



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Carla Cristine Aguiar Neto

**Caracterização isotópica (Nd-Sr) e litogeoquímica de sedimentos atuais da  
Namíbia (África): implicações para proveniência sedimentar e potencial  
fonte de aerossol**

Rio de Janeiro

2018

Carla Cristine Aguiar Neto

**Caracterização isotópica (Nd-Sr) e litogeoquímica de sedimentos atuais da Namíbia (África): implicações para proveniência sedimentar e potencial fonte de aerossol**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias - Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Morisson Valeriano

Coorientador Prof. Dr. Heitor Evangelista da Silva

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

N469 Neto, Carla Cristine Aguiar.  
Caracterização isotópica (Nd-Sr) e litogeoquímica de sedimentos  
atuais da Namíbia (África) : implicações para proveniência sedimentar e  
potencial fonte de aerossol / Carla Cristine Aguiar Neto. – 2018.  
218 f. : il.

Orientador: Claudio de Morisson Valeriano.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Faculdade de Geologia.

1. Geoquímica – Isótopos – Teses. 2. Geologia estratigráfica –  
Namíbia(África) – Teses. 3. Geologia isotópica – Namíbia (África) –  
Teses. 4. Namibe, Deserto do (África) – Sedimentos – Teses. I.  
Valeriano, Claudio de Morisson. II. Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 550.4(688.1)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7: 5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta  
dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Carla Cristine Aguiar Neto

**Caracterização isotópica (Nd-Sr) e litogeoquímica de sedimentos atuais da Namíbia (África): implicações para proveniência sedimentar e potencial fonte de aerossol**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análises de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias - Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais.

Aprovada em 04 de outubro 2018.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Claudio de Morisson Valeriano (Orientador)

Faculdade de Geologia - UERJ

---

Prof. Dr. Heitor Evangelista da Silva (Coorientador)

Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Monica Heilbron

Faculdade de Geologia - UERJ

---

Prof. Dr. Everton Bongioiolo

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2018

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Fátima e Mario Paulo.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, coordenador e amigo Dr. Claudio de Morisson Valeriano pelos ensinamentos e incentivo.

Ao meu co-orientador Dr. Heitor Evangelista pelos ensinamentos e contribuições.

Aos meus amigos de trabalho Gilberto Vaz e João Ricardo do LAGIR-UERJ pela ajuda nas preparações químicas para análise isotópica.

Ao apoio logístico do Serviço Geológico da Namíbia (SGN).

Ao grupo de funcionários do LGPA-UERJ, Gabriela, Thiago, Marcos e Diego por todo auxílio fornecido.

Ao Dr. Reiner Neumann e os funcionários Josimar e “Nininho” do CETEM-UFRJ pelo apoio na preparação das amostras para DRX.

Aos meus amigos que me ensinaram e ajudaram no ArcGIS: Dr. Corbiniano Silva (Pós-doc PPG UERJ), André Fedele (UERJ) e Felipe (PPG da UFRJ).

Ao amigo Luiz Eduardo (UFF) pela ajuda na etapa final de edição de imagens.

Ao Sérgio Gonçalves do Lab-Air-UFPR pela visita e explicação da operação do Cascade MOUDI™.

Ao Pedro Dionelo (IC-FAPERJ-UERJ) pelo apoio no peneiramento das amostras e descrição das lâminas petrográfica.

## RESUMO

NETO, Carla Cristine Aguiar. **Caracterização isotópica (Nd-Sr) e litogeoquímica de sedimentos atuais da Namíbia (África):** implicações para proveniência sedimentar e potencial fonte de aerossol. 2018. 206 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O propósito deste estudo é verificar se as composições isotópicas de Nd e Sr de rocha total e da fração silte grosso (36-64  $\mu\text{m}$ ) dos sedimentos fluviais atuais em ambiente desértico refletem as assinaturas isotópicas dos terrenos geológicos próximos. Outro objetivo é definir o campo de composições isotópicas de Nd e Sr da fração fina (1,8-18  $\mu\text{m}$  e < 1,8  $\mu\text{m}$ ) das mesmas amostras para estudos de proveniência no deserto de Namibe. A caracterização química e mineralógica dos sedimentos em rocha total e silte grosso (36-64  $\mu\text{m}$ ) foi realizada para corroborar o estudo isotópico e verificar se as amostras de sedimentos correspondem a média ponderada de todas as unidades estratigráficas da sub-bacia através do estudo de modelagem e mistura isotópica. A composição mineralógica de nove amostras em rocha total e oito da fração silte grosso foi obtida através de Difração de raios-X com estimativa semi-quantitativa por refinamento Rietveld. A composição elementar dessas amostras em rocha total e cinco da fração silte grosso dos elementos maiores, traços e terras raras foi obtida por ICP-MS. As razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  em rocha total e oito das frações (36-64  $\mu\text{m}$ , 1,8-18  $\mu\text{m}$  e < 1,8  $\mu\text{m}$ ) foram analisadas por espectrometria de massas por termo-ionização (TIMS). Os resultados mostram, em geral, fracionamento mineralógico e químico, nos elementos maiores, traços, elementos terra raras entre a rocha total e a fração silte grosso. Os resultados isotópicos obtidos em rocha total e na fração (36-64  $\mu\text{m}$ ) foram comparados, no diagrama  $\epsilon\text{Nd}(0)$  X  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(0)$ , com as assinaturas isotópicas dos principais terrenos geológicos regional, em um banco de dados construído a partir da literatura. As análises das frações mais finas foram comparadas verificando que existe, em geral, um fracionamento de Sr e Nd entre elas e a rocha total, porém sem tendência linear. O estudo conclui que a assinatura de cada amostra, como esperado, reflete aquela das associações litológicas próximas, ou com indicações isotópicas de mistura isotópica de duas ou mais áreas fontes. No estudo de modelagem isotópica, verificou-se que os sedimentos não correspondem à média ponderada de todas as unidades litoestratigráficas aflorantes em cada sub-bacia, indicando que os sistemas fluviais efêmeros não são eficientes em promover mistura de todas as unidades. Em 4 amostras, o modelo de mistura isotópica de dois componentes (unidades próximas), mostra que a diferença de  $\epsilon(\text{Nd})$  medido e da média ponderada da literatura, diverge menos de 19%. Por outro lado, 4 amostras não apresentaram curva de mistura pois o valor de  $\epsilon(\text{Nd})$  medido é próximo ao valor de uma unidade adjacente à coleta. Comparando as composições isotópicas de poeira do deserto do Sahara e loess do deserto do Kalahari com os resultados obtidos no deserto de Namibe, verifica-se uma grande semelhança entre 6 amostras (< 18  $\mu\text{m}$ ) desse estudo com assinaturas isotópicas do Sahara, e com 2 amostras, uma assinatura intermediária entre os desertos do Kalahari e do Sahara.

Palavras-chave: Deserto Namibe. Sedimentos Fluviais. Silte grosso. Isótopos Radiogênicos. Proveniência. Mistura isotópica.

