ao DNA e pode agravar a saúde do indivíduo exposto, chegando a ocasionar câncer de pulmão (BELLINTANI; GILI, 2002).

Dessa forma, o radônio é um inimigo invisível, de maior fonte de radioatividade natural. Conforme estudos da World Health Organization (WHO), o radônio é o segundo maior causador de câncer de pulmão, depois do tabagismo nos Estados Unidos (EUA).

Vale destacar que o radônio apresenta pouco poder de penetração e que não é capaz de penetrar o tecido da pele humana. No entanto, pode ser inalado e, ao ser inalado e por ter essa incapacidade de penetração na pele, ele também não consegue sair do corpo humano, ficando depositado no epitélio das vias aéreas até os pulmões, o que acarreta inúmeros prejuízos para a saúde, como o câncer pulmonar (PETTA; CAMPOS, 2013).

Ainda de acordo com World Health Organization (2009; 2011) em referência aos casos de morte por câncer de pulmão, de 3 a 14% está ligada diretamente à exposição ao gás radônio.

Alguns autores alertam ainda que, dentro das residências, o gás vai se alojar em locais fechados e que ali irão se acumular até ser inalado pelas pessoas deste ambiente que acabarão contraindo doenças cancerígenas. Salienta-se ainda que o gás radônio é encontrado em todas as construções que estão em contato com o solo e em regiões de rochas graníticas, além de serem transportados até as casas pelos materiais utilizados na construção civil (PETTA; CAMPOS, 2013).

Assim, países como os EUA, Canadá, Rússia, Bélgica, Austrália, dentre outros, já alertam a população sobre os perigos que o radônio ocasiona e apontam algumas medidas para mitigar a concentração de radônio no ambiente de convívio humano, para que não exceda os limites estabelecidos pela USEPA que é de 150 Bq/m<sup>3</sup> no ar e de 11 Bq/L na água (COLE, 1993).

Contudo, o Brasil ainda está muito longe dos países desenvolvidos, onde encontramos apenas uma legislação que trata sobre a radioatividade da água, conforme Portaria MS n° 2.914 do Ministério da Saúde, que dispõe sobre o controle e qualidade das águas e aponta os valores de referência para radioatividade nas águas que é de 0,1 Bq/L (BRASIL, 2011).

De acordo com a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA), a concentração aceitável de radônio em ambientes abertos deve ser na ordem de intervalos que

variam entre 0,4 a aproximadamente 1,3 pCi/L e em ambientes fechados/interno como casas, prédios, escolas, dentre outros, devem ser na ordem de no máximo 4,0 pCi/L (OSHA, 2010).

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos visando chamar a atenção para o tema ligados aos efeitos do radônio no ambiente e nos seres humanos, como o trabalho de Petta e Campos (2013), que apresentam que algumas regulamentações que vêm sendo estudadas para restringir os riscos associados à exposição ao radônio. Indicam que muito se tem a avançar nessa área da radioproteção, mas que já existem alguns encontros, mesmo que de forma tímida, como no caso do Instituto de Radioproteção e Dosimetria e a Sociedade Brasileira de Biociências, que já vêm discutindo temas ligados ao monitoramento dos materiais e ao desenvolvimento de técnicas de medição do radônio e a relação com a exposição dos indivíduos.

### 2.3 SOLOS ARENOSOS E AGREGADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Entende-se geralmente por recursos minerais as substâncias inorgânicas extraídas da terra, utilizadas como matéria-prima pelos seres humanos; dentre esses materiais estão areia, argila, saibro, calcário (TEIXEIRA, 2009).

As areias são normalmente extraídas de depósitos recentes e sub-recentes de canais e terraços fluviais. Em determinadas situações, a exploração econômica pode ser precedida de uma definição de suas características físicas, como granulometria, morfoscopia dos corpos sedimentares, assim como a geometria das partículas, e química (BROWN, 1995).

Dessa forma, tratamos a areia como uma substância mineral de desagregação de diversos tipos de rochas encontradas em vários tipos de depósitos, como aluviões, coluviões e eluviões. São constituídas, essencialmente, de grãos de quartzo com arredondamento e esfericidade variados, podendo ainda conter, em diversas proporções, grãos de minerais óxidos e ricos em sílica (BROWN, 1995).

De acordo com o novo dicionário Geológico-Geomorfológico, as areias são grãos de quartzo resultante da desagregação ou decomposição das rochas que contém a sílica. Tais grãos são transportados pelos rios, mares e ventos e com isso recebem certo polimento (GUERRA, 2008).

Ainda conforme Brown (1995), além das areias serem formadas pelo quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), dependendo da composição da rocha base (originária), pode agregar outros minerais como: feldspato, mica, zircão, magnetita, ilmenita, monazita, cassiterita, entre outros. Cita ainda que a areia é o produto da desintegração mecânica através de agentes exteriores sobre rochas que

emergiram. As ações das intempéries, sejam da ordem física, química ou biológica, provocam desgastes nas rochas ao longo do tempo, transformando-as em pedregulhos e areias, solos de partículas grossas, siltes, partículas intermediárias e argilas.

Referente ao meio transportador, a areia pode ser classificada como solo sedimentar (ou alóctone), ou seja, que é transportado. Quando transportado pela água recebe o nome de aluvionares, quando o meio transportador é a gravidade, dá-se o nome coluvionares, e designados por eólicos quando são transportados pelo vento (BROWN, 1995).

As areias utilizadas na construção são retiradas principalmente de depósitos sedimentares que se formam nos leitos dos rios. Sua extração é realizada por dragas de sucção, que bombeiam a água para lagoas de decantação, de onde o material é retirado por pás carregadeiras ou pelo sistema braçal e distribuído para o mercado consumidor.

### **2.3.1 Atividade de exploração mineral e suas regulamentações**

No Brasil, o setor da mineração, de um modo geral, está submetido a um conjunto de regulamentações, conforme determinado pelos três níveis de poder estatal (federal, estadual e municipal) que possuem atribuições específicas em relação à atividade mineral e o meio ambiente (BRASIL, 2012).

Sendo tais recursos bens da União, a exploração, o aproveitamento dos mesmos, que são a essência das atividades de mineração, se dá por outorga dos direitos minerários em distintos regimes legais. Em nível federal, o principal órgão responsável pela outorga dos direitos minerários é o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Ainda nesse nível, existem diferentes órgãos como o Ministério de Meio Ambiente (MMA), o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) que têm a responsabilidade de definir as diretrizes e regulamentações, bem como atuar na concessão, fiscalização e cumprimento da legislação mineral e ambiental para o aproveitamento dos recursos minerais. Além de mecanismos legais para controle de atividades consideradas de impacto ou que sejam poluidoras (como licenciamento ambiental e avaliação de impacto ambiental, plano de controle ambiental, recuperação de áreas degradadas), existem mecanismos econômicos como incentivos e técnicos para apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias (BRASIL, 2012).

As atividades ligadas à mineração são regulamentadas por normas e leis estruturadas a partir da Constituição Federal, que estabelecem as condições, deveres e direitos tanto para a administração quanto para os mineradores.

De tal modo, a legislação inclui ainda, além dos aspectos trazidos pela Constituição, o Código de Mineração regido pelo decreto lei 227, de 27/02/67, e o Código das Águas regido pelo decreto lei 7.841 de 8/08/45, bem como um vasto conjunto de leis, decretos, portarias e instruções normativas interministeriais, do diretor-geral do DNPM e do Ministro de Minas e Energia, além da igualmente vasta e complexa legislação ambiental (BRASIL, 2004).

Assim, a Constituição Federal de 1988 aborda, no seu artigo 20, inciso IX, que são bens da união os recursos minerais, inclusive o subsolo e que compete privativamente a união (art. 22, inciso XII) legislar sobre as jazidas, minas, outros recursos minerais e metalurgia. Em relação ao meio ambiente, destacamos o artigo 225, o qual afirma:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988).

O documento destaca ainda no parágrafo 2º do referido artigo que:

Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei (BRASIL, 1988).

O código de mineração é o principal documento legal que rege a atividade mineral do Brasil. Desse modo, é de fundamental importância dispor sobre alguns de seus artigos que envolvem a atividade de mineração e especificamente a extração de areia. Traz em seu 1º artigo que:

Compete à União administrar os recursos minerais, a indústria de produção mineral e a distribuição, o comércio e o consumo de produtos minerais (BRASIL, 1967).

No artigo 2º, os regimes de aproveitamento das substâncias minerais, são:

I – regime de concessão, quando depender de portaria de concessão do Ministro de Estado de Minas e Energia; II – regime de autorização, quando depender de expedição de alvará de autorização do Diretor-Geral do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM; III – regime de licenciamento, quando depender de licença expedida em obediência a regulamentos administrativos locais e de registro da licença no Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM; IV – regime de permissão de lavra garimpeira, quando depender de portaria de permissão do Diretor-Geral do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM; V

– regime de monopolização, quando, em virtude de lei especial, depender de execução direta ou indireta do Governo Federal (BRASIL, 1967).

O art. 3º aponta que este código regula: I) os direitos sobre as massas individualizadas de substâncias minerais ou fósseis, encontradas na superfície ou no interior da terra, formando os recursos minerais do País; II) o regime de seu aproveitamento; e III) a fiscalização, pelo Governo Federal, da pesquisa, da lavra e de outros aspectos da indústria mineral (BRASIL, 1967).

A lei 6.567 de 24 de setembro de 1978 dispõe que

O regime especial para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais que especifica e dá outras providências. Nesse caso especifica no seu artigo primeiro que poderão ser aproveitados pelo regime de licenciamento, ou de autorização e concessão na forma da lei: I – areias, cascalhos e saibros para utilização imediata na construção civil, no preparo de agregados e argamassas, desde que não sejam submetidos a processo industrial de beneficiamento, nem se destinem como matéria-prima à indústria de transformação; II – rochas e outras substâncias minerais, quando aparelhadas para paralelepípedos, guias, sarjetas, moirões e afins; III – argilas usadas no fabrico de cerâmica vermelha; IV – rochas, quando britadas para uso imediato na construção civil e os calcários empregados como corretivo de solo na agricultura (BRASIL, 1978).

A partir do exposto, o licenciamento ambiental é fundamental para o desenvolvimento das atividades de exploração mineral. Como visto na legislação, o licenciamento depende da obtenção, pelo interessado, de licença específica, expedida pela autoridade administrativa local, no município de situação da jazida, e da efetivação do competente registro no Departamento Nacional da Produção Mineral (BRASIL, 1978).

Vale destacar que, para obtenção da licença para exploração, junto ao DNPM, os empreendimentos minerários precisam apresentar a licença ambiental, a ser obtida junto aos órgãos das esferas estadual e municipal.

Desse modo, o licenciamento ambiental no Brasil aparece como um dos instrumentos da política nacional do meio ambiente, ou seja, o licenciamento deve ser atribuído a todas as atividades efetivamente ou potencialmente poluidoras (SANCHES, 2008).

No estado do RN, a gestão ambiental do território potiguar é desenvolvida pelo Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente (IDEMA). Assim, cabe ao IDEMA proceder com o licenciamento ambiental das mais diversas atividades desenvolvidas no estado tais como: Carcinicultura, Energia Eólica, Salinas, Mineração, Fruticultura etc.

### 2.3.2 Legislação específica sobre mineração de areias no RN

Em relação às atividades de extração de areia, observamos, a partir da lei 6.567, que, para o desenvolvimento desta atividade, se faz necessária a adoção do regime de licenciamento, ou de autorização e de concessão (BRASIL, 1978).

No Rio Grande do Norte, a atividade de mineração ganha destaque no cenário econômico, uma vez que o estado possui uma diversidade de bens minerais, destacando-se, principalmente, no cenário Nordeste. Dentre os principais minérios explorados no estado, podemos destacar: areia, argila, feldspato, caulim, mica, calcário, rochas ornamentais, scheelita, tantalita e o ferro (PFALTZGRAFF, 2010).

Com isso, destacamos a crescente exploração de areia, principalmente para o uso na construção civil, uma vez que o estado recebe atualmente investimentos para implantação de políticas habitacionais, bem como a crescente instalação de parques eólicos em regiões serranas e litorâneas do estado. Essas atividades necessitam deste bem mineral como matéria prima para sua implantação.

A extração de areia no estado se dá principalmente nos leitos dos rios, uma vez que são locais onde há uma maior concentração de sedimentos que são transportados e depositados pelos rios em períodos de cheias (OLIVEIRA; MELLO, 2007). Esse mineral de origem aluvionar é bastante procurado pela indústria da construção civil. No Rio Grande do Norte, esse material arenoso é explorado principalmente nos depósitos aluvionares das principais bacias hidrográficas do estado, como as bacias hidrográficas do litoral oriental (rio Curimataú, rio Trairi, Jacu, Potengi etc) e nas bacias dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu.

Deste modo, a resolução nº 04/2006 do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONEMA)

Estabelece parâmetros e critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor/degradador, dos empreendimentos e atividades efetiva ou potencialmente poluidores (RIO GRANDE DO NORTE, 2006).

A resolução CONEMA citada (RIO GRANDE DO NORTE, 2006) estabelece ainda parâmetros, porte e o potencial poluidor das atividades de extração e pesquisa mineral. A extração de areia pode ser tomada como de porte micro (até 10 hectares, com volume de até 1.000 m<sup>3</sup>/mês); pequeno (maior que 10 a menor ou igual a 40 hectares, com volume de até 1.500 m<sup>3</sup>/mês); médio (maior que 40 e menor ou igual a 70 hectares, com volume de extração de até 2.000m<sup>3</sup>/mês); grande (de 70 a 100 hectares, com volume de extração entre 2.000 a

2.500m<sup>3</sup>/mês) e excepcional (acima de 100 hectares, com volume de extração maior que 2.500m<sup>3</sup>/mês).

Em relação ao potencial poluidor da atividade de mineração de areia, este é definido a partir da junção entre a área (em hectares) e o volume extraído por mês (em m<sup>3</sup>/mês), assim podem ser de pequeno potencial poluidor degradador para pequenas áreas, com volume de extração baixa, médio para áreas e volumes um pouco maiores e de grande potencial para as grandes áreas e volumes de extração acima de 2.000m<sup>3</sup>/mês.

A partir dessas diretrizes, vale ressaltar que aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei (BRASIL, 1988).

## 2.4 MINERAIS PESADOS

Os grãos de areia são considerados minerais pesados. Sua origem se dá em diferentes tipos de rochas magmáticas e metamórficas e assim são denominados pelo fato de possuir densidade superior à do quartzo e do feldspato.

De acordo com o novo dicionário geológico-geomorfológico, os minerais pesados são minerais com alta densidade, maior que 2,85, que chegam a afundar no bromofórmio líquido utilizado em técnicas de separação de minerais. Como exemplo, cita o ouro e o diamante que depositam nos ambientes fluviais por possuir alta densidade, ao contrário dos minerais leves como o quartzo e feldspato que são carreados a partir da dinâmica fluvial (GUERRA, 2008).

Em geral, esses minerais são encontrados em pequenas percentagens nos sedimentos, assim sua presença pode indicar a origem e dinâmica de um determinado sedimento. Existem alguns procedimentos laboratoriais para identificação dos minerais pesados (SILVA, 1999).

Os estudos iniciais sobre minerais pesados foram por volta do final do século XIX e, até o início do século XX, a composição mineralógica era feita por meio da separação qualitativa do sedimento (SILVA, 1999).

Os Elementos Terras Raras (ETR), também considerados como minerais pesados, correspondem a um grupo de 17 (dezessete) elementos pertencentes à família dos lantanídeos (número atômico entre 57 a 71, do grupo IIIB da tabela periódica). Os ETR são encontrados principalmente nos minerais do grupo do bastnaesita, monazita, argilas iônicas e xenotímio (ANDRADE, 2014).

As maiores reservas de terras raras bastnaesita estão na China. Já no Brasil, o ETR ocorre na monazita em areias de paleopraias, junto com outros minerais pesados como a

ilmenita, zirconita e o rutilo; suas principais ocorrências se dão na região Sul e Sudeste do país, principalmente nos estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Suas principais aplicações estão para composição de ímãs permanentes para motores miniaturizados e turbinas para a energia eólica, além da composição e polimentos de vidros e lentes especiais, catalisadores de automóveis, refino de petróleo, luminóforos para tubos catódicos de televisores em cores e telas planas de televisores e monitores de computadores, ressonância magnética nuclear, cristais geradores de laser, supercondutores e absorvedores de hidrogênio, armas de precisão (ANDRADE, 2014).

#### **2.4.1 Técnicas de caracterização de minerais por meio de EDX, MEV/EDS**

A técnica de detecção de Energia Dispersiva por Raio-X (EDX) caracteriza elementos com número atômico superior a 11, a partir da emissão de um feixe de elétrons sobre um mineral (amostra), em que ocorre a excitação dos elétrons mais externos dos átomos e dos íons, fazendo com que os níveis energéticos modifiquem e retornem à posição inicial, liberando uma energia adquirida, emitida em comprimento de onda no espectro de raios-X (NEUMANN et al, 2004). Deste modo, a identificação da composição química por EDX é feita de forma semiquantitativa.

Outra técnica responsável por identificar a composição química é a Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) que se apresenta como um acessório importante para a caracterização microscópica de minerais e materiais, permitindo a determinação de elementos químicos de forma pontual (área do grão) analisado. Seu funcionamento se dá de forma parecida com o do EDX (NEUMANN et al, 2004).

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) aponta também como um equipamento fundamental na caracterização morfológica de minerais e materiais. Seu funcionamento se dá de forma parecida com o microscópio ótico, exceto que utiliza elétrons em vez de luz, além de possuir lentes magnéticas para focalizar o feixe e produzir imagens ampliadas; o procedimento se dá a partir da interação de um feixe de elétrons e o espécimen, esse feixe na ordem de 5-50 KeV varre uma superfície do espécimen, por meio de bobinas eletromagnéticas. Assim, o feixe gerado passa por lentes condensadoras que reduzem o seu diâmetro e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra (DIAMANTINO; NICOLAU, 2011). Com isso, fornece imagens em níveis de cinza proporcionadas pela interação entre o feixe com a superfície da amostra.

A aplicação do MEV com EDS acoplado é importante na contribuição para caracterização de minerais, já que o MEV proporciona a amplitude e nitidez de imagens e o EDS permite a identificação do mineral e mapeamento da distribuição de elementos químicos para cada mineral (NEUMANN et al, 2004).

### 3 METODOLOGIA GERAL

Esta seção apresenta informações acerca da área de estudo e está estruturada de forma a delimitar e caracterizar a área definida como recorte espacial de estudo, principalmente, no tocante à localização, geologia, vegetação, hidrografia e aspectos sociais.

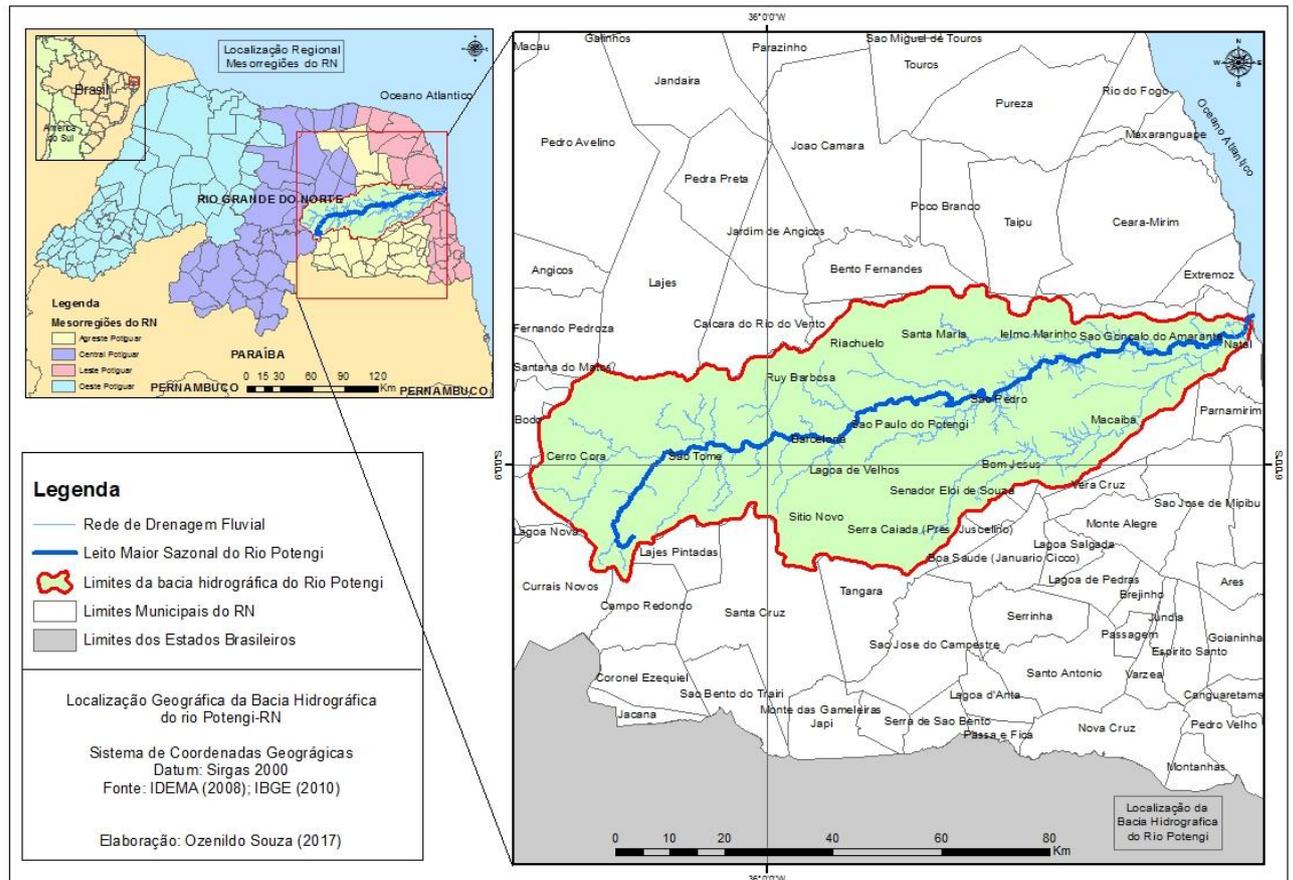
#### 3.1 DELIMITAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O rio Potengi, área objeto de estudo, é o principal rio da bacia hidrográfica homônima. Esta bacia está localizada no Estado do Rio Grande do Norte (RN), especificamente em três mesorregiões (Central, Agreste e Leste Potiguar), contemplando as microrregiões Serra de Santana, Borborema Potiguar, Agreste Potiguar, Macaíba e Natal, numa área total equivalente a 410 hectares, a qual ocupa parte dos municípios de Cerro Corá, Lajes Pintadas, São Tomé, Sítio Novo, Serra Caiada, Lagoa de Velhos, Barcelona, Ruy Barbosa, Riachuelo, São Paulo do Potengi, São Pedro, Santa Maria, Senador Elói de Souza, Bom Jesus, Ielmo Marinho, Macaíba, São Gonçalo do Amarante e Natal.

A bacia hidrográfica do rio Potengi faz parte de um complexo cinco bacias hidrográficas orientadas para o litoral oriental: as bacias dos rios Ceará-Mirim, Potengi, Trairi, Jacu e Curimataú.

Abordando particularmente o rio Potengi (leito maior sazonal), este tem uma extensão de aproximadamente 176 km desde a sua nascente na serra de Santana, na mesorregião Central Potiguar, aproximadamente no município de Cerro Corá, até sua foz na cidade de Natal na mesorregião Leste Potiguar. Assim, o rio corta diversos municípios como Cerro Corá (nascente), passando por São Tomé, São Paulo do Potengi, Ielmo Marinho, São Gonçalo do Amarante, Macaíba, até desaguar em seu estuário já no município de Natal (Mapa 1).

Mapa 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Potengi-RN



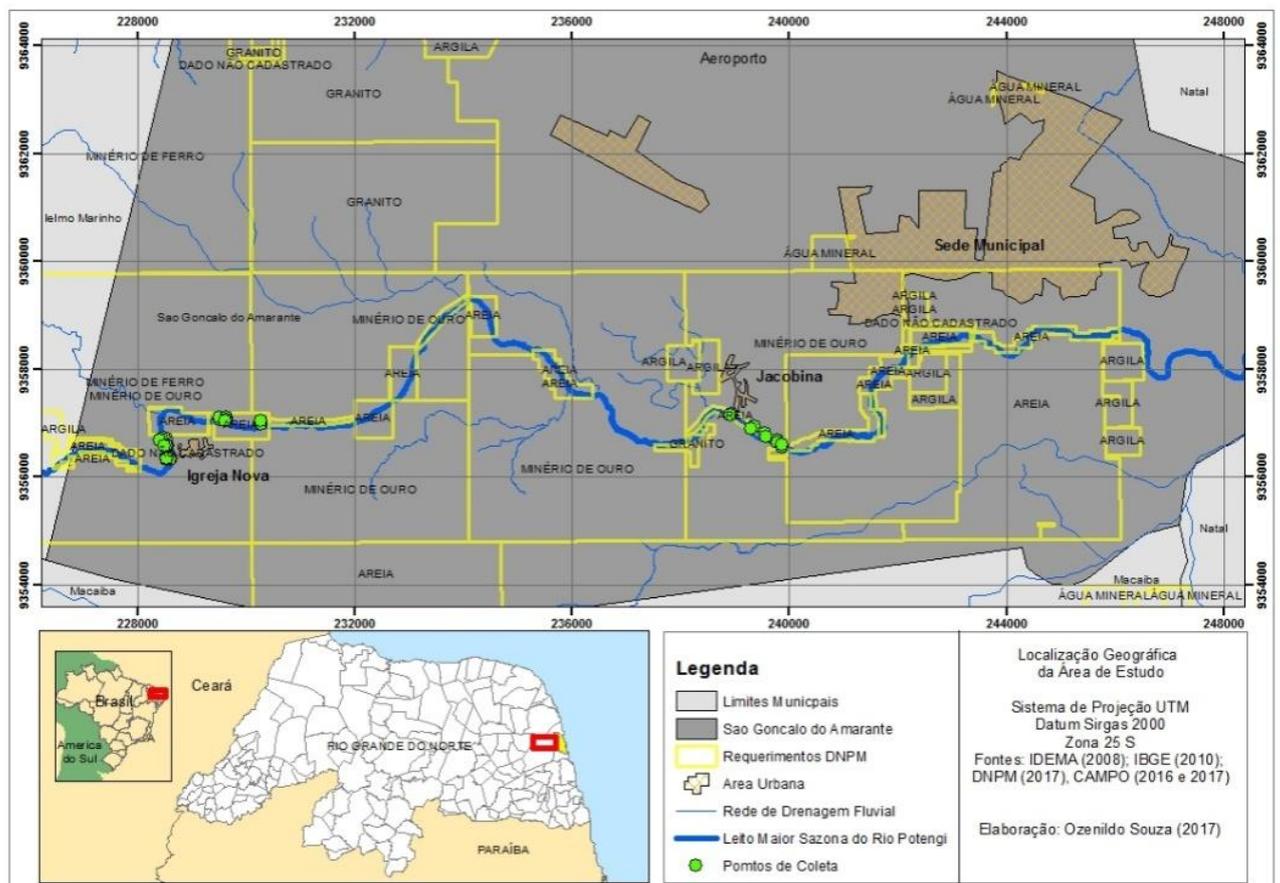
Fonte: Autoria própria (2017)

O rio Potengi apresenta-se como o terceiro rio mais importante do estado do RN em termos de área e de abastecimento d'água, ficando atrás dos rios Piranhas-Açu e Apodi-Mossoró. Assim, o rio Potengi se destaca por sua localização, cortando vários municípios da Região Metropolitana de Natal (RMN), ou seja, região mais populosa do estado. Seu destaque fica por conta da sua história, por onde se deu a entrada dos colonizadores do estado do então Rio Grande, além de seus diversos usos ao longo do tempo que não se restringem apenas ao abastecimento d'água e irrigação em áreas rurais, mas também a exploração das areias depositadas em seu leito, principalmente para o uso na construção civil (FERREIRA NETO, 2015).

A exploração de areias que atendem ao setor da construção civil se dá em depósitos de natureza aluvionar que compreende a exploração nos leitos ativos dos rios, como em planícies de inundação e em terraços fluviais. Atualmente, os principais locais de exploração de areias para a construção civil da RMN são nos sedimentos aluvionares de idade quaternária das bacias do rio Potengi e do rio Trairi; esses se destacam como um dos principais depósitos de areias aluvionares do estado (FERREIRA NETO, 2015).

A extração das areias no rio Potengi se dá nos municípios próximos da área consumidora, ou seja, nas proximidades da RMN, principalmente nos municípios de Ilmo Marinho e São Gonçalo do Amarante. Este último se destaca nesse tipo de extração por se tratar de um município com maior extensão territorial da RMN e pela presença de grande número de requerimento no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) para exploração mineral, dentre eles: a areia, o ouro, granito, argila e minério de ferro, com destaque para o número de requerimentos para exploração de areia no leito do rio Potengi (Mapa 2).

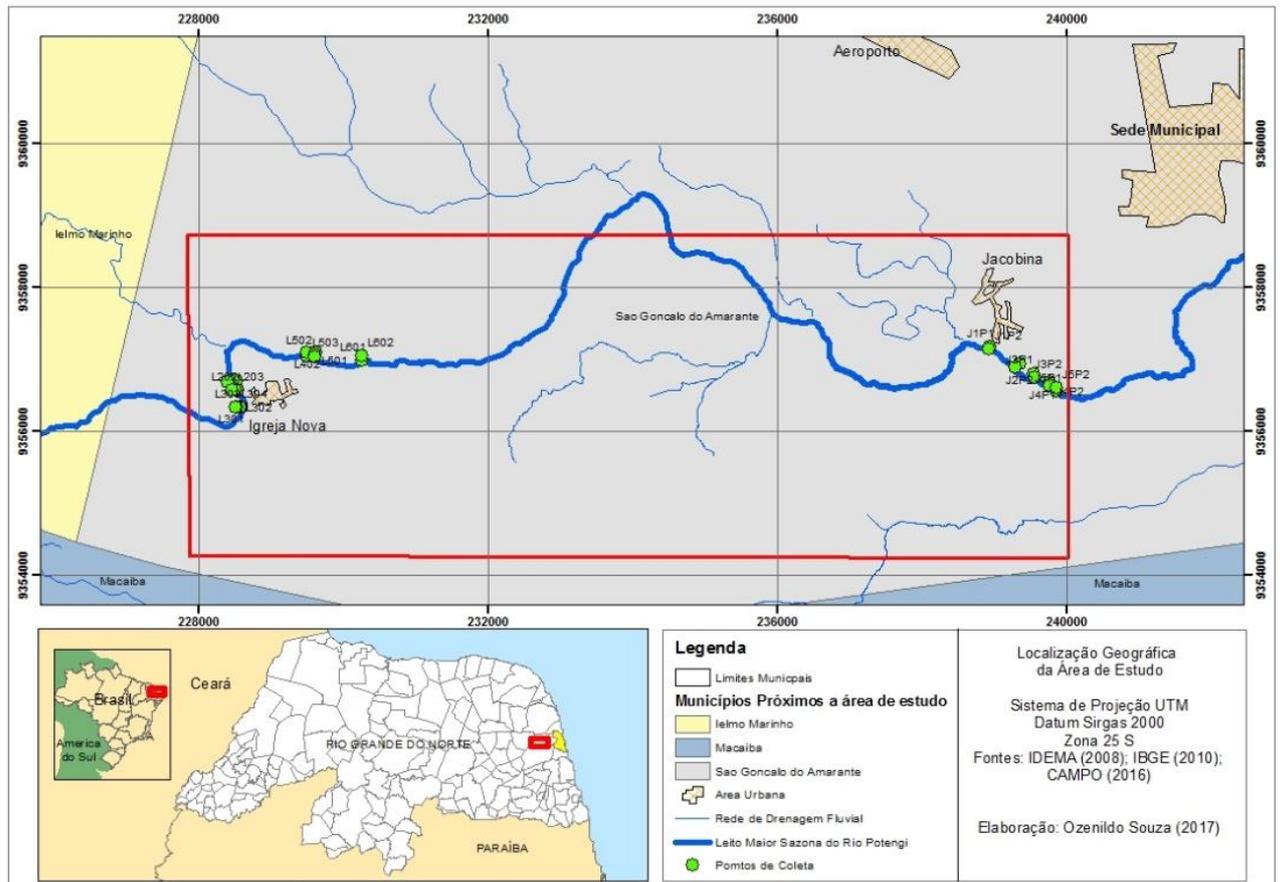
Mapa 2 – Distribuição dos processos minerais do ano de 2017 no município de São Gonçalo do Amarante-RN



Fonte: Autoria própria (2017)

A partir da identificação das áreas com maior requerimento para exploração de areia foi definido um recorte espacial de análise, considerando uma das regiões que apresentam um histórico de exploração de areias no leito do rio Potengi, como no caso da localidade Igreja Nova e Jacobina, localizadas na zona rural do município de São Gonçalo do Amarante-RN (Mapa 3).

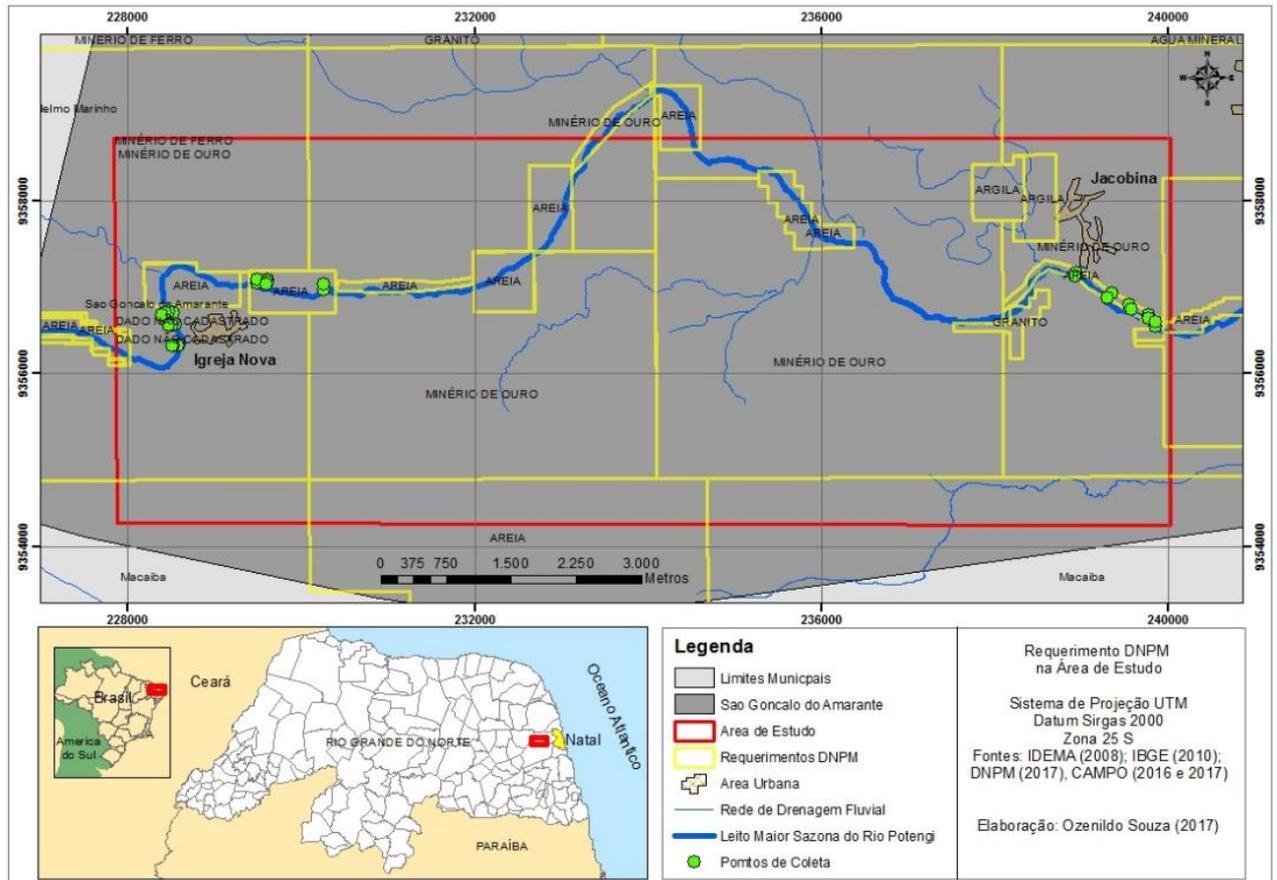
Mapa 3 – Localização da área de estudo no município de São Gonçalo do Amarante-RN



Fonte: Autoria própria (2017)

Na área definida como recorte espacial encontram-se 18 (dezoito) requerimentos de processos junto ao DNPM, sendo o maior destaque de 10 (dez) requerimentos para a exploração da substância areia, além de outras substâncias como argila, minério de ferro, ouro e granito, conforme pode ser observado no Mapa 4 abaixo.