## ABSTRACT

NETO, Carla Cristine Aguiar. **Isotopic (Nd-Sr) and lithochemical characterization of the Namibian (Africa) present sediments**: implications for the sedimentary provenance and potential source of aerosol. 2018. 206 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The purpose of this study is to verify whether the isotopic compositions of Nd and Sr of whole rock and the coarse silt fraction (36-64  $\mu\text{m}$ ) of present fluvial sediments in desert environment reflect the isotopic signatures of the nearby geological terrains. Another purpose is to define the field of isotopic compositions of Nd and Sr of the fine fraction (1.8-18  $\mu\text{m}$  and <1.8  $\mu\text{m}$ ) of the same samples for provenance studies in the Namib Desert. The chemical and mineralogical characterization of sediments in whole rock and coarse silt (36-64  $\mu\text{m}$ ) was performed to corroborate the isotopic study and to verify if the sediment samples correspond to the weighted average of all the stratigraphic units of the sub-basin through the study of modeling and isotopic mixing. The mineralogical composition of nine samples in whole rock and eight of the coarse silt fraction was obtained by X-ray diffraction with semiquantitative estimative by Rietveld's refinement. The elemental composition of these samples in whole rock and five of the coarse silt fraction of the major, traces and rare earths elements was obtained by ICP-MS. The isotopic ratios  $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$  and  $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$  in the whole rock and eight fractions (36-64  $\mu\text{m}$ , 1.8-18  $\mu\text{m}$  and <1.8  $\mu\text{m}$ ) were analyzed by Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS). The results show, in general, mineralogical and chemical fractionation, in the major, traces and rare earth elements between the whole rock and the coarse silt fraction. In the diagram  $\epsilon\text{Nd}(0) \times ^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}(0)$ , the isotopic results obtained in whole rock and coarse silt fraction (36-64  $\mu\text{m}$ ) were compared with the isotopic signatures of the main regional geological terrains using a database built from the literature. The analysis of the finer fractions were compared, and it was verified that there is, in general, a fractionation of Sr and Nd between them and the whole rock, but without linear tendency. The study concludes that the signature of each sample, as expected, reflects that of the nearby lithological associations, or with isotopic indications of isotopic mixing of two or more source areas. In the isotope modeling study, it was verified that the sediments did not correspond to the weighted average of all lithostratigraphic units exposed in each sub-basin, indicating that ephemeral fluvial systems are not efficient in promoting the mixing of all units. In four samples, the two-component isotopic mixing model (near units) shows that the difference of  $\epsilon$  (Nd) measured and the weighted average of the literature diverge below 19%. On the other hand, four samples do not show a mixing curve, because the measured  $\epsilon$  (Nd) value is close to the value of one unit adjacent to the collection. Comparing the isotopic compositions of the Saharan dust with the result of the Namib Desert, there is a great similarity between six samples (<18  $\mu\text{m}$ ) of this study with isotopic signatures of the Sahara, and two samples, an intermediate signature between the Kalahari and Sahara deserts.

Keywords: Namib Desert. Fluvial Sediments. Coarse Silt.. Radiogenic Isotopes. Provenience. Isotopic mixture.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Continente Africano e mapa da Namíbia o.....	22
Figura 2 –	Elevação e relevo da Namíbia.....	24
Figura 3 –	Mapa hidrográfico com as principais bacias hidrográficas e os principais rios.....	25
Figura 4 –	Deserto de Namib, deserto do Kalahari e pluviosidade.....	26
Figura 5 –	Mapa do Supercontinente Gondwana.....	27
Figura 6 –	Mapa da localização dos Complexos intrusivos Damaraland.....	29
Figura 7 –	Mapa geológico simplificado do Noroeste da Namíbia.....	31
Figura 8 –	Amostras de sedimentos.....	33
Figura 9 –	Amostra quarteada.....	34
Figura 10 –	Pulverizador: moinho de bolas.....	34
Figura 11 –	Agitador de peneiras – LGPA.....	36
Figura 12 –	Sistema Cascade MOUDI™.....	37
Figura 13 –	Estágios de separação do MOUDI™.....	38
Figura 14 –	Operação de ressuspensão de amostra no MOUDI™.....	39
Figura 15 –	Balança de alta precisão analítica.....	39
Figura 16 –	Amostra com resina epóxi.....	42
Figura 17 –	Diagrama $\epsilon$ (Nd) X $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	46
Figura 18 –	Espectrômetro de massa TRITON – LAGIR.....	47
Figura 19 –	Balança de precisão analítica.....	48
Figura 20 –	Colunas de troca iônica.....	48
Figura 21 –	Deposição de amostra em filamento.....	49
Figura 22 –	Distribuição granulométrica.....	51
Figura 23 –	Gráfico do percentual acumulado.....	55
Figura 24 –	Gráfico de barras de distribuição granulométrica (% em massa) .....	56
Figura 25 –	Gráfico ternário cascalho-areia-silte+argila.....	56
Figura 26 –	Curva granulométrica com detalhe nas frações $<10\ \mu\text{m}$ .....	56
Figura 27 –	Fotomicrografia com os componentes da amostra NA-104.....	58
Figura 28 –	Fotomicrografia com os componentes das amostras NA-009B, NA-043 e NA108.....	60

Figura 29 – Fotomicrografia com os componentes das amostras NA-112, NAM-28 e NAM-23.....	61
Figura 30 – Fotomicrografia com os componentes da amostra NAM-05.....	62
Figura 31 – Diagramas dos minerais fração fina H (36-64 $\mu\text{m}$ ) normalizado em relação a rocha total.....	65
Figura 32 – Diagrama QAP.....	66
Figura 33 – Diagrama <i>Spiderplot</i> de elementos maiores das amostras RT normalizados pela Crosta Continental Superior (CCS) .....	69
Figura 34 – Diagrama <i>Spiderplot</i> de elementos menores das amostras de RT normalizados pela Crosta Continental Superior (CCS) .....	70
Figura 35 – Diagrama <i>Spiderplot</i> de elementos maiores das amostras da fração silte grosso normalizados por PAAS .....	72
Figura 36 – Diagrama <i>Spiderplot</i> de elementos menores das amostras da fração silte grosso normalizados por PAAS de McLENNAN (1989) .....	73
Figura 37 – Diagrama de elementos terras raras na fração normalizado pelo condrito	75
Figura 38 – Diagrama do fracionamento dos elementos químicos das amostras .....	76
Figura 39 – Diagrama de $\epsilon$ (Nd) X $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de dados da literatura das principais unidades litoestratigráficas .....	79
Figura 40 – Composição de Nd e Sr das amostras estudadas. Rocha total (RT) e fração silte grosso H (36-64 $\mu\text{m}$ ) em relação a dados da literatura para as diferentes unidades litoestratigráficas .....	80
Figura 41 – Gráfico de colunas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da rocha total e fração silte grosso das amostras de sedimentos versus gráfico de barras dos principais terrenos geológicos .....	81
Figura 42 – Gráfico de colunas $\epsilon$ (Nd) da rocha total e fração silte grosso das amostras de sedimentos versus gráfico de barras dos principais terrenos geológicos .....	81
Figura 43 – Diagrama da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus a fração granulométrica das amostras estudadas.....	83
Figura 44 – Diagrama de $\epsilon$ (Nd) versus a fração granulométrica das amostras estudadas.....	84
Figura 45 – Diagrama de todas as frações isotópicas analisadas.....	85
Figura 46 – Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da	