Mapa 4 – Requerimentos minerários de 2017 na área de estudo



Fonte: Autoria própria (2017)

Tal fato denota a grande relevância da área definida como recorte para estudo, tendo em vista o grande número de requerimentos para exploração de areia, principalmente no leito do rio Potengi.

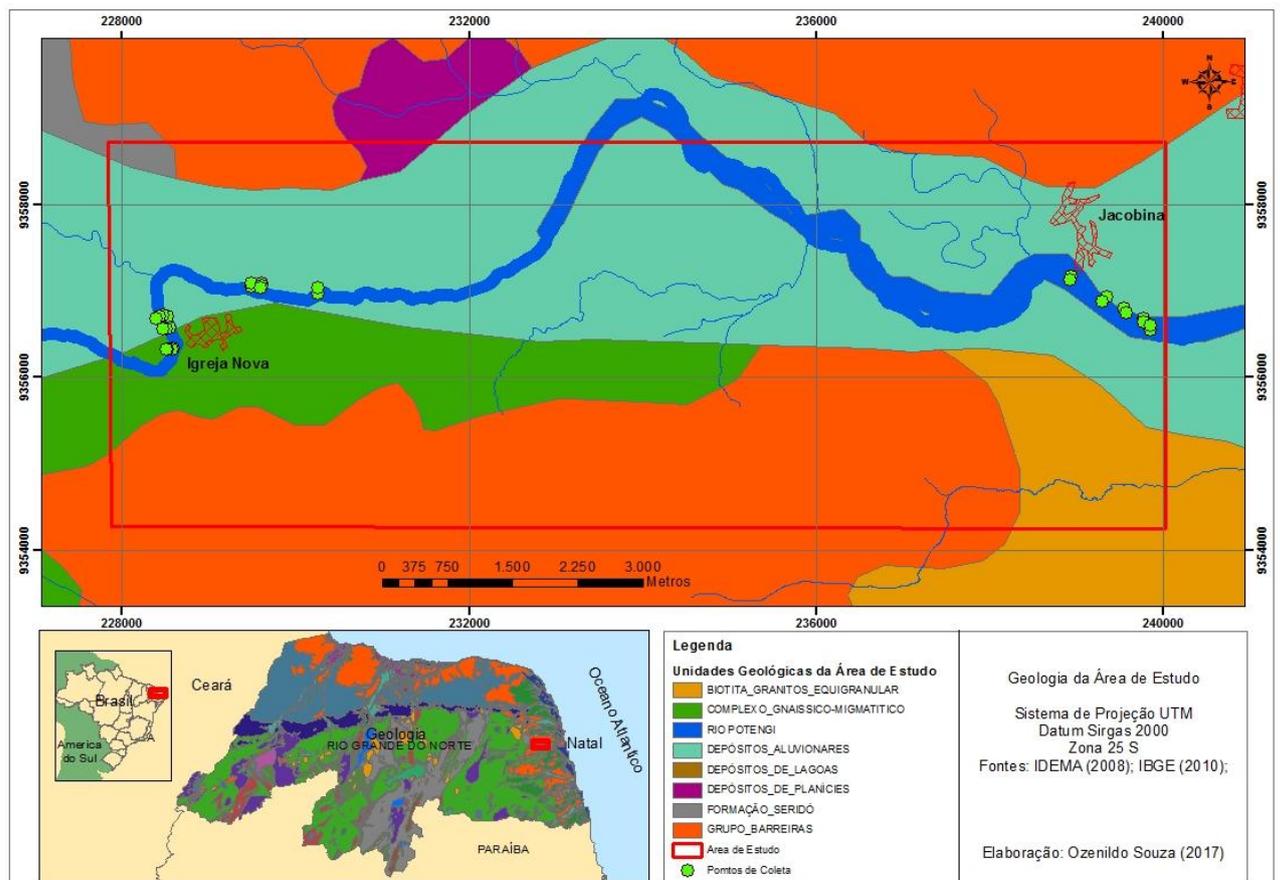
### 3.2 ASPECTOS SOCIOAMBIENTAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Vale destacar que as informações aqui apresentadas têm como principal referência o documento “perfil do seu município, Rio Grande do Norte”, publicado pelo Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA) no ano de 2013, especificamente do município São Gonçalo do Amarante-RN. Na tentativa de caracterizar a área de estudo com um maior detalhe, lançou-se mão dos arquivos vetoriais dos aspectos do meio físico do estado, também disponibilizados pelo IDEMA e trabalhados através do sistema de informação geográfica (SIG), no programa ArcGis 10.1, que auxiliou na confecção dos mapas dos aspectos ambientais.

Geologicamente a região que abrange o município de São Gonçalo do Amarante encontra-se inserido na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos do Complexo Presidente Juscelino, da Formação Seridó da Suíte Natal, dos sedimentos do Grupo Barreiras e pelos depósitos Colúvio-eluviais e Aluvionares. Na porção Oeste do município, nas áreas mais baixas e erodidas nos leitos dos principais rios, afloram rochas pertencentes ao Embasamento Cristalino, com rochas do complexo gnáissico pegmatítico (RIO GRANDE DO NORTE, 2013).

Particularmente na área de estudo, no trecho do rio Potengi correspondente às localidades de Igreja Nova e Jacobina, a geologia é constituída por características semelhantes às citadas pelos relatórios do IDEMA (2013), como a presença do complexo gnáissico pegmatítico, biotita graníticos equigranulares, bem como a presença da formação Seridó e sedimentos do grupo barreiras e os depósitos aluvionares, de lagoas e de planícies (Mapa 5).

Mapa 5 – Geologia da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2017)

Geomorfologicamente, constitui-se de relevos formados por planícies fluviais caracterizadas pela influência da bacia hidrográfica do rio Potengi, com ambientes rebaixados

nas áreas próximas ao rio Potengi e a deposição de lagoas (RIO GRANDE DO NORTE, 2013). O clima da região é caracterizado como tropical chuvoso com verão seco, com período chuvoso entre os meses de fevereiro a setembro. Apresenta ainda uma temperatura média anual em torno dos 27°C. A precipitação pluviométrica regional varia de 1.200 a 1.700 milímetros.

A vegetação local é subdividida em 4 sistemas: vegetação de floresta subperenifolia, aquela constituída por árvores sempre verdes, com troncos delgados e folhas largas; floresta subcaducifolia que perde suas folhas no período seco; florestas de tabuleiro litorâneos, vegetação que sofreu intervenção antrópica, apresentando espécies de replantadas; manguezais, sistema ecológico costeiro tropical com espécies de mangue e de campo de várzea caracterizado como uma vegetação que ocorre ao longo das várzeas úmidas dos rios e constitui geralmente espécies herbáceas (RIO GRANDE DO NORTE, 2013).

Em termos hidrológicos, o município de São Gonçalo do Amarante está quase que 100% inserido na Bacia Hidrográfica do rio Potengi; encontra-se com 82,65% dentro desta bacia e 17,35% na Bacia Hidrográfica do rio Doce. Assim, observamos a importância do rio Potengi, que abrange toda área de estudo (RIO GRANDE DO NORTE, 2013).

Em termos populacionais, o município de São Gonçalo do Amarante, área objeto de estudo, é o terceiro município mais populoso da RMN com 87.668 habitantes, perdendo apenas para os municípios de Parnamirim com 202.456 e Natal com 803.739 habitantes. Dos doze municípios que compõem a RMN, São Gonçalo do Amarante possui a 6ª colocação em termos de extensão territorial (área), com uma área de 249,124 Km<sup>2</sup>, ficando atrás de Ceará-Mirim, Macaíba, Ielmo Marinho, Nísia Floresta e São José do Mipibu (MASCARENHAS et al, 2005).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais e métodos utilizados na pesquisa para alcançar os objetivos geral e específicos definidos e, com isso, responder ao questionamento de pesquisa que norteou esse estudo. Assim, a seção está estruturada da seguinte forma: método de abordagem da pesquisa, técnicas utilizadas e procedimentos experimentais com medições radiométricas, detecção de radônio por câmaras de ionização e técnicas de laboratório com o uso de detectores de energia dispersiva e microscopia eletrônica de varredura.

### 4.1 MÉTODO DE ABORDAGEM DA PESQUISA

O presente trabalho adota uma metodologia de caráter quanti-qualitativa. A abordagem é opção importante a ser adotada, considerando a contribuição para a investigação acerca dos níveis de radiométricos e de radônio, nas areias do rio Potengi, e verificar se os níveis estão de acordo com os estabelecidos pela United National Scientific Committee e on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).

O estudo em tela pode ser classificado como uma pesquisa de cunho exploratório e explicativo. Exploratória porque pretende contribuir para o aprofundamento do conhecimento das questões teóricas em torno do tema de pesquisa (GIL, 2002). Ainda segundo este autor, nas ciências naturais as pesquisas explicativas destacam-se principalmente pelo uso do método experimental, método esse fundamental para mapeamento dos níveis de radônio das areias do leito seco do rio Potengi-RN.

Do ponto de vista empírico, o trabalho pautou-se no primeiro momento no procedimento da pesquisa que se trata da pesquisa bibliográfica em livros de leitura corrente, em obras de divulgação científica, bem como em livros de referência de caráter informativo e remissivo como o uso de dicionários e enciclopédias, além de publicações periódicas em revistas, coletadas principalmente do portal da Capes, Scielo, dentre outras revistas científicas. Nesta fase, é imprescindível também a consulta em dissertações e teses já publicadas e aprovadas, extraídas principalmente do portal domínio público, bem como de banco de dados das universidades brasileiras.

Em um segundo momento, a pesquisa de campo deu o suporte para a observação direta do fenômeno a ser estudado, bem como para fazer coleta das amostras de areia no leito do rio para análise laboratorial, medições em equipamentos para a coleta de dados radiométricos. Após essa coleta, os dados foram tabulados, no programa ArcGis 10.1, para a

confeção dos mapas temáticos (*layout view*), além da análise no laboratório da UFRN, para aferição do radônio por câmara de ionização de eletretos.

#### 4.2 MEDIÇÃO RADIOMÉTRICA

Para a coleta de dados, pretendeu-se inicialmente obter uma quantidade de pontos de medição que indicasse a característica radiométrica das areias depositadas no leito do rio Potengi, mais especificamente nas proximidades da comunidade rural de Igreja Nova e Jacobina caracterizadas como local de grande exploração mineral no município de São Gonçalo do Amarante-RN.

Para identificação dos elementos radioativos e medição de sua concentração, lançou-se mão do método radiométrico, já que fornece dados a partir da medição de anomalias radioativas. Para a obtenção desses dados, utilizou-se o aparelho conhecido como Gamma Espectrômetro para contagem de gama total, cujo alvo é a detecção dos elementos radioativos tais como potássio, urânio e tório (CAVALCANTI NETO; ROCHA DA ROCHA, 2010).

Desse modo, é a partir dessa medição radiométrica que se pode eleger pontos com elementos radioativos, seja pela presença de U, Th e K em depósitos minerais e em ambientes geológicos associados à tantalita, columbita, cassiterita, wolfranita, terras raras, minerais de minério de pegmatitos e granitos (CAVALCANTI NETO; ROCHA DA ROCHA, 2010).

Os aparelhos utilizados foram o cintilômetro RS-125 Super-SPEC, propriedade da empresa Emprogeo mining business ltda. Ainda de acordo com Cavalcanti Neto; Rocha da Rocha (2010), esse equipamento nos fornece informações quanto à concentração de urânio, tório e potássio, os dois primeiros com unidades em partes por milhão (ppm) e o último em porcentagem. Além desses valores, o aparelho fornece ainda o valor da dose ambiental em Nano gray (nGy), ou seja, identifica a taxa de dose radioativa, bem como o isótopo que está emitindo a radiação em Cintilações por segundo (CPS).

Outro equipamento utilizado o cintilômetro RS-220 Super-IDENT, de propriedade do Grupo de Pesquisa Mineral (GPM), do IFRN, que, ao contrário do RS-125, não mede o teor de U, Th e K nos minerais e solos. Contudo, identifica a taxa de dose radioativa e qual isótopo radioativo está emitindo radiação para o ambiente.

Para auxiliar esse levantamento de dados radiométricos, foi elaborada uma planilha de campo para facilitar as anotações dos dados obtidos a partir dos equipamentos citados. Nessa planilha, constam informações de localização (coordenadas geográficas dos pontos de coleta

de dados) e dados radiométricos como os de gama total, dose radiométrica, valores de urânio (ppm), tório (ppm) e potássio (porcentagem), além da presença de isótopos.

Também Cavalcanti Neto; Rocha da Rocha (2010) indicam que, com o cintilômetro RS – 125, é possível medir em nGy a quantidade de energia de radiação por unidade de massa e a presença de urânio e tório em partes por milhão (ppm) e potássio em porcentagem (%), e com o RS 220 foi medido a dose equivalente em Sievert (SV), em que se pode constatar que os minerais pesados presentes na areia possuem radioatividade proveniente do urânio e do tório, podendo se constituir num fator de risco ambiental.

Na tentativa de obtenção de dados mais precisos referente à dose de radiação emanada pelas areias do rio Potengi, o equipamento foi configurado com um tempo de leitura com 120 (cento e vinte) segundos; aumentando o tempo de medição e análise dos níveis de radiação naquele ambiente, a leitura do gamma espectrômetro se deu a uma distância fixa de 5 (cinco) centímetros da superfície arenosa, tomando o cuidado para não tocar a superfície e danificar o equipamento ou mesmo ocorrer o erro na leitura. Além disso, cada ponto foi georreferenciado com GPS do modelo Etrex para obtenção das coordenadas geográficas de cada ponto, para posterior mapeamento, no sistema de coordenadas SIRGAS 2000, atual sistema oficial brasileiro, e análise de cada valor obtido.

Assim, para a coleta das amostras e informações radiométricas, foi definida uma malha experimental com pontos transversais ao leito maior sazonal do rio Potengi, principal local de extração de areia para uso na construção civil da RMN. Esses cortes transversais não seguiram a orientação do rio que é Leste-Oeste, mas os perfis para medição da radiação foram Norte-Sul e se deram em duas fases distintas, uma no período mais seco e outra no período mais chuvoso na região estudada (Fotografia 1).

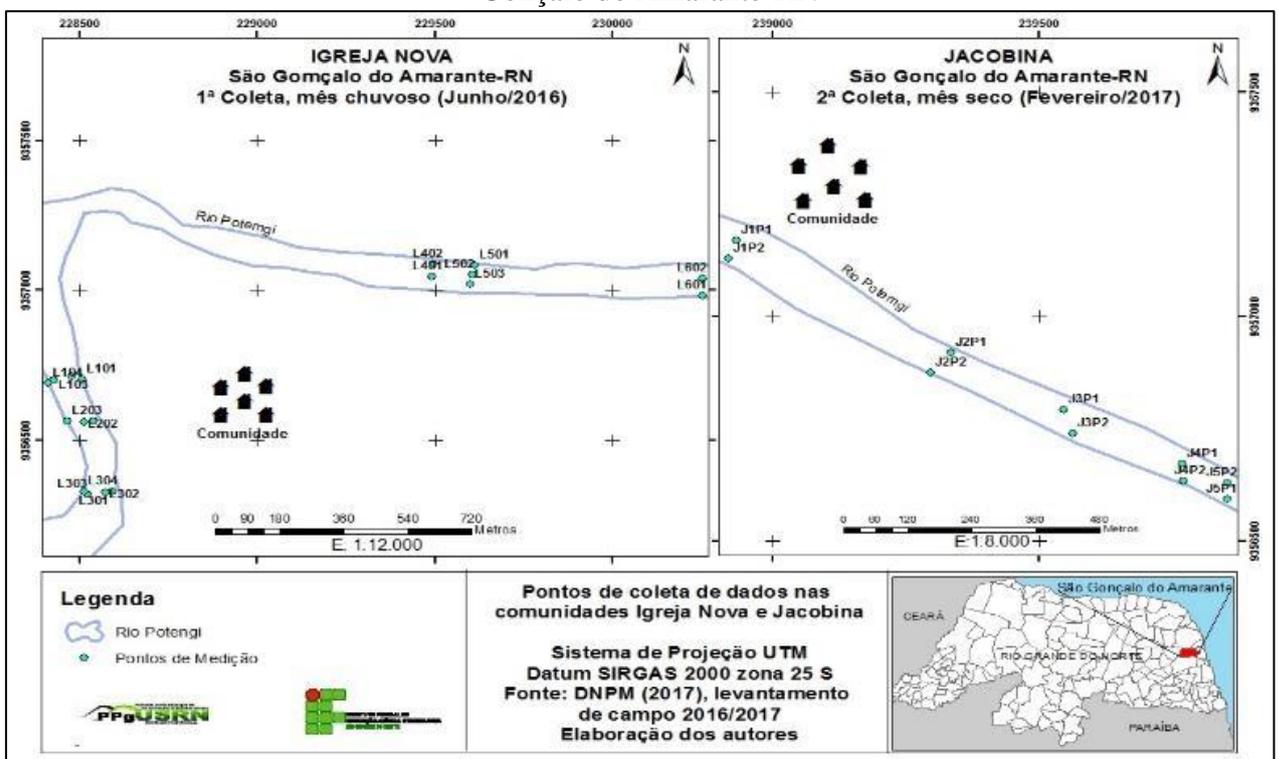
Fotografia 1 – Medição radiométrica nas areias do rio Potengi-RN



Fonte: Autoria própria (2017)

As coletas de campo se deram em duas etapas. A primeira aconteceu no dia 06 de junho de 2016, período de chuvas na região, ou seja, estação do ano definida como inverno. A coleta de areia ocorreu nas proximidades da comunidade Igreja Nova na zona rural do município de São Gonçalo do Amarante-RN. Uma segunda coleta foi realizada no dia 16 de fevereiro de 2017, no verão, período mais quente e seco na região. Nesse caso, a coleta se deu mais especificamente na comunidade conhecida como Jacobina mais a jusante da área da primeira coleta (Mapa 6).

Mapa 6 – Pontos de coleta nas localidades Igreja Nova e Jacobina, município de São Gonçalo do Amarante-RN



Fonte: Autoria própria (2017)

Outra preocupação tomada diz respeito à coleta de amostras em superfície, não sendo um material viável para coleta e análise por se tratar o radônio de um gás e esse material em superfície acaba sendo exalado para a atmosfera. Desse modo, as coletas se deram numa profundidade de aproximadamente um metro abaixo da superfície arenosa, onde os gases ficam mais confinados através dos espaços porosos das areias (Fotografia 2).