	amostra NAM-05.....	90
Figura 47 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NA-009B.....	91
Figura 48 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NAM-23.....	92
Figura 49 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NAM-28.....	95
Figura 50 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NA-104.....	96
Figura 51 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NA-108.....	99
Figura 52 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NA-112.....	100
Figura 53 –	Mapa geológico com elevação de terreno da bacia hidrográfica da amostra NA-071.....	102
Figura 54 –	Mapa geológico com elevação de terreno do local da amostra NA-043....	103
Figura 55 –	Hipérbole de mistura de dois componentes.....	107
Figura 56 –	Modelagem isotópica da amostra NAM-05 com as curvas de mistura MIX-1, MIX-2 e MIX-3.....	110
Figura 57 –	Modelagem isotópica da amostra NA-009B com as curvas de mistura MIX-1, MIX-2, MIX-3 e MIX-4.....	114
Figura 58 –	Modelagem isotópica da amostra NAM-23 com as curvas de mistura MIX-1, MIX-2 e MIX-3.....	117
Figura 59 –	Modelagem isotópica da amostra NAM-28 com as curvas de mistura MIX-1, MIX-2 e MIX-3.....	120
Figura 60 –	Modelagem isotópica da amostra NA-104 com as curvas de mistura MIX-1 e MIX-2.....	123
Figura 61 –	A amostra NA-108 sem as curvas de mistura de modelagem isotópica ...	124
Figura 62 –	A amostra NA-112 sem as curvas de mistura de modelagem isotópica.....	125
Figura 63 –	A amostra NA-071 sem as curvas de mistura de modelagem isotópica.....	126
Figura 64 –	A amostra NA-043 sem as curvas de mistura de modelagem isotópica.....	127
Figura 65 –	Diagrama de comparação das assinaturas isotópicas das frações finas das amostras de sedimentos da Namíbia com aerossóis e loess.....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Informações gerais das amostras estudadas.....	23
Tabela 2 –	Estágios do MOUDI™ X diâmetro aerodinâmico.....	37
Tabela 3 –	Bacias de drenagens e cartas base utilizadas, com escalas e referências....	40
Tabela 4 –	Informações das amostras sobre localização geológica, maturidade textural, tipo de afloramento e granulometria predominante.....	52
Tabela 5 –	Massas da separação por peneiramento e aerodinâmico.....	53
Tabela 6 –	Principais características petrográfica das amostras estudadas.....	59
Tabela 7 –	Análise mineralógica.....	64
Tabela 8 –	Composição química de (rocha total) das amostras estudadas e da média da Crosta Continental Superior (CCS) .....	67
Tabela 9 –	Composição química da fração silte grosso das amostras estudadas e da média da dos folhelhos australianos PAAS ( <i>Post Archean Australian Shale</i> ) .....	71
Tabela 10 –	Razões isotópicas.....	77
Tabela 11 –	Síntese dos resultados e conclusão da modelagem de bacias.....	105
Tabela 12 –	Valores de concentrações e razões isotópicas para os “end members” dos modelos adotados de mistura de dois componentes da amostra NAM-05.....	108
Tabela 13 –	Valores de concentrações e razões isotópicas para os “end members” dos modelos adotados de mistura de dois componentes da amostra NA-009B.....	111
Tabela 14 –	Valores de concentrações e razões isotópicas para os “end members” dos modelos adotados de mistura de dois componentes da amostra NAM-23.....	115
Tabela 15 –	Valores de concentrações e razões isotópicas para os “end members” dos modelos adotados de mistura de dois componentes da amostra NAM-28.....	118
Tabela 16 –	Valores de concentrações e razões isotópicas para os “end members” dos modelos adotados de mistura de dois componentes da amostra NA-104.....	121

Tabela 17 – Síntese da modelagem de mistura isotópica de dois componentes.....	137
Tabela 18 – Síntese das unidades litoestratigráficas que contribuem para fração silte grosso.....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACT Labs	<i>Activation Laboratories Ltd</i>
Al	Alumínio
Au	Ouro
Ba	Bário
Ca	Cálcio
Ce	Cério
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CHUR	<i>CHondritic Uniform Reservoir</i>
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cs	Césio
Cu	Cobre
DRX	Difratometria de raios-X
ETR	Elementos terras raras
Eu	Európio
Fe	Ferro
FGEL	Faculdade de Geologia
GCDkit	<i>GeoChemical Data ToolKIT</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GSN	<i>Geological Survey of Namibia</i>
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido fosfórico
HCl	Ácido clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
Hf	Háfnio
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
ICP-MS	<i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>
INAA	<i>Instrumental Neutron Activation Analysis</i>
K	Potássio
La	Lantânio
Lab-Air	Laboratório de Análises e Qualidade do Ar
LAGIR	Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos
LARAMG	Laboratório de Radioecologia e Mudanças Globais
LGPA	Laboratório geológico de processamento de amostras
Lu	Lutécio
MDT	Modelo Digital de Terreno
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MORB	<i>Middle Ocean Ridge Basalt</i>
Na	Sódio
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
Nb	Nióbio
Nd	Neodímio
NGA	<i>National Geospatial-intelligence Agency</i>
Ni	Níquel
NO	Noroeste
P	Fósforo

PAAS	<i>Post Archean Australian Shale</i>
Pb	Chumbo
QAP	Quartzo, Álcali-feldspato e Plagiocásio
Rb	Rubídio
Re	Rênio
REE	<i>Rare Elements Earth</i>
RT	Rocha total
SA	<i>Source Area</i>
Sc	Escândio
Si	Silício
SIG	Sistemas de Informação Geográficas
Sm	Samário
SO	Sudoeste
Sr	Estrôncio
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
Ta	Tântalo
Tb	Térbio
TD-ICP	<i>Total Digestion - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>
Ti	Titânio
TIMS	<i>Thermal Ionization Mass Spectrometry</i>
UCC	<i>Upper Continental Crust</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
V	Vanádio
Y	Ítrio
Yb	Itérbio
Zn	Zinco
Zr	Zircônio

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
±	mais ou menos
µg	micrograma
µL	microlitro
µm	micrômetro
cm	centímetro
cm <sup>3</sup>	centímetros cúbicos
km	quilômetros
kV	quilovolts
mA	miliampere
min	minuto
mL	mililitro
nm	nanômetro
Θ	theta
°C	graus Celsius
pg	picograma
ppm	parte por milhão
α	Alfa
β	Beta
ε	épsilon
σ	sigma



## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	20
1.1	<b>Geral</b> .....	20
1.2	<b>Específicos</b> .....	20
2	<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	20
2.1	<b>Estrutura da Dissertação</b> .....	20
2.2	<b>Localização da área e das amostras estudadas</b> .....	21
2.3	<b>Aspectos fisiográficos</b> .....	24
3	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	27
3.1	<b>Contexto Geotectônico da Namíbia</b> .....	27
3.2	<b>Principais associações litológicas do Noroeste da Namíbia</b> .....	28
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	32
4.1	<b>Pesquisa bibliográfica</b> .....	32
4.2	<b>Amostragem</b> .....	32
4.3	<b>Preparação de amostras</b> .....	32
4.4	<b>Separações granulométricas</b> .....	35
4.4.1	Separações por peneiramento .....	35
4.4.2	Separação aerodinâmica .....	36
4.5	<b>Geoprocessamento</b> .....	40
4.6	<b>Aspectos petrográficos</b> .....	41
4.7	<b>Análise mineralógica por difração de raios-X</b> .....	42
4.8	<b>Análise química elementar</b> .....	42
4.9	<b>Análise isotópica de Estrôncio e Neodímio</b> .....	43
4.9.1	Decaimento radioativo .....	43
4.9.2	Geoquímica isotópica do Rb-Sr.....	43
4.9.3	Geoquímica isotópica do Sm-Nd.....	44
4.9.4	Diagrama $\epsilon$ (Nd) X $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .....	45
4.9.5	Procedimentos de separação química dos elementos (Sr e Nd) e espectrometria de massas .....	46
5	<b>RESULTADOS</b> .....	50