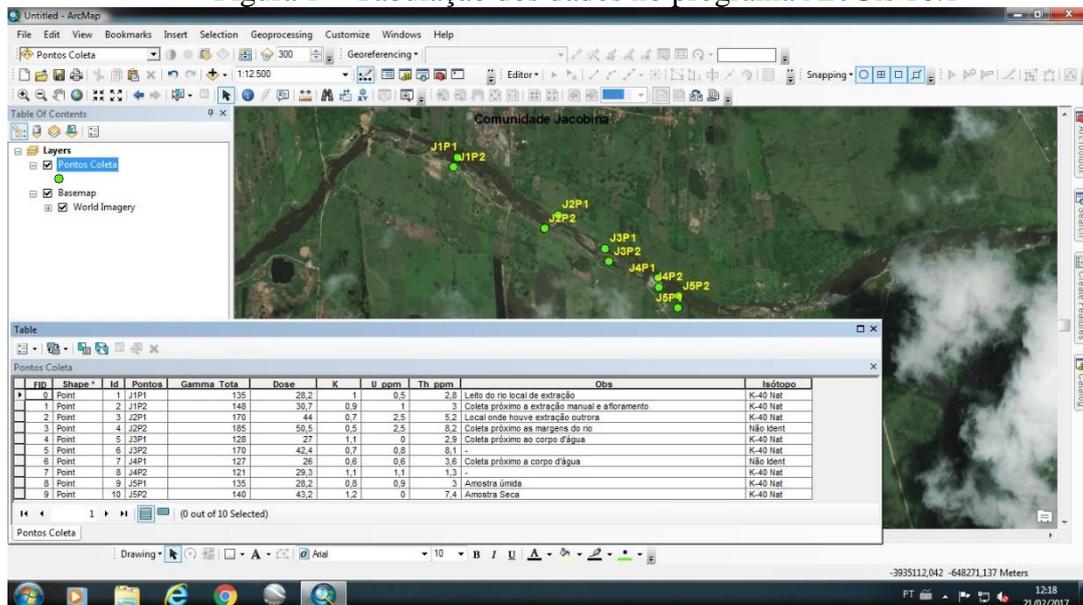
Fotografia 2 – Coleta de areia a um metro de profundidade



Fonte: Autoria própria (2017)

Todas as informações levantadas em campo foram tabuladas no programa ArcGis 10.1 para espacializar os dados radiométricos levantados ao longo do trecho do rio no município de São Gonçalo do Amarante-RN (Figura 1).

Figura 1 – Tabulação dos dados no programa ArcGis 10.1



Fonte: Adaptado do programa ArcGis 10.1 (2017)

Com isso, as informações de Urânio (U) e Tório (Th) subsidiam como indicadores de concentrações do elemento radônio no corpo arenoso.

Após a tabulação no *software* citado, as informações são interpoladas, a partir dos métodos de *krigagem* e IDW, ferramentas do próprio *software* ArcGIS 10.1. Com isso, os valores de urânio, tório e potássio provenientes dos dados radiométricos levantados em campo são processados. Uma vez realizada a *krigagem*, foi possível espacializar os teores de urânio,

tório e potássio e elaborar mapas temáticos com as suas respectivas concentrações. Com isso, foram elaborados mapas com escalas de 1:12.000 para a comunidade Igreja Nova e 1:8.000 para a comunidade Jacobina, com os valores interpolados. Assim, os mapas indicaram os locais de maiores e menores concentrações de radiação natural ao longo do trecho do rio Potengi no município de São Gonçalo do Amarante-RN.

#### 4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais nos auxiliam na obtenção de informações sobre a emanção de radônio das areias do leito do rio Potengi-RN. Neste caso, a seleção de métodos que faça a medição do radônio é fundamental para a pesquisa.

##### 4.3.1 Detecção de radônio por câmara de ionização por eletretos EIC (E-PERM)

A técnica adotada para medição do radônio nas areias coletadas no leito do rio Potengi foi o uso da câmara de ionização por eletretos E-PERM (Fotografia 3). Esse equipamento é recomendado como responsável por medir a concentração de radônio pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e já foi utilizado em diversos trabalhos que têm como intuito a medição da radiação natural proveniente do radônio.

Fotografia 3 – Leitor Electric Voltage Reader (SPER) à esquerda. À direita Câmara E-PERM “aberta”, no centro recipiente de vidro para confinamento do material



Fonte: Autoria própria (2016)

Para medir a concentração de radônio a partir da câmara de ionização, foi necessário selecionar amostras de areia retiradas do leito do rio Potengi. Desse modo, devido à grande relação do urânio/tório e seu decaimento originando o radônio, foram selecionadas as amostras que apresentavam os maiores teores desses elementos, a partir dos pontos de

medição radiométrica obtidas em campo, com a utilização do equipamento RS-125 Super-SPEC. A partir disto, das 28 amostras coletadas de areia, foram selecionadas 11 (onze) amostras com os respectivos dados de urânio e tório, o que equivale a 40% das amostras coletadas (Tabela 1):

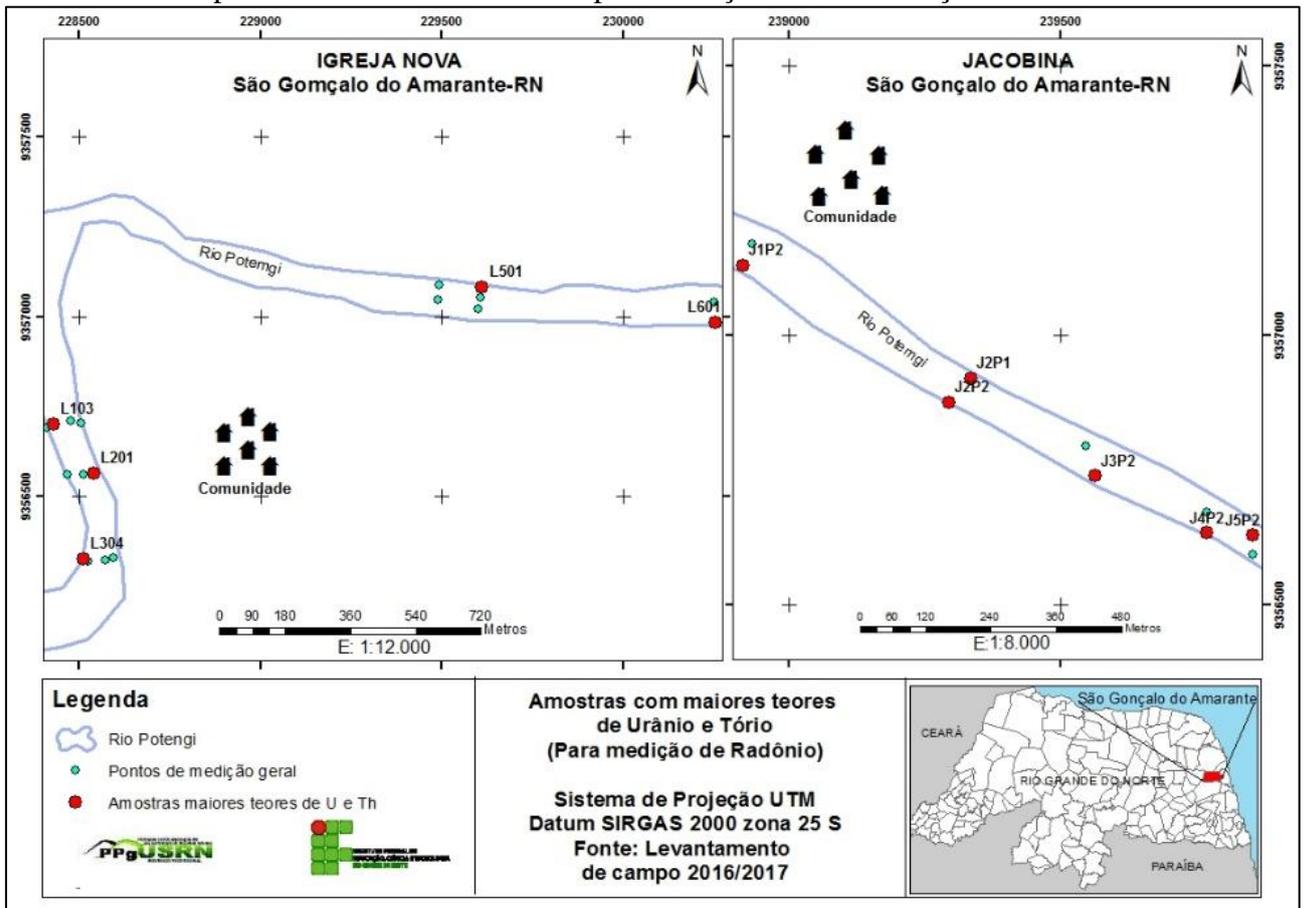
Tabela 1 – Amostras selecionadas para análise em laboratório

Pontos de medição	Valores de Urânio (ppm)	Valores de Tório (ppm)
L103	2,0	3,7
L201	1,5	3,2
L304	1,4	8,2
L501	1,5	13,1
L601	1,9	12,9
J1P2	1,0	3,0
J2P1	2,5	5,2
J2P2	2,5	8,2
J3P2	0,8	8,1
J4P2	1,1	1,3
J5P1	0,9	3,0

Fonte: Autoria própria (2017)

As amostras selecionadas são distribuídas ao longo de todo o trecho recortado para medição dos dados radiométricos, tanto na comunidade de Igreja Nova, quanto em Jacobina (Mapa 7).

Mapa 7– Amostras selecionadas para medição da concentração de radônio



Fonte: Autoria própria (2017)

As 11 (onze) amostras foram coletadas em duplicata, acondicionadas em sacolas plásticas e isoladas por uma fita de forma que o material não tivesse contato com o ambiente externo. Vale destacar que não foram coletadas areias dispostas na superfície, ou seja, foram coletadas areias com aproximadamente 1 (um) metro de profundidade (Fotografia 4), no intuito de coletar matérias que não estão em contato direto com a atmosfera, o que faz com que o radônio escape com mais facilidade.

Fotografia 4 – Coleta de amostra de areia no leito seco do rio



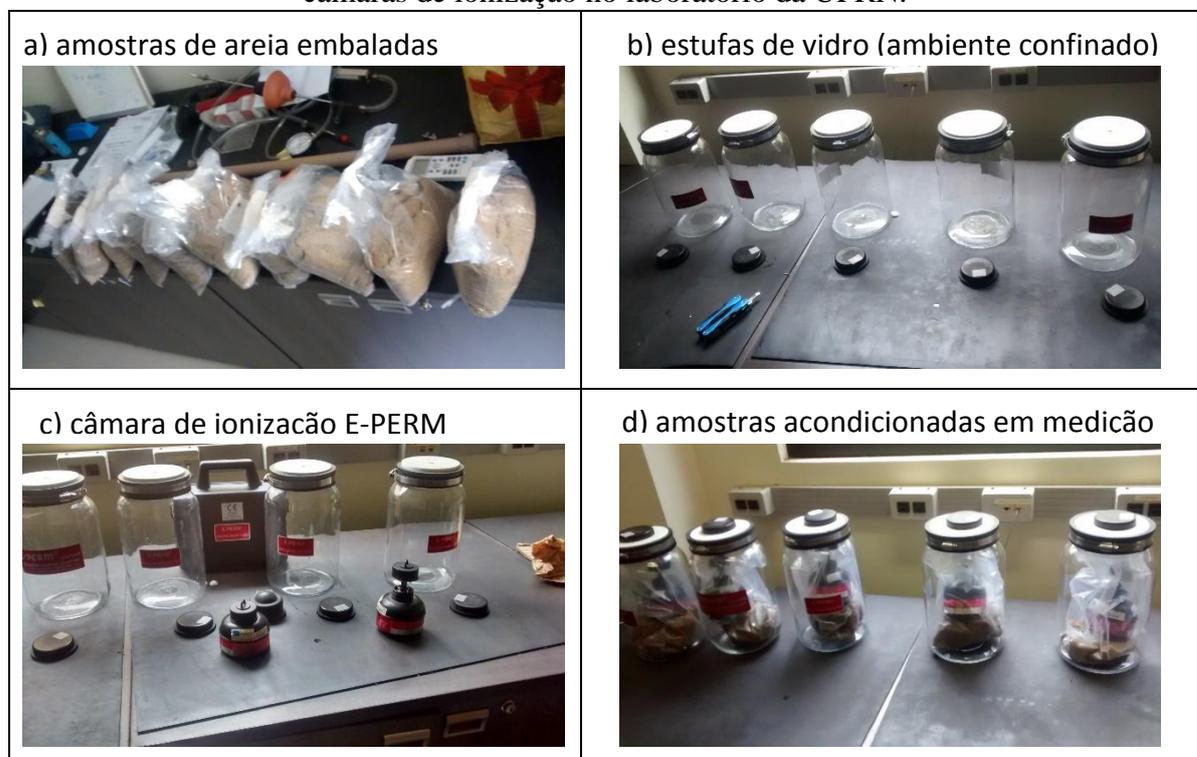
Fonte: Autoria própria (2016)

Após a coleta os materiais foram levados para o Laboratório de Radioatividade Natural (LARANA), que fica sob a responsabilidade do departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). No laboratório, foi realizada a medição da concentração de radônio a partir da câmara de ionização. Com isso, foi separado 1/3 da amostra de aproximadamente 1 kg, para facilitar seu isolamento na estufa. Depois, cada amostra foi depositada em uma estufa específica, junto com o eletreto durante um período de 2,5 dias ou 60 horas estabelecido para leitura dos dados.

Cinco Câmaras de Ionização de Eletretos (EIC) foram distribuídas para as 5 (cinco) amostras coletadas no primeiro campo no mês de junho do ano de 2016 (período chuvoso) e mais seis amostras coletadas em fevereiro de 2017 no segundo campo (período seco). Ou seja, um total de 11 (onze) amostras (a) foram embaladas e levadas ao laboratório.

Assim, foi criado um ambiente no laboratório (b) onde o material arenoso pudesse ficar aprisionado sem o contato com o ambiente externo. Com isso, cada amostra ficou confinada (c) pelo período definido como medições de curta duração dentro de câmaras para que o eletreto pudesse fazer a leitura (d) do gás emitido por essas areias, conforme quadro 1 abaixo:

Quadro 1 – Sequência fotográfica do procedimento de separação de amostras e leitura nas câmaras de ionização no laboratório da UFRN.



Fonte: Autoria própria (2016)

Antes de confinar o material na câmara, foi realizada uma leitura inicial ( $V_i$ ), com o leitor elétrico de voltagem SPER para cada eletreto a ser utilizado na câmara para posterior comparação após a medição das 60 horas ( $V_f$ ).

Após fechar a câmara, tomou-se o cuidado necessário para que a mesma ficasse totalmente vedada, sem nenhum contato ou exposição acidental do eletreto com o ambiente externo.

O período de medição recomendado para a exposição de curto prazo é entre 2 (dois) a 7 (sete) dias, conforme Organização e Administração de Segurança no Trabalho dos Estados Unidos (OSHA). No presente estudo, o período de exposição dos eletretos (das câmaras E-Perm) com as areias dispostas foi de dois dias e meio (2,5 dias, ou seja, cerca de 60 horas). Deste modo, tomamos todas as precauções relativas à conservação do eletreto antes e depois da exposição, para que pudesse apontar dados confiáveis (OSHA, 2010).

Esse período de medição na câmara seu deu com base no estudo de Brito (2013) o qual trabalhou com a medição das concentrações de radônio em ambientes da região metropolitana de Salvador-BA.

O uso das câmaras EIC E-Perm no presente estudo se deve a diversas situações que tornaram conveniente a sua escolha e seu uso. Entre essas situações, destaca-se a hipótese de que as areias do rio Potengi é uma zona de baixa concentração de radônio, devido aos baixos teores de urânio mensurados ao longo das medições radiométricas.

Ainda utilizando a base de informações do laboratório de Administração e Segurança e Saúde no Trabalho (OSHA) dos Estados Unidos, as concentrações de radônio ( $C$ ) relativas a cada uma das medições podem ser calculadas mediante a seguinte fórmula:

$$C = CV / (K) \cdot (d) - B \quad (1)$$

Em que:

$C$  = concentração média de radônio em pCi/L;

$k = 1,88 + (0,006 \times (CV/2))$  é o fator de correção fornecido pelo fabricante;

$CV$  = diferença aritmética entre a carga inicial e a carga final dadas em Volts;

$d$  = número de dias de exposição (que vamos considerar 2,5 para o “experimento piloto”);

$B$  = fator de correção relativo à radiação gama natural (geralmente de 1 pCi/L).

Contudo, essa fórmula fornece dados de radônio no ar e não no solo, como no caso das areias do rio Potengi, sendo necessária a adaptação e criação de um ambiente confinado, como no caso das câmaras utilizadas para então análise de dados dos sedimentos coletados.

#### 4.4 EDX: PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS E ANÁLISES

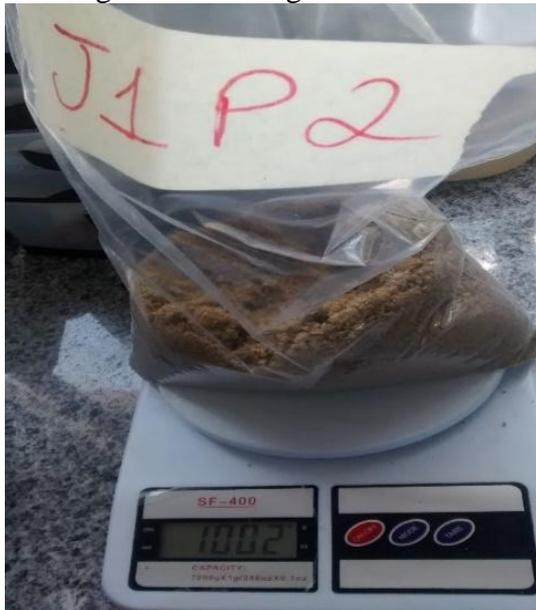
Iniciamos a análise com 10 (dez) amostras de areias coletadas no leito seco do rio Potengi, esse material passaram por um processo experimental no Laboratório de Laminação e Preparação de Amostras, do Grupo de Pesquisa Mineral (GPM), localizado na Diretoria Acadêmica de Recursos Naturais (DIAREN) do IFRN, campus central, onde foram separadas (Fotografia 5) e pesadas (fotografia 6), depois passaram por concentração gravimétrica (bateamento), sendo então levadas para a secagem em estufas, com temperatura de 100°C (célsius), por um período de 24 horas. Após a secagem, o material obteve uma perda de peso na ordem de 1,5 % do peso da amostra coletada. O procedimento é complementado pela separação magnética, com a utilização de um imã para separar o mineral pesado quando o mesmo apresentava susceptibilidade magnética.

Fotografia 5 – Separação das amostras de areia



Fonte: Autoria própria (2017)

Fotografia 6 – Pesagem das amostras

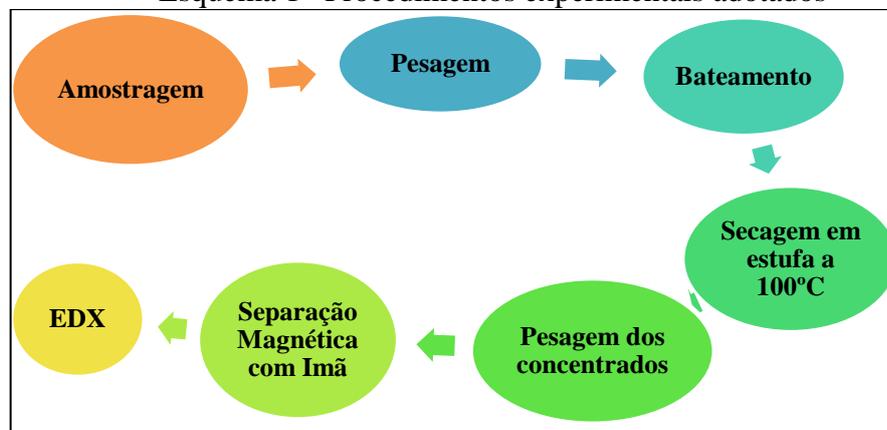


Fonte: Autoria própria (2017)

Após a concentração gravimétrica, as amostras ainda foram reduzidas por cominuição através do uso do almofariz e pistilo de ágata. Posteriormente, as amostras passaram por uma peneira de #200 (mesh) sendo classificadas por sua granulometria.

Feita a classificação por granulometria, a amostra com grãos passantes na peneira de #200 (0,074 microns) foram levadas para realização de análises qualitativas e semiquantitativas no equipamento EDX modelo 720 Shimadzu para determinar a composição e os teores químicos dos elementos da amostra. Tal procedimento pode ser melhor entendido a partir da Esquema 1 abaixo:

Esquema 1 – Procedimentos experimentais adotados



FONTE: Autoria própria (2017)

Na análise de EDX, foram detectados, de forma qualitativa, elementos importantes e, para uma melhor avaliação, de forma mais pontual e detalhada, se fez necessário aprofundar a pesquisa acerca da composição química das amostras de areia estudadas. Desse modo, lançou-se mão da microscopia eletrônica de varredura com o uso da espectroscopia por energia dispersiva (MEV/EDS).

#### 4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA COM ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (MEV/EDS)

Para uma leitura mais detalhada, foram enviadas 3 (três) amostras de 10g cada (um em referência a cada concentrado de areia) para o Laboratório de Caracterização de Minerais/Materiais (LACAMM), localizado no DIAREN-IFRN. Assim, o concentrado das amostras foi analisado pelo conjunto MEV/EDS, utilizando o detector de elétrons retro espalhados (no inglês *backscattered electrons - BSD*) para a geração de imagens (tons de cinza), entre grãos e composição química dos concentrados.

As amostras foram analisadas no equipamento do LACAMM e se deram em um MEV TESCAN (VEGA3-LMU) e detector EDS X act (Oxford Microanalyses Group) acoplado, e a metalização prévia ocorreu em um equipamento QUORUM Q150R ES, utilizando ouro. Por fim, a interpretação de dados acerca da composição química foi obtida por EDS usando o software Inca.

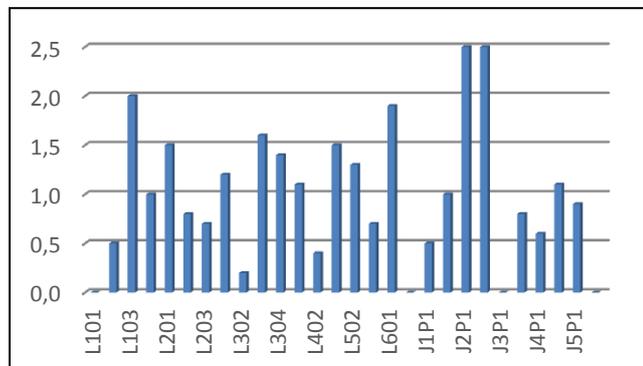
## 5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados apenas os resultados correspondentes à radiação natural de urânio, tório e potássio, além das concentrações de radônio nas areias do rio Potengi e caracterização morfológica e composição química dos minerais pesados encontrados nas areias do leito seco do rio Potengi-RN.

### 5.1 RADIAÇÃO NATURAL DE URÂNIO, TÓRIO E POTÁSSIO NAS AREIAS DO RIO POTENGI

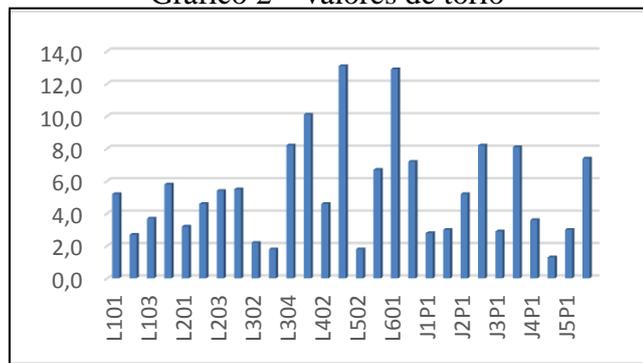
Com os dados levantados no rio Potengi, mais especificamente nas comunidades Igreja Nova (definida como estação L) e Jacobina (Estação J) no município de São Gonçalo do Amarante a partir dos métodos adotados, destacamos a presença de três isótopos radioativos de urânio (gráfico 1), potássio e tório (gráfico 2) com valores a serem apresentados.

Gráfico 1 – Valores de urânio



Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Gráfico 2 – valores de tório



Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Assim, foram levantadas informações em 28 pontos de medição, definidos como estação (em Igreja Nova e Jacobina). A partir das medições com o aparelho RS-220 Super-IDENT não foram identificados outros isótopos além do Potássio-40 (K-40), sendo este o isótopo radioativo que está emitindo radiação para o ambiente.

Os valores de urânio variam desde sua ausência em alguns pontos de amostragem até o valor de 2,5 ppm em outros trechos, tendo como média 1 ppm no trecho do rio estudado. Em relação aos valores de tório, foram bem maiores variando de 1,3 ppm a 13,1 ppm, ou seja, em média de 5,3 ppm no trecho inventariado. Já os valores de Potássio foram muito baixos variando de 0,2% a 1,3%, o que equivale a uma média de 0,7%.

Com base nos gráficos acima, notamos uma relação entre os diferentes períodos climáticos com os valores dos elementos radioativos de urânio e tório. Outro fator a se considerar é que os maiores valores de tório ocorrem nos pontos onde ocorre a extração de areia mecanizada, principalmente na comunidade Igreja Nova (Fotografia 7).

Fotografia 7 – Extração de areia de forma mecanizada



Fonte: Autoria própria (2016)

Ao contrário, onde a extração de areia é menor e de forma manual, os valores são menores (Fotografia 8). Tal fato denota que a interferência antrópica, com uso de equipamentos mais sofisticados que utilizam combustíveis (extração mecanizada), além de degradar o ambiente local causando erosão e desmatamento das áreas de preservação permanente (APP) do rio, contribui na maior dose radioativa no mineral arenoso.

Fotografia 8 – Extração de areia de forma manual



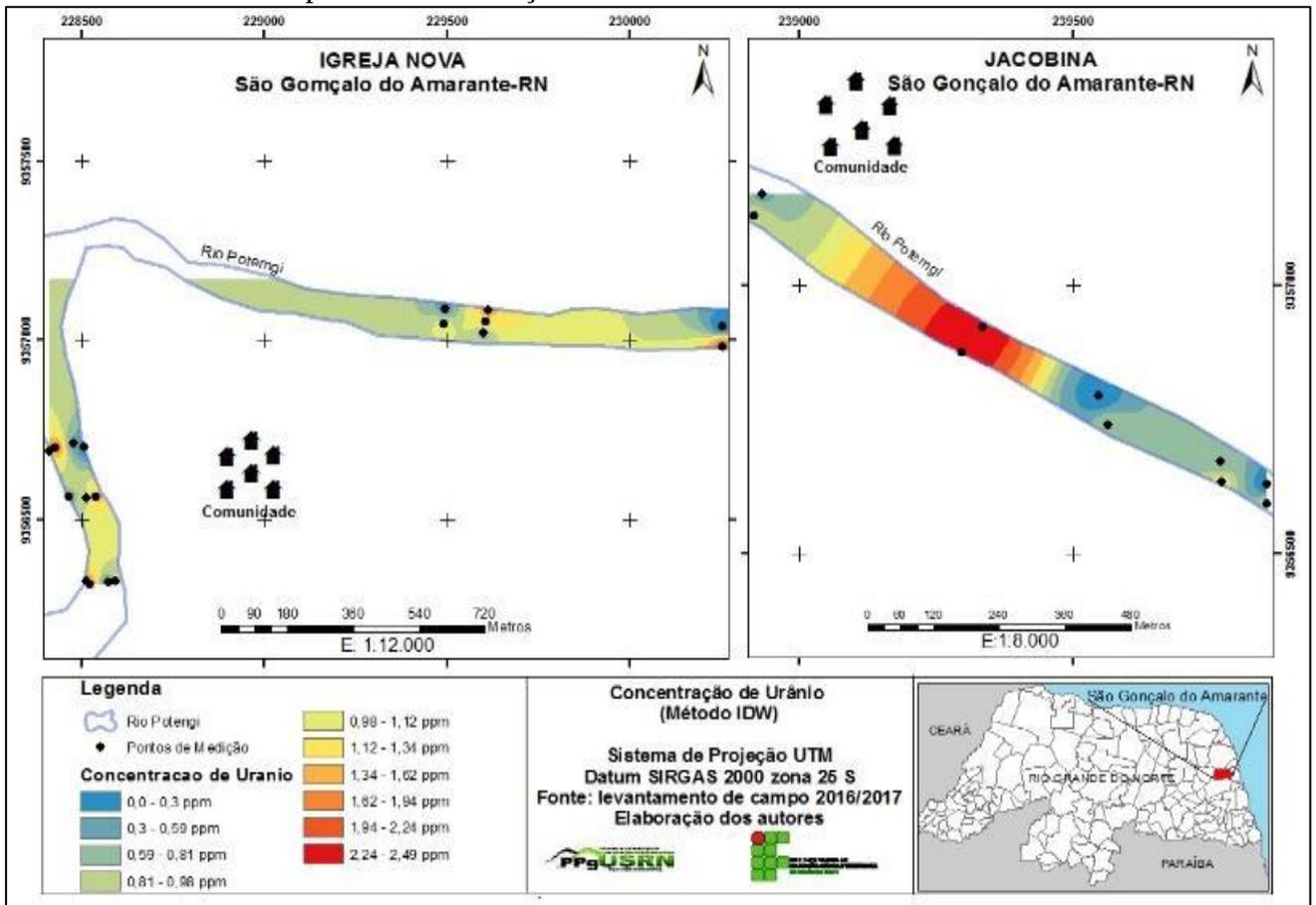
Fonte: Autoria própria (2016)

A concentração desses elementos se dá de formas espaçadas ao longo do trecho envolvido e estão dispostos ao longo do rio da seguinte forma: tanto na comunidade Igreja Nova, quanto na comunidade Jacobina os valores de radiação natural de urânio, tório e potássio se dão em pontos próximos de locais com afloramento rochoso do complexo gnáissico pegmatítico e nas margens do rio, local onde ocorre a maior extração mineral.

### **5.1.1 Teores de urânio (U)**

A maior concentração de urânio não está atrelada à intervenção antrópica, uma vez que seus maiores valores estão dispostos na comunidade Jacobina (Mapa 8), local identificado como de pouca exploração mineral de areia no leito do rio. Contudo, os maiores valores podem estar associados aos fatores climáticos do período da coleta de informações, ou seja, ao clima quente e seco, o que aumenta a maior incidência de radiação solar nas regiões próximas à linha do equador, além do aumento da evaporação do corpo d'água, contribuindo na emissão de gases para o ambiente.

Mapa 8 – Concentração de urânio no trecho do rio estudado



Fonte: Autoria própria (2017)

Na natureza, o urânio é encontrado na crosta terrestre com concentrações que variam de 0,008 a 8,2 ppm e é encontrado principalmente em rochas e minérios, como em areias monazítica, águas salgadas e doces (CAMARGO, 1994). Além disso, pode ser encontrado no ar, nas rochas, solos e em águas superficiais e subterrâneas. No entanto, se comparados com os valores apontados acima, os valores de urânio emitidos pelas areias do rio Potengi apresentam-se como baixos, já que chega em alguns pontos a 2,5 ppm como maior valor obtido na comunidade Jacobina.

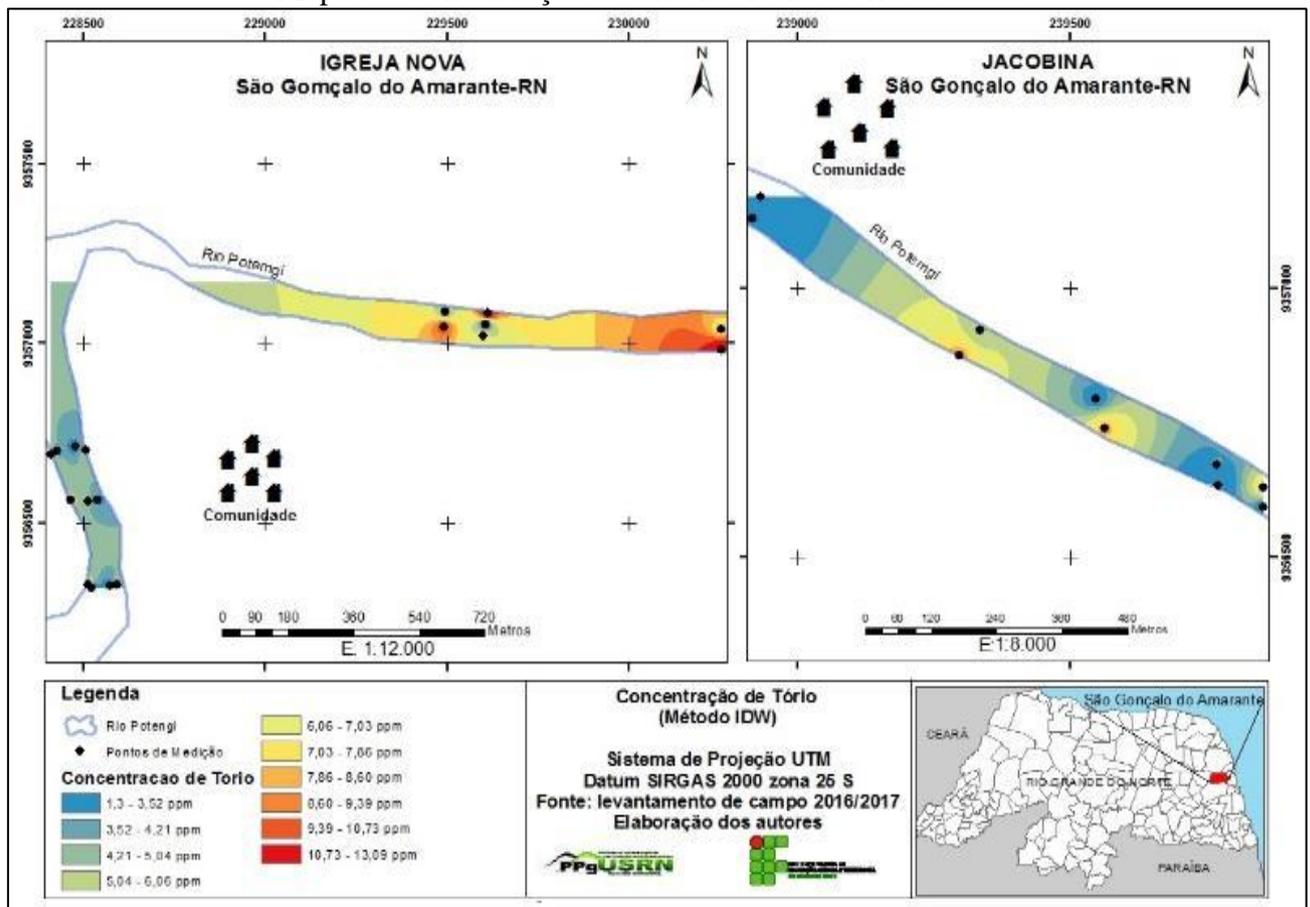
Portanto, a presença do urânio pode estar ligada à presença de outros elementos como o próprio tório e o elemento terras raras, proveniente da característica de ambientes composto por rochas ígneas. Desse modo, por este elemento ser emissor de radiação alfa, pode oferecer riscos radiológicos e químicos à saúde humana e provocar doenças degenerativas, inclusive doenças no fígado e rins (QUEIROZ et al, 2017).

### 5.1.2 Teores de tório (Th)

Já o tório apresenta na área estudada concentrações mais elevadas no período chuvoso nas areias da comunidade Igreja Nova (Mapa 9), principalmente nos locais onde houve grande exploração de areia, de forma que o corpo d'água foi aflorado. Tal fato se dá devido ao Th ser de difícil dissolução no meio aquoso, o que corrobora para uma maior concentração no período de chuvas.

Ainda corroborando com estas informações, Queiroz et al (2017) apontam que a presença de tório no ambiente está ligada principalmente aos aspectos morfológicos do solo e que o incremento de sua concentração se dá devido ao uso e ocupação exacerbados do solo, contribuindo para o aumento do risco ambiental.

Mapa 9 – Concentração de tório no trecho do rio estudado



Fonte: Autoria própria (2017)

Com isso, o tório é encontrado naturalmente na superfície terrestre com concentrações que variam de 0,01 a 21,5 ppm, e principalmente em areias monazítica, rochas e alguns minerais (CAMARGO, 1994). Assim, comparado com esses valores, os teores de tório

encontrados nas areias do rio Potengi apresentam-se como de baixo a médio, tendo como maior teor pontos com 13,1 ppm.