5.1	<b>Distribuição granulométrica.....</b>	50
5.1.1	Distribuição granulométrica da fração fina <10 µm.....	57
5.2	<b>Aspectos petrográficos da fração areia.....</b>	58
5.3	<b>Composição mineralógica.....</b>	62
5.3.1	Aplicação da mineralogia por Difração de raios-X na proveniência sedimentar...	66
5.4	<b>Composição geoquímica.....</b>	67
5.4.1	Aplicação da geoquímica no estudo de proveniência sedimentar.....	77
5.5	<b>Composição isotópica.....</b>	77
5.5.1	Fracionamento isotópico X tamanho do grão.....	82
5.5.2	Aplicação dos isótopos de Estrôncio e Neodímio no estudo de proveniência sedimentar.....	86
6	<b>MODELAGEM DE PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR USANDO ISÓTOPOS DE Nd E Sr E CORRELAÇÃO COM DADOS PETROGRÁFICOS, MINERALÓGICOS E GEOQUÍMICOS DA ROCHA TOTAL E FRAÇÃO SILTE GROSSO.....</b>	87
6.1	<b>Geologia das bacias hidrográficas e suas respectivas composições isotópicas.....</b>	87
6.1.1	Amostra NAM-05.....	88
6.1.2	Amostra NA-009B.....	88
6.1.3	Amostra NAM-23.....	89
6.1.4	Amostra NAM-28.....	93
6.1.5	Amostra NA-104.....	93
6.1.6	Amostra NA-108.....	97
6.1.7	Amostra NA-112.....	97
6.1.8	Amostra NA-071.....	101
6.1.9	Amostra NA-043.....	101
6.2	<b>Modelagem isotópica de mistura de áreas fontes da proveniência da rocha total e da fração silte grosso.....</b>	106
6.2.1	Modelagem isotópica da amostra NAM-05.....	107
6.2.2	Modelagem isotópica da amostra NA-009B.....	111
6.2.3	Modelagem isotópica da amostra NAM-23.....	115
6.2.4	Modelagem isotópica da amostra NAM-28.....	118
6.2.5	Modelagem isotópica da amostra NA-104.....	121

6.2.6	Modelagem isotópica da amostra NA-108 e NA-112.....	124
6.2.7	Modelagem isotópica das amostras NA-071 e NA043.....	125
6.3	<b>Integração dos dados petrográficos, mineralógicos e geoquímicos da rocha total e fração silte grosso a com a modelagem isotópica.....</b>	<b>127</b>
7	<b>IMPLICAÇÕES GLOBAIS PARA O ESTUDO DE AEROSSÓIS.....</b>	<b>133</b>
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>135</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE A – Ficha descritiva das amostras.....</b>	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE B – Preparação de amostras para Difração de raios-X (DRX) .....</b>	<b>181</b>
	<b>APÊNDICE C – Tabela de composição elementar.....</b>	<b>184</b>
	<b>APÊNDICE D – Composição dos elementos terras raras das amostras, PAAS e CCS normalizadas pelo condrito.....</b>	<b>186</b>
	<b>APÊNDICE E – Compilação dos dados dos terrenos geológicos.....</b>	<b>187</b>
	<b>APÊNDICE F – Compilação das médias ponderadas de <math>\epsilon</math> (Nd), <math>\epsilon</math> (Sr) e razão de Sr da literatura.....</b>	<b>202</b>
	<b>APÊNDICE G – Compilação das razões isotópicas de Nd e Sr e as concentrações das unidades litoestratigráficas das bacias hidrográficas.....</b>	<b>210</b>

## INTRODUÇÃO

Esta dissertação discute a proveniência e dispersão sedimentar no Noroeste da Namíbia (África) com base na caracterização mineralógica, química e isotópica de nove amostras sedimentos atuais e sua fração silte grosso. A região estudada se situa entre a capital Windhoek (latitude  $\sim 22,6^\circ$  S) e a fronteira com o sul da Angola (latitude  $\sim 17,2^\circ$  S). Caracteriza-se por uma variedade geológica, possuindo desde rochas do embasamento Arqueano/Proterozoico até sedimentos Quaternário inconsolidados, que são os objetos de estudo desse trabalho.

As principais contribuições desse trabalho são: a análise petrográfica, mineralógica, geoquímica e isótopos de Neodímio (Nd) e Estrôncio (Sr) dos sedimentos para a comparação de suas assinaturas de suas áreas fontes; revisão e compilação de assinaturas isotópicas de Nd e Sr das unidades litoestratigráficas do embasamento; e caracterização isotópica da fração fina como fonte de poeira para regiões continentais e oceânicas adjacentes a partir do deserto da Namíbia.

## **1 OBJETIVO**

### **1.1 Geral**

O objetivo geral da dissertação é caracterizar a composição mineralógica, química e isotópica dos sedimentos quaternários no segmento NO da Namíbia e tecer considerações sobre a dispersão destes materiais.

### **1.2 Específico**

Adicionalmente como objetivos específicos, pretende-se:

- a) verificar de que forma a composição isotópica das amostras de sedimentos refletem suas áreas fontes;
- b) verificar se há diferenças composicionais entre as amostras em rocha total e suas frações finas;
- c) definir o campo de composições isotópicas de Nd e Sr dos sedimentos finos do deserto da Namíbia compará-los com aerossóis e loess dos desertos do Sahara e Kalarahi.

## 2 APRESENTAÇÃO

### 2.1 Estrutura da Dissertação

Este trabalho é composto por sete capítulos.

Os capítulos 1 e 2 apresentam os objetivos gerais e específicos, a estrutura da dissertação, a localização da área e seus aspectos fisiográficos e climáticos.

O capítulo 3, aborda a geologia regional da Namíbia e apresenta um breve contexto litoestratigráfico das suas bacias onde os sedimentos estão inseridos.

No capítulo 4 são descritos os materiais e métodos utilizados nesse trabalho.

O capítulo 5 comunica os resultados analíticos obtidos, incluindo dados de petrografia, mineralogia, geoquímica e isótopos de Nd e Sr.

O capítulo 6 apresenta uma discussão sobre uma série de modelagens de misturas de áreas fontes, com base na composição isotópica de terrenos litológicos locais e das amostras estudadas.

O capítulo 7 reporta as implicações globais para o estudo de aerossóis integrando as discussões das conclusões desse trabalho.