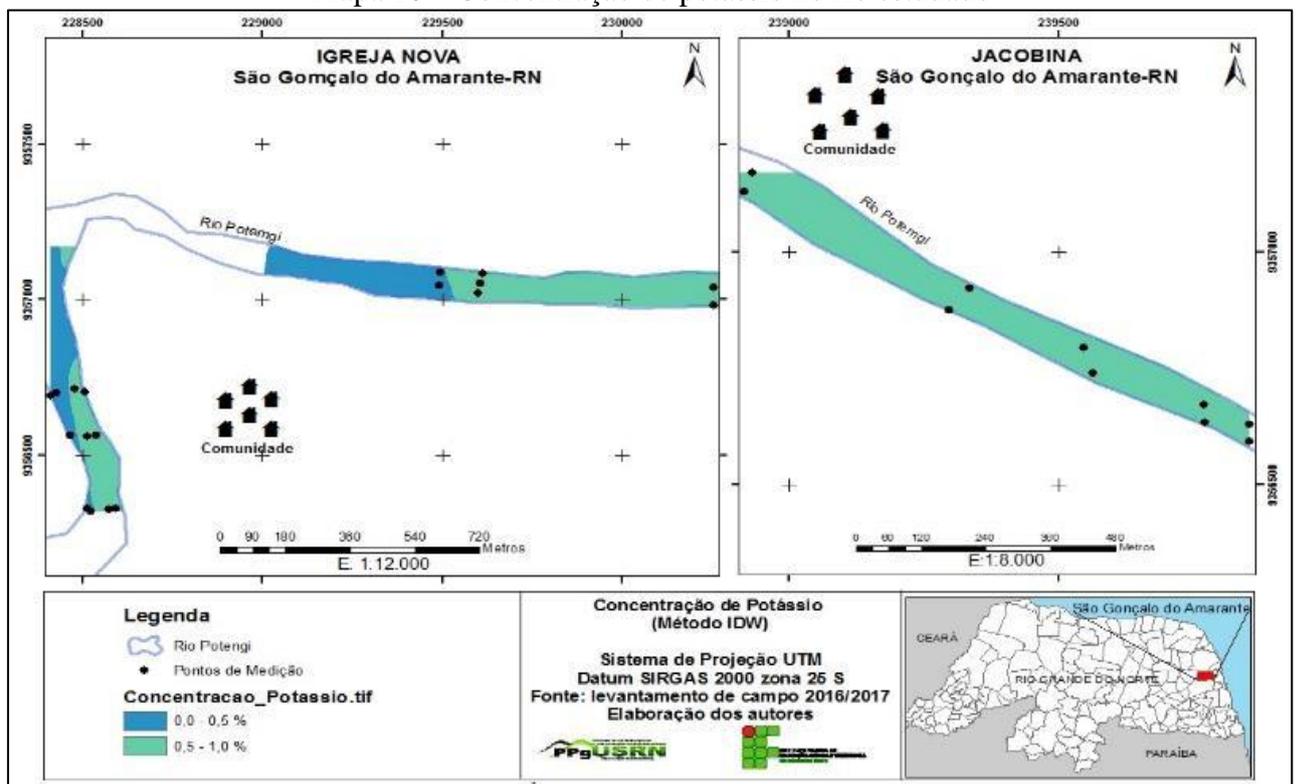
Contudo, a concentração de tório pode ser favorecida a partir de atividades antrópicas como a mineração e o beneficiamento de alguns produtos industriais (QUEIROZ et al, 2017). Esta afirmativa corrobora com a realidade identificada no rio Potengi, onde os maiores valores de tório se dão nos trechos onde há maior exploração mineral no leito do rio.

Um dos principais agravantes relacionado à relação entre o urânio e o tório é que sua desintegração ao longo do tempo origina outro isótopo, como o radônio, que possui características altamente cancerígenas, uma vez inalado pelos seres humanos.

### 5.1.3 Teores de potássio (K)

Os valores de potássio, apesar da sua identificação em todos os pontos de medição, apresentam-se com baixa concentração (Mapa 10). Diferente do comportamento do urânio e do tório, o potássio pode ser encontrado em diversos tipos de rochas e solos e é distribuído de forma ampla no ambiente. Assim, os níveis de concentração dele dependem do tipo da formação rochosa da região.

Mapa 10 – Concentração de potássio no rio estudado

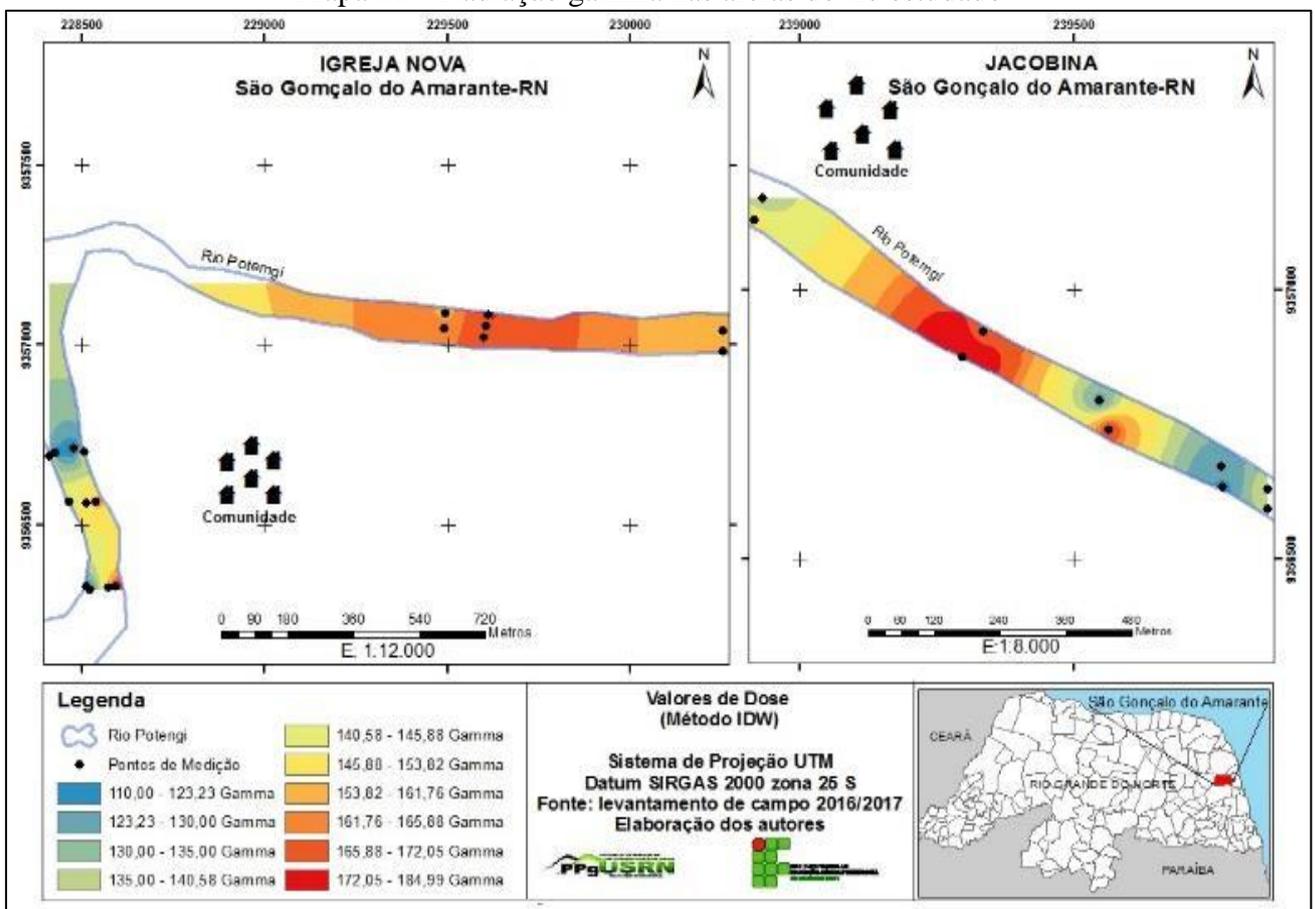


Fonte: Autoria própria (2017)

### 5.1.4 Gamma total e dose radiométrica

Em relação à radiação gamma emitida pelas areias do rio (Mapa 11), podemos destacar que os elementos NORM apontam locais de maior emissão radioativa, seja por seu solo arenoso ou a partir da presença de afloramentos rochosos. No caso da área de estudo, os maiores teores de materiais com radiação se dão nos locais onde ocorrem interferências antrópicas no uso indiscriminado do solo, a partir do desenvolvimento da atividade de exploração mineral no leito do rio Potengi-RN, como observado a partir dos teores de urânio e tório.

Mapa 11 – Radiação gamma nas areias do rio estudado

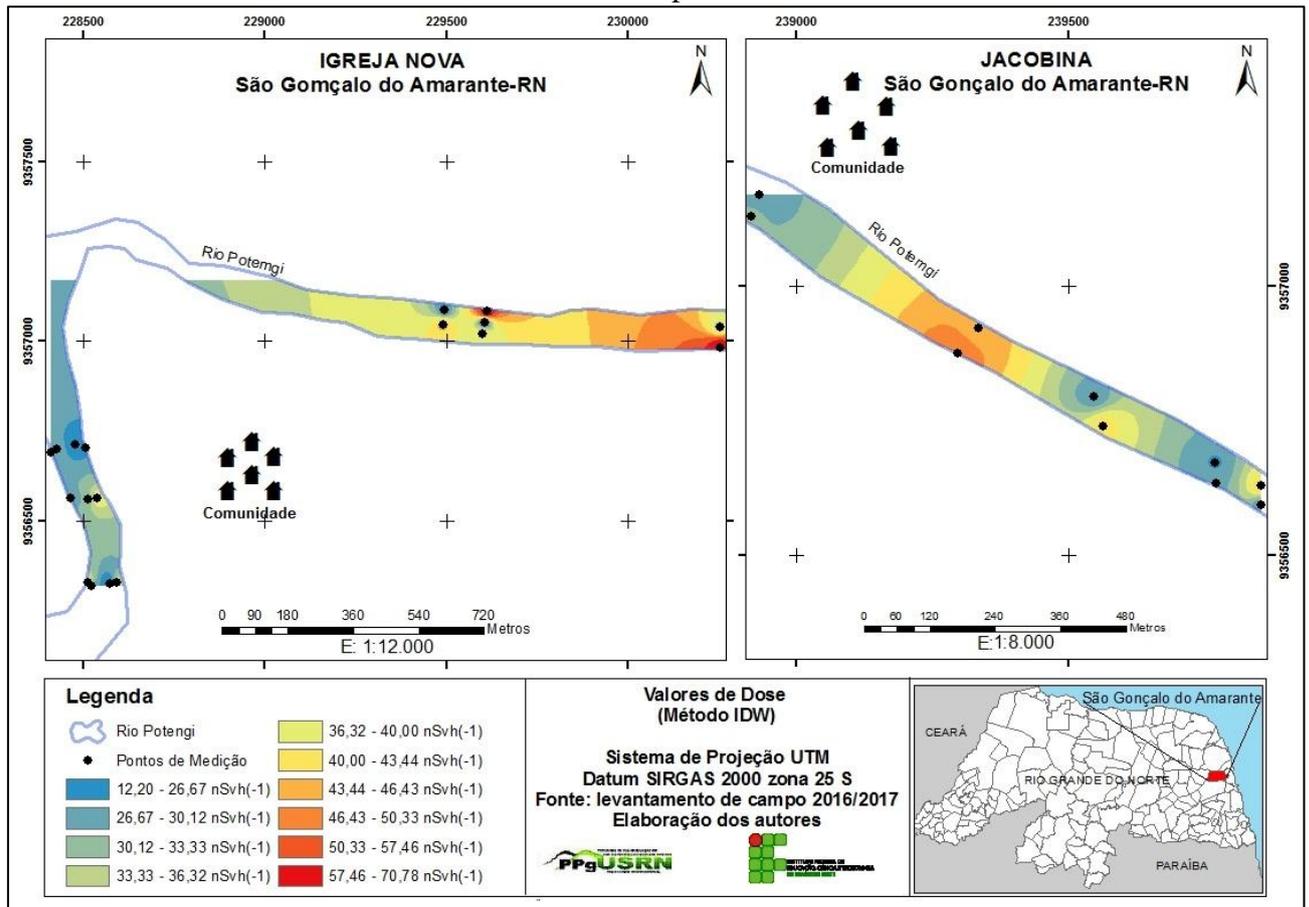


Fonte: Autoria própria (2017)

Em relação à Dose, o UNSCEAR (2000) constatou que a taxa de dose absorvida no ar varia entre 10 e 200 nSvh(-1), com valor médio de 59 nSvh(-1) para o ambiente externo. A média ponderada da taxa de dose absorvida no ar dentro de casa (*indoor*) é estimada em 84 nSvh(-1), em que sua maior contribuição se dá a partir da emanção por materiais de construção.

No rio Potengi, os valores de Dose radiométrica variam entre 12,4 a 70,7 nSvh(-1), com média de 35,6 nSvh(-1), o que atesta que os resultados obtidos estão baixos em relação aos valores indicados pela UNSCEAR. As concentrações ao longo do trecho do rio estão indicadas no mapa 12.

Mapa 12– Dose absorvida no rio Potengi-RN pelo método de Krigagem, através dos valores obtidos pelo RS-125



Fonte: Autoria própria (2017)

## 5.2 O GÁS RADÔNIO NAS AREIAS DO RIO POTENGI

A partir da utilização da EIC E-Perm identificamos alguns valores de radônio nas areias do rio Potengi, conforme apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 abaixo.

Tabela 2 – Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em junho/2016 na comunidade Igreja Nova, município de São Gonçalo do Amarante-RN

Amostra	Vi (volt)	Vf (volt)	Vf - Vi (volt) = CV
	Data: 06/06/16	Data: 09/06/16	
L103	330	289	41
L201	376	281	95
L304	312	160	152
L501	392	160	232
L601	332	242	90

Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Tabela 3 – Resultados da diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em fevereiro/2017 na comunidade Jacobina, município de São Gonçalo do Amarante-RN

Amostra	Código do eletreto	Vi (volt)	Vf (volt)	Vf - Vi (volt) = CV
		Data: 21/02/17	Data: 24/02/17	
J1P2	LM4673	370	364	6
J2P1	LS4720	445	437	8
J5P1	LP1259	324	316	8
J4P2	LM4706	347	338	9
J2P2	LS5089	428	404	24
J3P2	LS4846	422	415	7

Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Ao comparar os valores da diferença entre a carga final e inicial, ou seja, os valores de CV nas duas tabelas, observou-se uma discrepância entre eles, sendo o menor CV na comunidade Igreja Nova de 41 volt e o maior valor na comunidade Jacobina de 24 volts. Tais dados apontam para a ocorrência de algum erro na medição ou mesmo no manuseio do equipamento que é muito sensível, necessitando de um cuidado especial para o isolamento total do material dentro da câmara, evitando o contato com o ambiente externo.

A partir disso, para obtenção de dados e informações coerentes acerca dos teores de radônio nas areias estudadas, foi realizada uma segunda coleta nos mesmos pontos da comunidade Igreja Nova e no mesmo período do ano agora em junho/2017.

Com essa nova coleta e medição do material nas câmaras de ionização, obtiveram-se os seguintes dados, apresentados na tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Diferença de carga (volt) das areias do rio Potengi coletadas em junho/2017 em Igreja Nova em São Gonçalo do Amarante-RN

Amostra	Código do eletreto	Vi (volt)	Vf (volt)	Vf - Vi (volt) = CV
		Data: 27/06/17	Data: 30/06/17	
L103	LS5327	572	566	6
L201	LS5359	452	445	7
L304	LS5300	542	533	9
L501	LS5441	498	489	9
L601	LS5256	401	393	8

Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Com os novos dados obtidos da segunda coleta nas areias da comunidade Igreja Nova, observamos que os valores de CV são aproximados em relação aos obtidos na comunidade Jacobina, conforme apresentado na tabela 4 acima.

A partir de então, de mão de novos valores, foi possível a mensuração da concentração de radônio nas areias do rio obtidas nas duas comunidades, utilizando a fórmula mencionada anteriormente. Desse modo, obtivemos as seguintes concentrações de radônio, descritos na tabela 5 e 6 abaixo:

Tabela 5 - Resultados dos cálculos das concentrações de radônio na comunidade Igreja Nova em São Gonçalo do Amarante-RN

Amostra Igreja Nova	Vf - Vi (volt) = CV	C (pCi/L)
L103	6	<b>0,27</b>
L201	7	<b>0,47</b>
L304	9	<b>0,88</b>
L501	9	<b>0,88</b>
L601	8	<b>0,68</b>

Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Tabela 6 - Resultados dos cálculos das concentrações de radônio na comunidade Jacobina em São Gonçalo do Amarante-RN

Amostra Jacobina	Vf - Vi (volt) = CV	C (pCi/L)
J1P2	6	<b>0,27</b>
J2P1	8	<b>0,68</b>
J5P1	8	<b>0,68</b>
J4P2	9	<b>0,88</b>
J2P2	24	<b>3,9</b>
J3P2	7	<b>0,47</b>

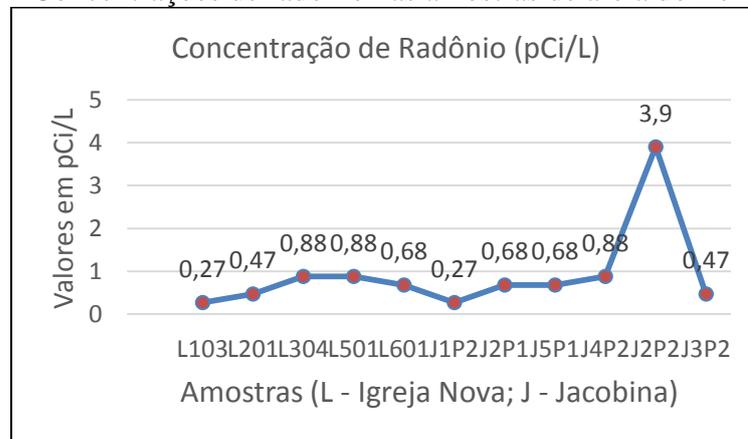
Fonte: Dados da pesquisa (2017)

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos, a concentração aceitável de radônio em ambientes abertos deve ser na ordem de intervalos que variam entre 0,4 a aproximadamente 1,3 pCi/L. Em ambientes fechados/internos, os níveis de radônio nas habitações como casas, prédios, escolas, dentre outros, devem ser na ordem de aproximadamente 4,0 pCi/L.