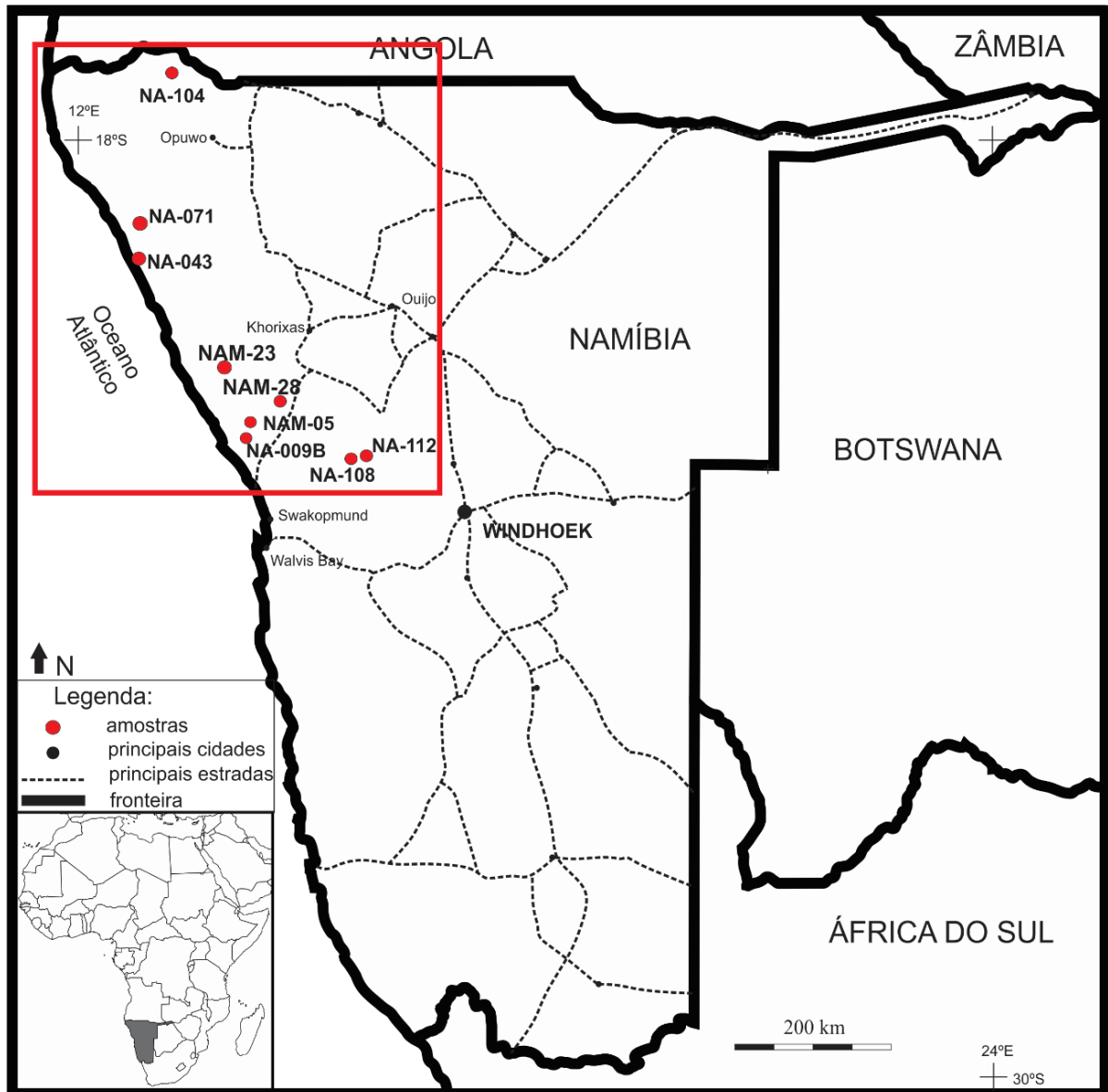
### 2.2 Localização da área e das amostras estudadas

As amostras estudadas localizam-se em uma área de aproximadamente 173 mil km<sup>2</sup> no setor noroeste da Namíbia. O acesso foi realizado pelas estradas principais iniciando na capital Windhoek, seguido por estradas de terra e ao longo de leitos de rios efêmeros (*wadis*).

As nove amostras de sedimentos superficiais estudadas foram plotadas no mapa simplificado da Namíbia com destaque para as estradas e cidades principais (Figura 1). Dados geográficos, como coordenadas, altitude e outras informações das nove amostras de sedimentos superficiais coletadas, encontram-se na tabela 1.

Uma ficha de descrição para cada amostra com fotos de campo, imagens Landsat-8 de do Google Earth® são encontradas no Apêndice A.

Figura 1- Continente Africano e mapa da Namíbia.



Legenda: círculo vermelho: amostra; círculo preto: principais cidades; linha tracejada: principais estradas; linha contínua: fronteira; retângulo vermelho: área de estudo

Fonte: Modificado pela autora de *Geological Survey of Namibia*, 2005.

Tabela 1- Informações gerais das amostras estudadas.

<b>Amostra</b>	<b>Longitude (grau decimal)</b>	<b>Latitude (grau decimal)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Coletor:</b>	<b>Massa total seca (g)</b>	<b>Data</b>	<b>Região /Local</b>
<b>NA-009B</b>	14,204497	-21,393543	423	Julio Almeida e outros	1220	13/09/2015	Erongo/maciço Messum
<b>NA-043</b>	12,724150	-19,345965	70	Aimée Guida	1340	19/09/2015	Kunene/Möwe Bay
<b>NA-071</b>	12,733864	-18,898750	193	Julio Almeida e outros	1230	24/09/2015	Kunene/Rio Huarusib
<b>NA-104</b>	13,279842	-17,208897	877	Julio Almeida e outros	2465	29/09/2015	Kunene/Ombuku
<b>NA-108</b>	15,582788	-21,647924	1356	Julio Almeida e outros	2050	03/10/2015	Erongo/maciço Erongo
<b>NA-112</b>	15,694827	-21,641150	1350	Julio Almeida e outros	1925	03/10/2015	Erongo/maciço Erongo
<b>NAM -05</b>	14,253171	-21,329612	530	Claudio Valeriano	1805	04/05/2015	Erongo/Rio Messum
<b>NAM -23</b>	13,917763	-20,600774	580	Claudio Valeriano	1180	08/05/2015	Kunene/Rio Huab
<b>NAM -28</b>	14,681822	-21,018193	502	Claudio Valeriano	745	10/05/2015	Erongo/Rio Ugab

Legenda: Coordenadas geográficas (datum: WGS-84).

Fonte: A autora, 2018.