Desse modo, os valores obtidos nas areias do rio Potengi devem ser comparados com os valores de concentração de radônio em ambientes abertos, já que trata-se de um ambiente deste tipo. Assim, fazendo essa comparação, observa-se que a concentração média de radônio é estimado em 0,9 pCi/L o que indica que as concentrações estão dentro dos padrões estabelecidos pelas agências americanas.

Contudo, em alguns pontos de amostragem, apresentam-se valores de concentração abaixo dos 0,4 pCi/L (Pontos L103 e J1P2) e, em apenas uma amostra, a concentração extrapola os valores estabelecidos emitindo uma concentração de 3,9 pCi/L na comunidade Jacobina (J2P2), como podemos observar no gráfico 1 abaixo.

Gráfico 3 – Concentrações de radônio nas amostras de areia do rio Potengi-RN



Fonte: Dados da pesquisa (2017)

A discrepância nos valores apresentados pela amostra J2P2, na comunidade Jacobina, pode estar associada aos teores de urânio na localidade, já que, de acordo com as informações radiométricas levantadas em campo, esse mesmo local apresentou os maiores teores de urânio com 2,5 ppm e tório com 8,2 ppm da região estudada.

Outro fator que pode estar associado à alta concentração neste ponto se dá aos fatores climáticos no período de coleta dos materiais, já que foram feitas no período de temperaturas mais elevadas e de maior intensidade de radiação solar, o que determina os maiores índices de evaporação no solo e na água e, como o radônio é um gás, teria mais facilidade de escapar para o ambiente externo do que em períodos chuvosos.

Um fator ambiental de grande relevância que influencia nos índices de radônio no ambiente é o tipo de embasamento rochoso regional. Como identificado, a área estudada apresenta características geológicas do complexo gnáissico pegmatítico, o que sugere a existência de concentrações de radônio em ambientes internos. Em alguns trechos, essa

formação rochosa aflora até a superfície (Fotografia 9), ficando em contato com os processos de intemperismo físico, químico e biológico.

Fotografia 9 –Afloramento rochoso no leito do rio Potengi-RN



Fonte: Aatoria própria (2016)

Alguns estudos realizados no Rio Grande do Norte, mais especificamente nos municípios de Lajes Pintadas e Lucrécia, associam concentrações de radônio em algumas residências dos municípios ligadas ao tipo de solo e rocha regional; no caso das localidades, as rochas cristalinas do complexo gnáissico pegmatítico.

A partir do uso de eletretos nas residências dos municípios citados, identificou-se que os níveis de radônio excederam os níveis estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS) que é de  $100 \text{ Bq/m}^3$  (CAMPOS et al, 2013a). Especialmente no município de Lajes Pintadas, os níveis de radônio estão associados ao fato de a cidade estar sobre afloramentos de corpos pegmatíticos, que são naturalmente enriquecidos em urânio (CAMPOS et al, 2013b).

Deste modo, deve se dar uma atenção especial no tocante ao uso e ocupação do solo das areias do rio Potengi, pois, mesmo que apresentando baixas concentrações de radônio, a exposição contínua a esse gás contribui para o risco de se contrair câncer de pulmão, já que, de acordo com a comissão Internacional para Proteção Radiológica, o gás radônio é um importante agente carcinógeno humano e a exposição prolongada, não só ao gás, mas também a exposição aos seus produtos de decaimento radioativo, pode provocar câncer de pulmão nos seres humanos.

### 5.3 IDENTIFICAÇÃO DE MINERAIS PESADOS POR EDX

Os resultados obtidos a partir do uso do EDX nas amostras e areias da comunidade Jacobina (J1P1, J2P1, J3P1, J4P1 e J5P1), foram identificados na faixa Titânio-Urânio, informações referentes à composição química e os teores de alguns óxidos, como citados os mais abundantes os óxidos de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de Cálcio ( $\text{CaO}$ ) e Titânio ( $\text{TiO}_2$ ). Além dos óxidos citados o dióxido de tório ( $\text{ThO}_2$ ) apresenta concentrações em todas as amostras analisadas (Tabela 7). A presença do elemento radioativo tório confirma as informações levantadas a partir dos valores obtidos pelo espectrômetro RS-125 citado anteriormente.

Tabela 7 – Análise química semiquantitativa (EDX) da Amostra J2P1

$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$
35,702%	27,194%	19,738%	9,449%	2,507%	1,976%	1,305%	1,143%
$\text{Nd}_2\text{O}_3$	$\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	$\text{NbO}$	$\text{ThO}_2$	$\text{SrO}$	$\text{ZnO}$
0,277%	0,182%	0,173%	0,118%	0,082%	0,077%	0,045%	0,032%

Fonte: Adaptado de CRUZ et al. (2017)

Outros óxidos foram encontrados na amostra (J2P1) como o Neodímio ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) e Ítrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), tais óxidos correspondem aos Elementos Terras Raras (ETR). A presença desses elementos requer uma maior atenção para as areias do rio Potengi-RN.

### 5.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AREIAS DO LEITO DO RIO POTENGI

Para uma análise mais concreta a respeito da caracterização morfológica e composição química dos minerais de areia, utilizou-se os equipamentos do MEV/EDS, para confirmação da presença do Cério e da possibilidade de existência de outros ETR's nas amostras.

Assim, foram identificados nas areias do rio Potengi, a partir do MEV/EDS, outros elementos, conforme quadro 2 abaixo:

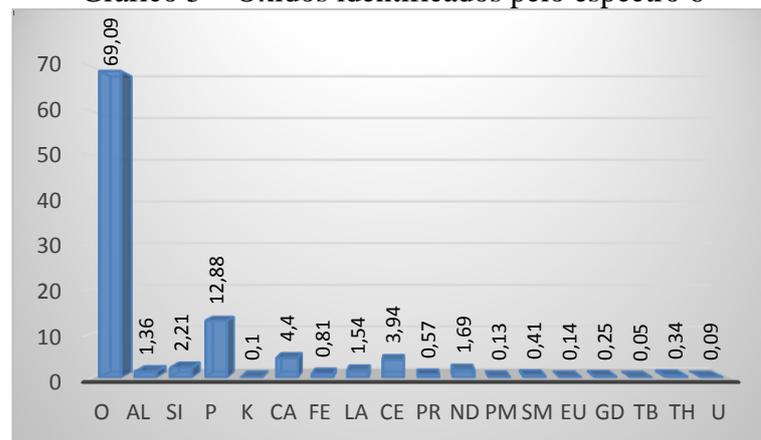
Quadro 2 – Principais óxidos identificados pelo MEV/EDS

Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Ítrio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Alumínio
K <sub>2</sub> O - Potássio	CaO - Cálcio
CeO <sub>2</sub> - Cério	TbCl <sub>3</sub> - Térbio
MnO - Manganês	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Európio
ThO <sub>2</sub> - Tório	UO <sub>2</sub> - Urânio
SiO <sub>2</sub> - Silício	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - Fósforo
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Ferro	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Lantânio
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Neodímio	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Gadolínio
TiO <sub>2</sub> - Titânio	-

Fonte: Dados da pesquisa (2017)

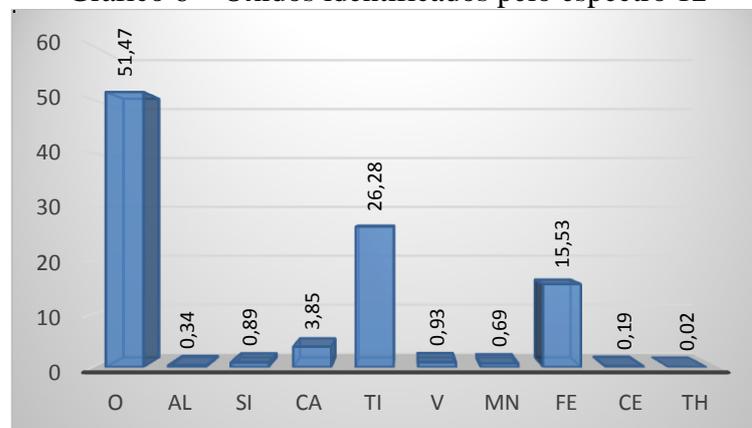
Os óxidos mais presentes nas amostras analisadas foram os óxidos de Oxigênio (60%), Fósforo (10%), Cálcio (4%) e Ferro (3%), os demais elementos aparecem em menores frações (Gráficos 5 e 6).

Gráfico 5 – Óxidos identificados pelo espectro 6



Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Gráfico 6 – Óxidos identificados pelo espectro 12

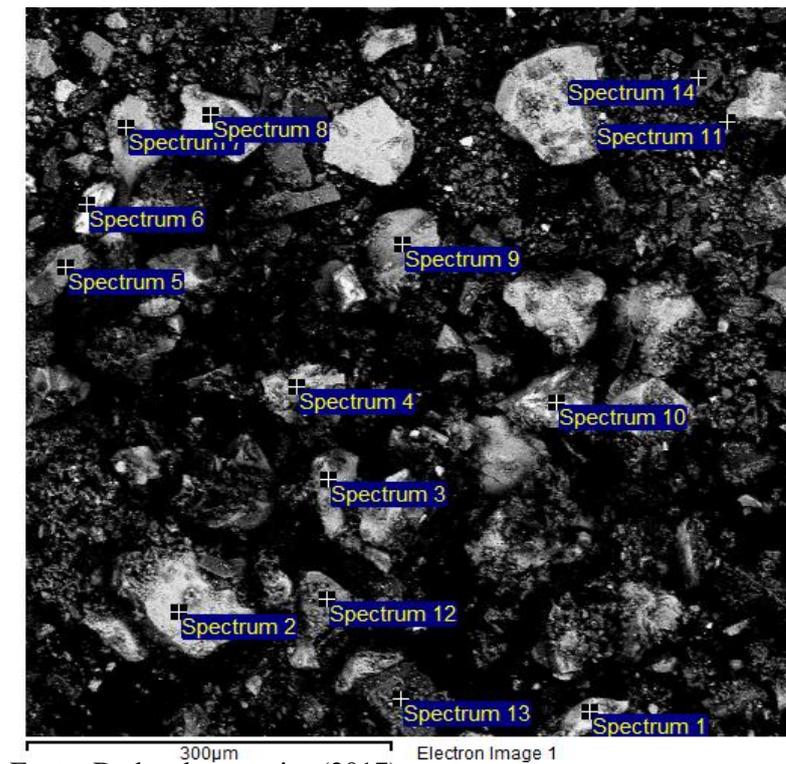


Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Outro ponto de destaque é a presença dos elementos de urânio e tório identificados nos grãos, o que atesta as análises das medições radiométricas realizadas nas areias do rio Potengi, no trecho correspondente às comunidades de Igreja Nova e Jacobina.

Vários grãos foram analisados na tentativa de identificar e quantificar os elementos de terras raras (Figura 2)

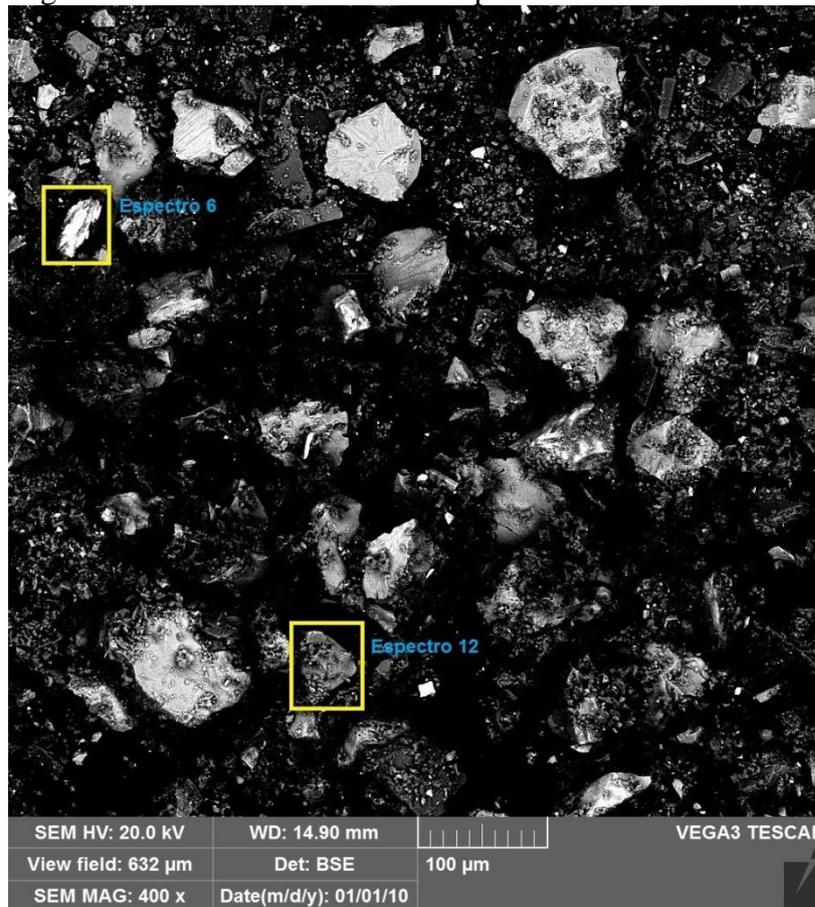
Figura 2 – Apontamentos dos espectros nos grãos selecionados – concentração metálica de areia



Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Dentre os grãos analisados pelo MEV/EDS, dois deles mereceram destaque especial e estão representados pelos espectros 6 e 12 (Figura 3), já que, diferente dos outros grãos, identificaram características de elementos da família dos lantanídeos, o que confirma a presença de grupos minerais importantes como a presença de elementos Terras Raras como o cério, já identificado por EDX. Além disso, com a técnica MEV/EDS foi possível a identificação de outros ETR's como: La, Ce, Sm, Nd, Gd, Eu e Tb.

Figura 3– Grãos de areia onde os espectros identificaram ETR



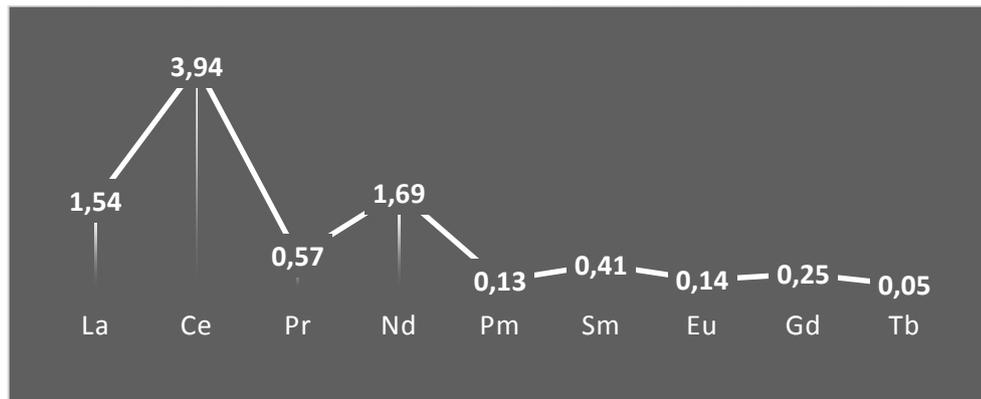
Fonte: Dados da pesquisa (2017)

Analisando especificamente os óxidos apontados pelos espectros 6 e 12 os quais apontaram a presença de ETR, considerados raros por conta da dificuldade de sua separação. Apresentam-se como elementos de suma importância para a indústria, principalmente na indústria de alto nível tecnológico.

Os ETR's apresentam uma porcentagem baixa nos grãos em relação aos outros elementos, mas devem ser considerados devido sua importância. Os metais de terras raras com maior porcentagem ficam por conta do Cério (3,94%), Neodímio-Nd (1,69%) e Lantânio-La (1,54); em menores porcentagens estão o Praseodímio-Pr (0,57%), Samário-Sa (0,41%), Gadolínio-Gd (0,25%), Európio-Eu (0,14%), Proméio-Pm (0,13%) e o Térbio-Tb (0,05%).

A leitura que detectou a presença de ETR na análise em EDS está disposta conforme gráfico 7 abaixo:

Gráfico 7 – Percentual dos elementos terras raras nas amostras analisadas



Fonte: Dados da pesquisa (2017)

No rio Potengi, como citado ao longo do estudo, a maior atividade de exploração mineral fica por conta da extração de areia, tanto em larga escala de forma mecanizada ou em menor escala com a exploração manual. Tal atividade se desenvolve com intuito de abastecer a construção civil da Região Metropolitana de Natal. Ainda não se identifica uma preocupação com a exploração e aproveitamento de materiais mais raros, como os de terras raras identificados neste estudo.

É importante destacar que em análises por energia dispersiva, por limitação da técnica utilizada, pode ocorrer sobreposição de elementos com energias próximas, sendo assim necessário atentar para o cunho semiquantitativo destas análises.

Contudo, a extração desses minerais para a aplicação no processo produtivo industrial pode acarretar impactos socioambientais irreversíveis para o ambiente local. Nesse sentido, as atividades de mineração ao longo do rio Potengi merecem uma atenção especial por parte dos órgãos públicos, pautada no planejamento e monitoramento não só da atividade em si, mas também do monitoramento do teor de elementos que compõem esses minerais, já que carregam em sua essência elementos radioativos e minerais pesados que podem ser prejudiciais para a saúde humana.

## 6 CONCLUSÃO

A análise radiométrica por meio dos equipamentos RS-125 Super-SPEC e RS-220 Super-IDENT apresentou-se como importante instrumento na identificação e mensuração de informações dos elementos responsáveis pela emissão de radiação das areias do rio Potengi.

Nas comunidades estudadas de Igreja Nova e Jacobina, os teores de urânio, tório e potássio variaram conforme a intensidade da interferência antrópica, e sua presença está atrelada a alguns fatores ambientais, como o tipo de rocha da região e a proximidade com esses corpos rochosos e a influência climática, que acabam por determinar a maior ou menor concentração desses isótopos.

Ainda vale destacar que a presença do urânio pode estar ligada também à presença de outros minerais pesados, como os elementos de terras raras, provenientes da característica de ambientes compostos por rochas ígneas, sendo necessários, assim, estudos radiométricos comparativos entre diferente tipos de rochas da região.

A presença do tório é favorecida na área estudada a partir do desenvolvimento de atividades antrópicas como a intensa atividade mineral, mais especificamente na exploração de areia no leito do rio Potengi.