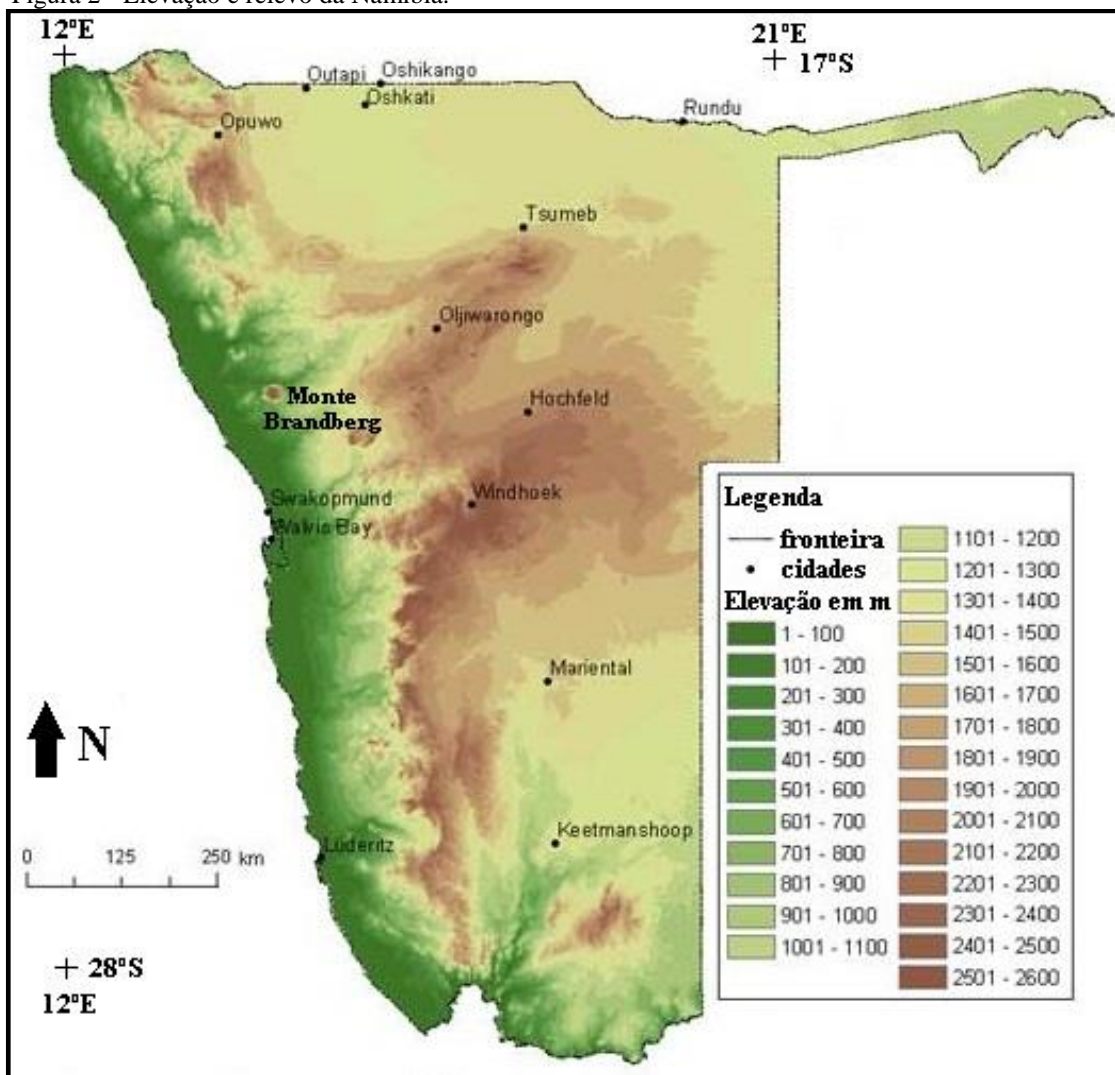


### 2.3 Aspectos fisiográficos

A Namíbia é um país localizado no sudoeste do continente africano, possuindo uma área de 824 292 km<sup>2</sup>, perímetro de 5760 km e sua capital é Windhoek. É banhada pelo Oceano Atlântico e faz fronteira com Angola ao norte, com a Zâmbia, a nordeste, com Botsuana, a leste e com a África do Sul ao sul.

A maior parte do país consiste em um grande platô nas porções central e a leste. A margem desse platô ocidental possui escarpas íngremes até encontrar-se com uma planície costeira (Figura 2). O ponto mais alto da Namíbia é o maciço Brandberg com altitude de 2579 m.

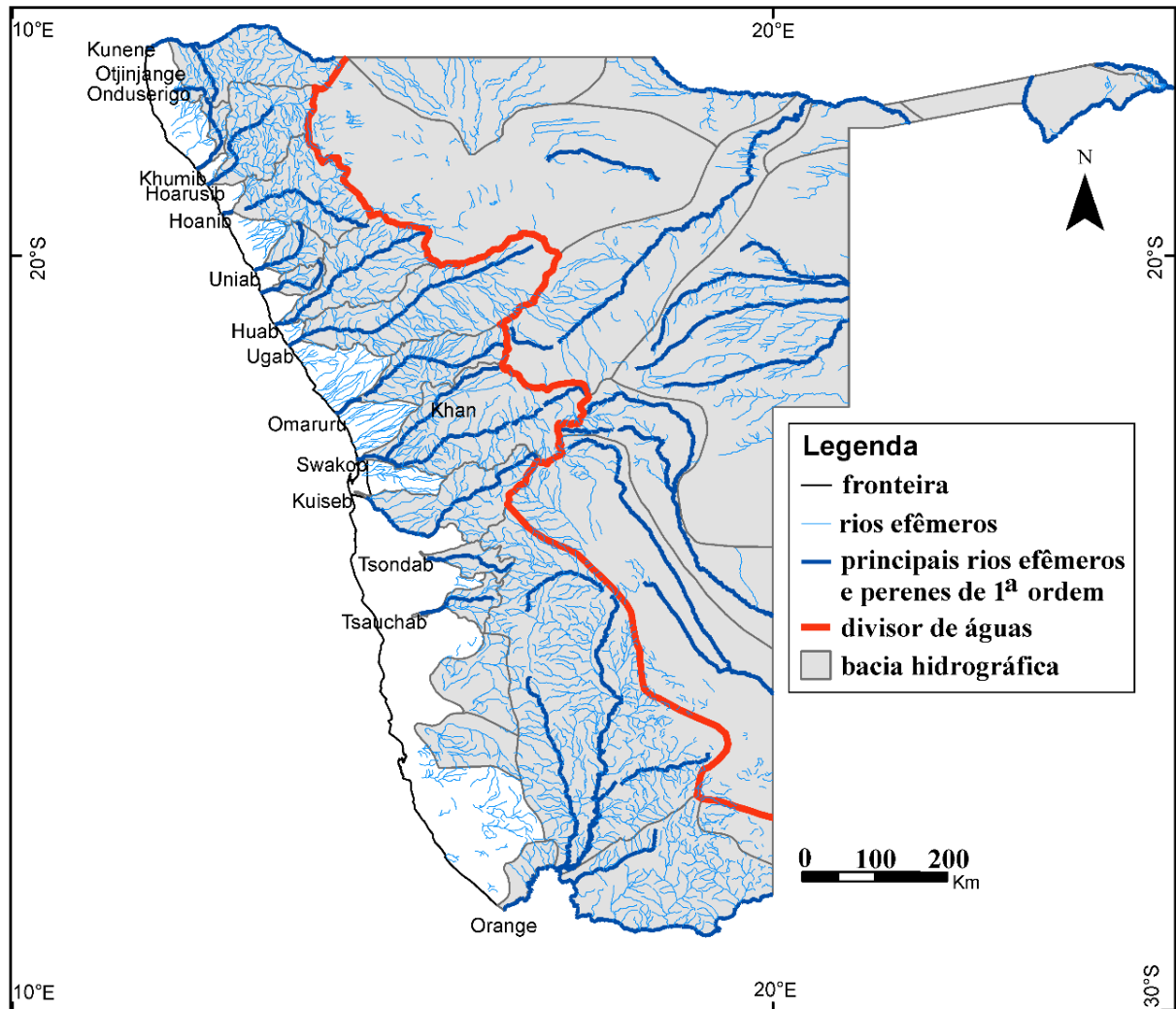
Figura 2 - Elevação e relevo da Namíbia.



Fonte: ACACIA, 2002.

Um divisor continental “*great scarpment*” separa o país em duas vertentes: uma voltada para o litoral e outra para o centro do deserto do Kalahari (Figura 3). Na maior parte do ano os rios ficam secos e, quando ocorrem chuvas fortes, o fluxo de água leva apenas algumas horas ou dias (“*flash floods*”).