Em relação às análises dos teores do gás radônio por meio das câmaras de ionização por eletretos, apresentaram-se como importante instrumento na mensuração de informações de radônio mapeados ao longo das areias do rio Potengi.

Nas comunidades estudadas de Igreja Nova e Jacobina, os teores de radônio variaram conforme a presença e intensidade da interferência antrópica. Assim como acontece com a presença do urânio e do tório, a presença do radônio está atrelada a alguns fatores ambientais como o tipo de rocha da região e a proximidade com esses corpos rochosos e a influência climática, que acabam por determinar as maiores e menores teores de radônio. E, como aponta a literatura estudada, a concentração de radônio oriunda do solo é um importante contribuinte na taxa de radônio que entra nas residências.

Mesmo apresentando teores pequenos na maioria das amostras de areia do rio Potengi, conforme levantado por alguns autores ao longo desse estudo, qualquer exposição ao gás radônio é prejudicial à saúde, independentemente de seus níveis de concentração, assim contrair câncer pode estar diretamente ligado ao período de exposição ao radônio.

Em termos de minerais pesados, as areias do rio Potengi apresentaram-se como ricas em oxigênio, alumínio e cálcio, o que chama a atenção é a presença de elementos metálicos da família dos lantanídeos como o Cério, Neodímio, Lantânio, Praseodímio, Samário,

Gadolínio, Európio, Promédio e o Tértbio, elementos esses caracterizados como elementos Terras Raras e que ocorrem na monazita em areias de paleopraias. Sua exploração implica diversos impactos ao meio ambiente, já que, para isso, é necessário o emprego de produtos químicos como solução para remoção dos minérios de interesse, o que acarretaria a percolação de químicos contaminando o solo local. Logo, a extração desses minerais para a aplicação no processo produtivo industrial pode acarretar em impactos socioambientais irreversíveis para o ambiente local.

Os resultados, de caráter semiquantitativo, nas análises de MEV/EDS apresentados nesta pesquisa, apontam (ou indicam) a importância de aprofundamento nas pesquisas referentes aos ETR nesta localidade.

Portanto, o uso das areias do rio Potengi na construção civil deve ter uma atenção especial pelos órgãos reguladores e fiscalizadores para o monitoramento dos teores dos elementos radioativos nessas areias, pois podem ser um fator de risco para a população, já que, além de possuírem minerais pesados, contêm níveis de radônio e sua utilização na construção de casas, prédios, escolas, shoppings, pode ocasionar na contração de doenças. Assim, as areias do rio são importantes contribuintes na emanção de radônio para o ambiente urbano, trazendo uma preocupação para a população em geral, uma vez que traz riscos para a saúde, principalmente o de contrair câncer pulmonar.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, Júlio Carlos. Elemento químico radônio. **Química Nova na Escola**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 4, p. 267-268, nov. 2009.
- ANDRADE, Romualdo Homobono Paes de. **Sumário mineral**: terras raras. Ministério de Minas e Energia - Departamento Nacional de Produção Mineral. Mato Grosso do Sul, 2014.
- AQUINO, Katia Aparecida da Silva. **Radioatividade e meio ambiente**: os átomos instáveis da natureza. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2012. (Coleção Química no Cotidiano, v.8).
- BARBOSA, Laércio. **Análise da concentração de radônio 222 nas águas subterrâneas e solo de Curitiba e Região Metropolitana**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2011.
- BELLINTANI, Sandra. Aparecida; GILI, Fátima das Neves. **Noções básicas de proteção radiológica**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002. Disponível em: <[www.engeworks.com.br/arquivos/proteção%radiologica.pdf](http://www.engeworks.com.br/arquivos/proteção%radiologica.pdf)>. Acesso em: 17 out. 2015.
- BIOMATION. **Eletrect ion chaben**: decision radon fact sheet. Disponível em [http://biomation.com/radon/fact\\_sheet.htm](http://biomation.com/radon/fact_sheet.htm). Acesso em: 16 de maio de 2016.
- BRITO, Adelson Silva de. **Medição de concentrações de radônio em ambientes da Região Metropolitana de Salvador-BA**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado em Saúde, Ambiente e Trabalho) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, Senado, 1998.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República. **Decreto lei nº 277 de 28 de fevereiro de 1967**. Código de Mineração e dá outras providencias. Brasília, 1967.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República. **Lei nº 6.567 de 24 de setembro de 1978**. Dispõe sobre regime especial para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais que especifica e dá outras providências. Brasília, 1978.
- \_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Manual de normas e procedimentos para licenciamento ambiental no setor de extração mineral**. Brasília, 2001.
- \_\_\_\_\_. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba**. MINEROPAR. Curitiba, 2004.
- \_\_\_\_\_. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2011.
- BRITO, Adelson Silva. **Medição da concentração de radônio em ambientes da Região Metropolitana de Salvador, BA**. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em saúde, ambiente e trabalho) – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2013.

BROW, Geoff. et al. **Os recursos físicos da terra: materiais de construção e outras matérias brutas.** Tradução de Luiz Augusto Miliani Martins – Campinas, São Paulo: Editora UNICAMP, 1995.

CAMARGO, Iara Maria Carneiro. **Determinação da concentração de isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água.** Dissertação (Mestrado em Dissertação (Mestrado em Ciências na área Nuclear) – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Instituto de pesquisa energéticas e nucleares, CDTN/IPEN, São Paulo, 1994.

CAMPOS, Thomas Ferreira da Costa et al. O gás radônio doméstico e a radioatividade natural em terrenos metamórficos: o caso do município de Lucrécia, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, vol. 26, n. 2, p. 85-93, 2013a.

CAMPOS, Thomas Ferreira da Costa et al. O gás radônio e a radiação natural em terrenos metagraníticos e pegmatíticos: o caso do município de Lajes Pintadas, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, vol. 26, n. 2, p. 45-52, 2013b.

CARDOSO, Eliezer de Moura. **Radioatividade:** apostila educativa. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, 2006.

CAVALCANTE, Fernanda. **Avaliação das doses efetivas e efetivas coletivas da radiação natural na região de Ribeirão Preto (SP).** 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2012.

CAVALCANTI NETO, Mário Tavares de Oliveira; ROCHA DA ROCHA, Alexandre Magno. **Noções de prospecção e pesquisa mineral para técnicos de geologia e mineração.** Natal/RN: Editora do IFRN, 2010.

CHASSOT, Attico. Raios X e radioatividade. **Química Nova na Escola.** v.2, nov. 1995.

COLE, Leonard A; **Element of risk: the politics of radon.** New York: Oxford University Press, 1993.

COSTA, Lucas José Pereira da. **Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências.** 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-03042012-135433/pt-br.php>>. Acesso em: 30 ago. 2015.

COTHERN, Richard C; SMITH JR, James E. Environmental radon. **Environmental Science research**, v.35. New York, Plenum press, 1987.

CRUZ, Rita de Cássia Chagas da. C. et al. Análise química de minerais pesados presentes nas areias do Rio Potengi. In: V SEMANA DE QUÍMICA, 2017, Nova Cruz. **Anais...** Nova Cruz: Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2017.

DIAMANTINO, Alexandre Greca; NICOLAU, Renata Amadei. Raio-x, edx e mev como métodos de avaliação do processo de reparação do tecido ósseo: revisão de literatura. In: IX

ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 2011. Paraíba. **Anais...** Paraíba: Universidade do Vale do Paraíba, 2011.

EISENBUD, Merrill; GESELL, Thomas. **Environmental radioactivity**. San Diego, Califórnia, 1997.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Radon (Rn)**. New York, 2013. Disponível em: <<http://epa.gov/radon/>>. Acesso em: 5 de abr. 2016.

FERREIRA NETO, Manoel Henrique. **Projeto materiais da construção civil na região metropolitana de natal**. Recife: CPRM, 2015.

FERREIRA, Ademar de Oliveira. **Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil**. 2013. 114 f. Tese (Doutorado em Ciência na área Nuclear) - Instituto de pesquisa energéticas e nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

FIANCO, Ana Clara Butelli. **Concentrações de radônio nas águas subterrâneas, rochas e solos de Porto Alegre (RS)**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projeto de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUERRA, A. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008.

LARA, Evelise Gomes. **Radônio nos gases do solo: distribuições e correlações com litologias e pedologias da RMBH**. 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado em Dissertação (Mestrado em Ciências na área Nuclear) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2013.

KOTRAPPA, Paul. **E-PERM(R) System Manual**. Rad Elec, Inc, 2007.

KOTRAPPA, Paul; STIEFF, F. Radon Exhalation Rates from Building Materials Using Electret Ion Chamber Radon Monitors in Accumulators. **Health Physics**, v. 97, n. 2, p. 163-166, 2009.

KOTRAPPA, Paul. An Electret Passive Environmental <sup>222</sup>Rn Monitor Based On Ionization Measurement. **Health Physics**. vol. 54, n. 1, p. 47-56, 1988.

MASCARENHAS, João de Castro et al. **Diagnóstico do município de São Gonçalo do Amarante: Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do Estado do Rio Grande do Norte**, Recife: CPRM, 2005.

MERÇON, Fábio; QUADRAT, Samantha Viz. A radioatividade e a história do tempo presente. **Química Nova na Escola**, v.19, mai. 2004.

MUJALLI, Gibran Romero. **Espectrometria de raios gama e concentrações de radônio em solos da região do maciço sienítico piquiri, município de Cachoeira do Sul/Encruzilhada**

**do Sul-RS**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CAVALCANTI NETO, Mário Tavares de Oliveira; ROCHA DA ROCHA, Alexandre Magno. **Noções de prospecção e pesquisa mineral para técnicos de geologia e mineração**. Natal/RN: Editora do IFRN, 2010.

NEVES, Luís F; PEREIRA, Alcides C. Radioatividade natural e ordenamento do território: o contributo das Ciências da Terra. **Geonovas**, n. 18, p.103-114, 2004.

NEUMANN, Reiner et al. **Caracterização tecnológica de minérios**. Centro de Tecnologia Mineral - Ministério do Meio Ambiente, Rio de Janeiro, 2004.

OCCUPATIONAL SAFETY & ADMINISTRATION. **Radon in Workplace Atmospheres**. United States Department of Labor, 2010. Disponível em: <[www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html](http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html)>. Acesso em: 12 jun. 2016.

OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. São Paulo-SP. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v27n77/v27n77a14.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2016.

OLIVEIRA, Danillo Silva de. **Um estudo sobre desequilíbrio radioativo da série do urânio em amostras de solo**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

OLIVEIRA, Flávia Lopes; MELLO, Edson Farias. A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. **Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 374-389, junho, 2007.

OLIVEIRA, Flávia Lopes; MELLO, Edson Farias. A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. **Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 374-389, junho, 2007.

PETTA, Reinaldo Antonio; CAMPOS, Thomas Ferreira da Costa. O gás radônio e suas implicações para a saúde pública. **Revista de Geologia**, v. 26, n° 2 e 7. p. 7-18. 2013. Disponível em: <[www.revistadegeologia.ufc.br](http://www.revistadegeologia.ufc.br)>. Acesso em: 16 out. 2015.

PFALTZGRAFF, Pedro Augusto dos Santos. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte** – Recife. CPRM, 2010.

QUEIROZ et al. Estudo sobre teores de tório, urânio e potássio nas águas superficiais e sedimento marginal do Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 371-380, mar/abr, 2017.

RADELEC; How E-PERM's; Rad. Elec. Inc, 2011. Disponível em <http://radelec.com> . Acesso em: 03 Jun 2016.

RIO GRANDE DO NORTE. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA). **Perfil do seu município: São Gonçalo do Amarante**. Coordenadoria de Estudos Socioeconômicos, Natal, 2013.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar Estadual nº 315, de 30 de novembro de 2005.** Que altera dispositivos da lei complementar n.º 152, de 16 de janeiro de 1997, que dispõe sobre a região metropolitana de natal, e dá outras providências, Natal, 2005.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar Estadual nº 04, de 12 de dezembro de 2006.** Estabelece parâmetros e critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor/degradador, dos empreendimentos e atividades efetiva ou potencialmente poluidores, Natal, 2006.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar Estadual nº 391, de 22 de julho de 2009.** Altera dispositivos da lei complementar n.º 315, que dispõe sobre a região metropolitana de natal, e dá outras providências, Natal, 2009.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar Estadual nº 485, de 25 de fevereiro de 2013.** Altera dispositivos da lei complementar n.º 391, que dispõe sobre a região metropolitana de natal, e dá outras providências, Natal, 2013.

\_\_\_\_\_. **Lei Complementar Estadual nº 540, de 27 de julho de 2015.** Altera dispositivos da lei complementar n.º 485, que dispõe sobre a região metropolitana de natal, e dá outras providências, Natal, 2015.

ROCHA, Edilson Accioly. **Avaliação da taxa de dose devido aos granitos ornamentais em ambientes públicos e privados na cidade do Recife-Pernambuco-Brasil.** 2012. 77 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/12452/Tese%20de%20Ed%20C3%ADIs%20on%20Accioly%20Rocha%20DEN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 06 mai. 2017.

SANCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** São Paulo. Oficina de Textos, 2008.

SANTOS, Talita de Oliveira. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte-RMBH.** 2010. 147 f. Dissertação (Mestrado em ciências e técnicas nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.

SILVA, Márcia Gomes da. **Caracterização de minerais pesados ao longo do rio Piranhas-Açu/RN: distribuição e proveniências.** 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

TEIXEIRA, Wilson; et al. **Decifrando a terra.** Editora: Nacional, 2009.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects os Atomic Radiation, Sources and **Effects oh Ionizing Radiation,** 2000.

World Health Organization. **Who Handbook on Indoor Radon: a public health,** France, 2009.



## ANEXO A – Diretrizes para submissão à Revista REDE



## REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA

ISSN 1982-5528

Endereço eletrônico: <http://www.revistarede.ufc.br/>

### Submissões Online

### Diretrizes para Autores

Os trabalhos para publicação nos periódicos da REDE - Revista Eletrônica do ProdeMA deverão ser **inéditos na íntegra** e sua publicação não deve estar pendente em outro local. Uma vez aceito o artigo considera-se licenciado para a REDE com exclusividade para o veículo digital, pelo prazo de duração dos direitos patrimoniais do autor.

### Tipos de artigos aceitos

- 1. Artigos originados por pesquisas** - trabalhos resultantes de pesquisas original (dissertações, tese, grupos de pesquisas), cujo texto deve ser inédito na íntegra e ter um mínimo de 10 e máximo de 15 páginas (A4).
- 2. Artigos de revisão** - devem abordar de forma crítica temas ou assuntos de interesse atual. Os artigos de revisão devem ter um mínimo de 10 e máximo de 15 páginas, (A4).
- 3. Resenhas** - relatam uma crítica ou uma pergunta com base em assunto atual. Esses são geralmente a partir de convites pelo Conselho Editorial desta Revista. No final do texto a literatura selecionada para análise da temática deve constar, contudo esta não necessita ser citada no texto. As resenhas devem ter um mínimo de 08 e máximo de 10 páginas (A4).
- 4. Edição especial** - a revista REDE está aberta a edições especiais, que seguirão as mesmas normas dos artigos anteriormente descritos.

Os artigos deverão ser encaminhados para a Revista com as seguintes características:

### Estrutura dos artigos

- Folha: A4
- Editor de texto: Word for Windows
- Margens: esquerda e superior de 3 cm; direita e inferior de 2 cm
- Fonte: *Times New Roman*, tamanho 12
- Parágrafo: 1,0 cm
- Espaçamento: simples
- Alinhamento: justificado
- A minuta do artigo deve ter, no máximo, **2MB**

### **Primeira página**

- Título, em maiúsculas e negrito (português e inglês) e centralizado
- Resumo em português, com até 150 palavras, justificado, espaço simples e seguido, logo abaixo, de três palavras-chaves
- *Abstract*, com até 150 palavras, justificado e seguido, logo abaixo, de três *key words*

### **Conteúdo dos artigos**

- Introdução (incluindo neste item os objetivos da pesquisa e revisão de literatura, que seja capaz de dialogar com os resultados apresentados).
- Metodologia
- Resultados e discussões
- Conclusões
- Referências

**Referências:** constar apenas o que foi citado no corpo do texto. As referências completas deverão ser apresentadas em ordem alfabética, de acordo com as normas da ABNT (NBR 6023, 2002), seguindo o padrão AUTOR (DATA), no final de todo o texto com o título de Referências.

**Ilustrações:** serão consideradas ilustrações os mapas, esquemas, fluxogramas, fotografias, gráficos, mapas, organogramas, plantas e quadros, que devem ser numeradas consecutivamente e inseridas no texto com a extensão ".jpg", resolução mínima de 300 "dpi" e nitidez das características de interesse. Os títulos das figuras devem ser colocados na parte inferior, com a primeira palavra em maiúsculas, seguida de seu número de ordem de ocorrência no texto, em algarismo arábico, do respectivo título e fonte. Ex.: Figura 1: Mapa de Fortaleza. **Atenção: Somente inserir figuras se elas refletirem um aprofundamento do assunto analisado.**

**Tabelas:** as tabelas apresentam informações tratadas estatisticamente, conforme IBGE (1993). O Título situa-se na parte superior da tabela, seguida de seu número de ordem de ocorrência e fonte, na parte inferior. Sua posição deve constar no próprio texto e estar referenciada.

## ANEXO B - Comprovante de submissão de artigo científico na revista REDE



**REDE**  
REVISTA ELETRÔNICA  
DO PRODEMA

ISSN 1982-5528

## REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA

---

**Usuário**

Logado como...  
ozenildo

- [Perfil](#)
- [Sair do Sistema](#)

---

**Autor**

**Submissões**

- [Ativo](#) (1)
- [Arquivo](#) (0)
- [Nova Submissão](#)

---

**Idioma**

Português (Brasil) ▼

---

**Conteúdo Da Revista**

**Pesquisa**

### #445 Avaliação

[RESUMO](#)   [AVALIAÇÃO](#)   [EDIÇÃO](#)

**Submissão**

Autores: Ozenildo Gil Silva de Souza, Mário Tavares de Oliveira Cavalcanti Neto 

Título: CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO NATURAL DAS AREIAS DO RIO POTENGI NO TRECHO EQUIVALENTE AO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE-RN

Seção: Artigos

Editor: Nenhum(a) designado(a)

---

**Por Pares**

Rodada 1

Versão da Avaliação: [445-980-1-RV.DOCX](#) 2017-07-20

Iniciado: —

Última alteração: —

Documento transferido: Nenhum(a)

---

**Decisão Editorial**

Decisão: —

Notificar Editor:  Registro de E-mails Editor/Autor 

Versão do Editor: Nenhum(a)