Figura 3- Mapa hidrográfico com as principais bacias hidrográficas e os principais rios.

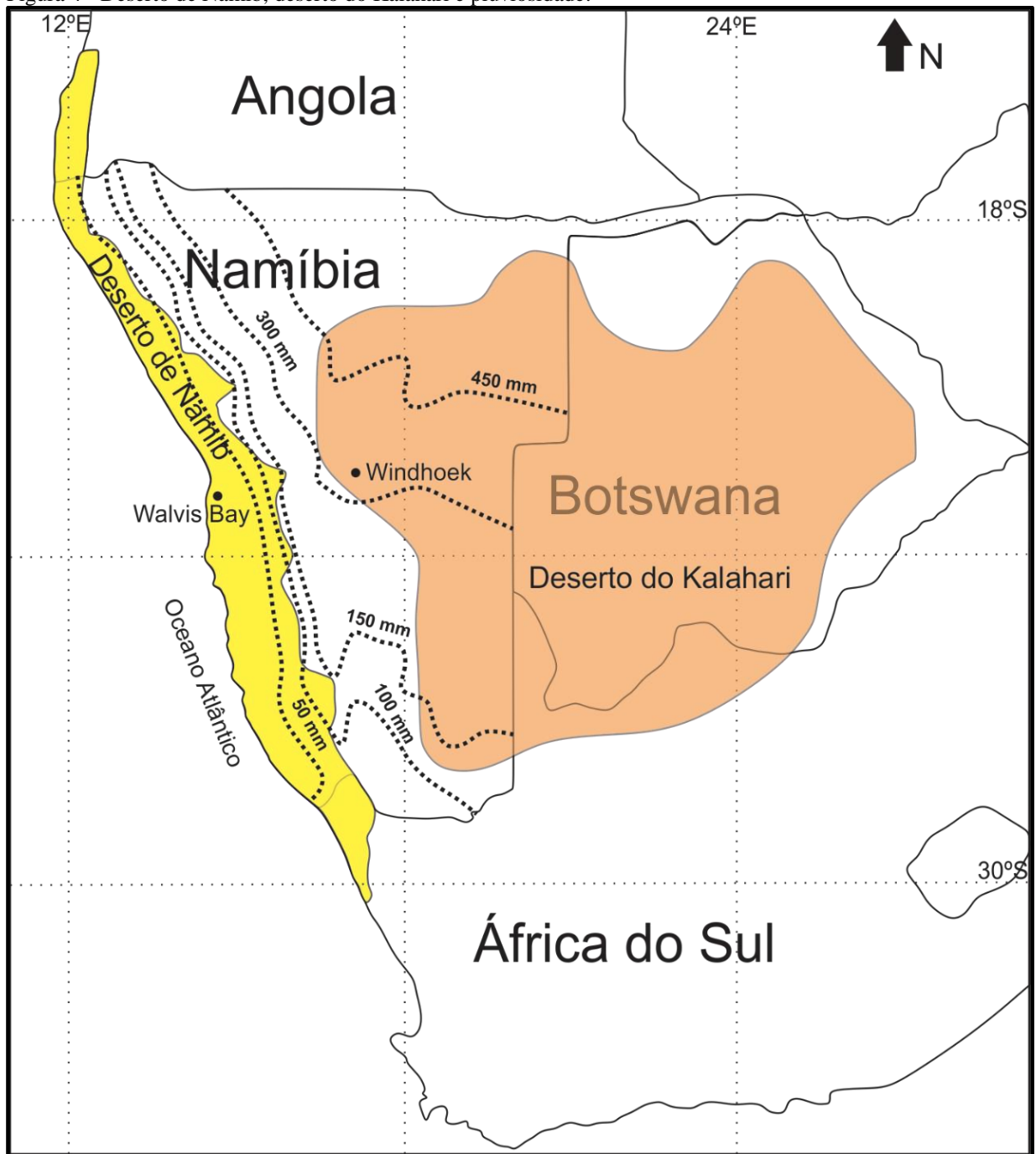


Fonte: Modificado pela autora de ACACIA, (2002).

O clima predominante na Namíbia é o árido tropical, registrando grande variações de temperatura diárias. O território nacional abriga dois grandes desertos (Figura 4): o Deserto da Namíbia, na faixa costeira e o Deserto do Kalahari, no interior.

A pluviosidade diminui de leste para oeste variando entre 450 e <50 mm/ano (Figura 4) e a área com menor volume anual configura o Deserto de Namibe, que tem continuidade no Sudoeste da Angola e Noroeste da África do Sul.

Figura 4 - Deserto de Namib, deserto do Kalahari e pluviosidade.



Legenda: amarelo: Deserto de Namib; rosa: Deserto do Kalahari; linhas tracejadas: isolinhas de pluviosidade; linha contínua: fronteira entre os países.

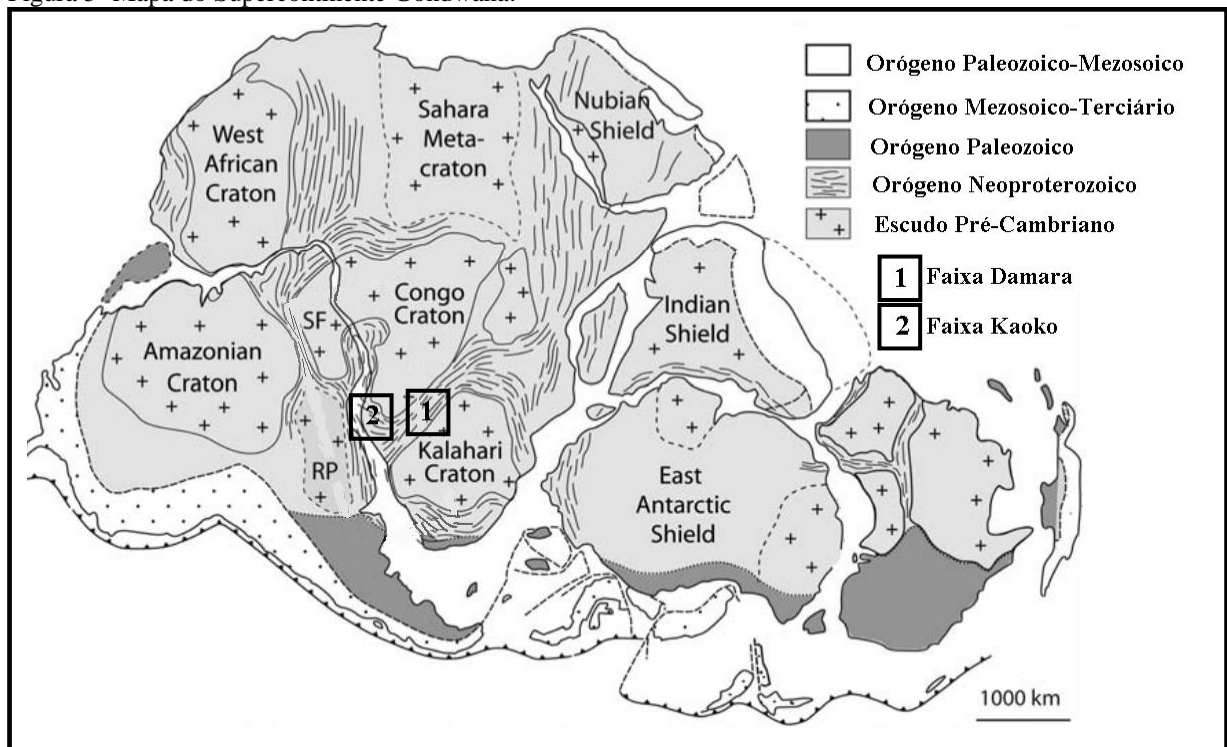
Fonte: Modificado pela autora de VAN ROOYEN, et al., 2004; LI, et al., 2016 e MAYAUD, et al., 2017.

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 3.1 Contexto Geotectônico da Namíbia

No final do Neoproterozoico, os paleocontinentes como Amazônia, São Francisco-Congo, São Luís, Kalahari dentre outros, se amalgamaram formando o Supercontinente Gondwana (WIT, et al., 2008; BRITO NEVES, et al., 1999; UNRUG, 1992). Na África, a formação do Supercontinente Gondwana gerou várias faixas orogênicas Pan-Africanas como, a Faixa Kaoko, resultado da colisão do Cráton do Congo e Rio De La Plata (GOSCOMBE, et al., 2003) e a Faixa Damara, produto da colisão dos crátons do Kalahari e Congo (GRAY, et al., 2008; DEKOCK 1992; UNRUG, 1983) (Figura 5). No Cretáceo, houve a quebra do supercontinente Gondwana (KAMPUNZU, 2001; JOKAT et al., 2003) separando os continentes contemporâneos América do Sul e África, desenvolvendo nas bacias marginais, ricas em recursos energéticos.

Figura 5- Mapa do Supercontinente Gondwana.



Legenda: Orógenos: 1) Damara e 2) Kaoko.

Fonte: Modificado pela autora de GRAY, et al., 2008.

### 3.2 Principais associações litológicas do Noroeste da Namíbia

Rochas Arqueanas e Proterozoicas ocorrem principalmente no embasamento dos crátons São Francisco e Congo (BURGER, et al., 1976; TEGTMEYER E KRÖNER, 1985). São compostas principalmente por ortognaisses migmatíticos (JANOUSSEK, et al., 2010), gnaisses tonalíticos e dioríticos, (SETH, et al., 2002) enquanto que a sua cobertura metassedimentar Neoproterozoica é representada por xistos, filitos, quartzitos, mármore e calcilicáticas (GLEIBNER, et al., 2011).

No norte do país aflora um complexo intrusivo anorogênico Mesoproterozoico denominado Complexo Gabro-Anortosítico Kunene (DRÜPPEL, et al., 2007; GLEIBNER, et al., 2011, MAYER, et al., 2004). É composto por gnaisses anortosíticos e leucogabronoritos. Possui também uma suíte granítica descrita em Jung et al. (2012).

As rochas neoproterozoicas no Noroeste da Namíbia constituem, junto com os ortognaisses do embasamento, os orógenos Pan-Africano Kaoko e Damara e são representadas por espessas sucessões metassedimentares Neoproterozoicas com “*inliers*” de rochas do embasamento Arqueano/Proterozoico retrabalhadas pelo metamorfismo (GRAY, et al., 2008; KRÖNER E STERN, 2004; KONOPÁSEK, et al., 2017; SETH, et al., 2002 e MASBERG, et al., 2005). O embasamento é representado por gnaisses miloníticos e granitos (VAN DE FLIERDT, et al., 2003). Já a cobertura metassedimentar é caracterizada pela Sequência Damara do Grupo Swakop, composta por xistos, quartzitos, mármore, e rochas calcilicáticas (McDERMORT, et al., 1990) que estão sob os meta-carbonatos de margem passiva do Grupo Otavi (YOSHIOKA, et al., 2003, RODLER, et al., 2017 e BANNER, et al., 1990). No período compreendido entre o Neoproterozoico e o Cambriano, houve intrusão de granitos sin, tardi e pós-tectônicos chamados de Granitos Damara (JUNG, et al., 2002, 2003).

Após a amalgamação do Supercontinente Gondwana, já no Paleozoico, as unidades sedimentares do Supergrupo do Karoo (CATUNEANU, et al., 2005) foram depositadas em bacias tipo rifte que evoluíram para bacias tipo *sag*, caracterizando Sequências Gondwânicas, representadas por arenitos, folhelhos, siltitos, e argilitos, com idades desde o Cambro-Ordoviciano até o Jurássico (THOMAZ FILHO, 1976; CANILE, 2015).

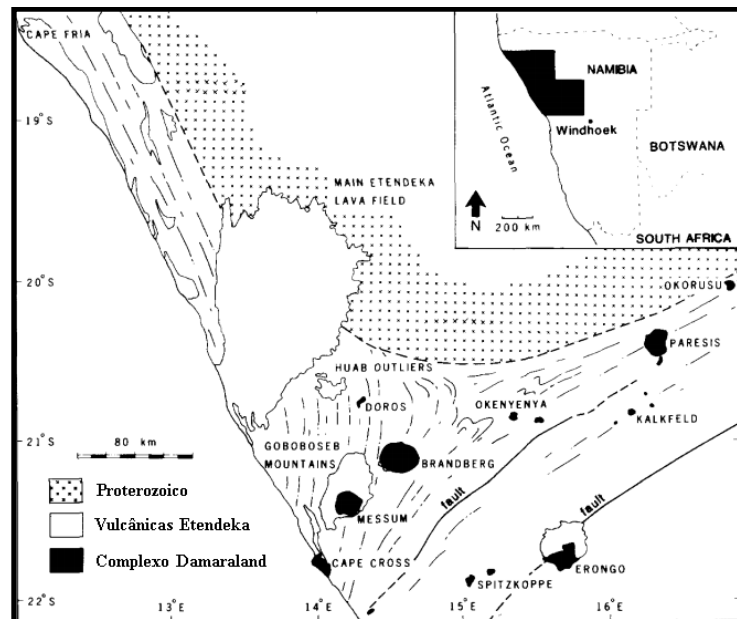
No Cretáceo, inicia-se a quebra do Supercontinente Gondwana com a formação de riftes associadas ao magmatismo bimodal Etendeka. Este episódio magmático é representado por com basaltos e quartzito latitos, (EWART, et al., 1998a e 1998b) depositados sobre a Bacia do Karoo, em conjunto com arenitos eólicos sendo análogo do magmatismo Serra Geral

(PICCIRILLO E MELFI, 1988; WAICHEL et al., 2006) associado aos arenitos da formação Botucatu (LEONARDI et al., 2007), do lado brasileiro.

Contemporaneamente ao evento Etendeka, ocorreram rochas intrusivas do Complexo Anorogênico Damaraland (MILNER et al., 1995; TRUMBULL, et al., 2000, 2004). Esses complexos são bem preservados e se estendem em uma zona de *trend* NE a partir da costa do Atlântico em Cape Cross (TRUMBULL, et al., 2000). Alguns representantes desse magmatismo são os complexos intrusivos (Figura 6) discutidos abaixo:

- a) **Erongo** composto essencialmente de granodioritos e granitos peraluminosos (TRUMBULL, et al., 2000, 2003; THOMPSON, et al., 2001);
- b) **Brandberg**, granitos metaluminosos e peralcalinos (SCHMITT, et al., 1999; TRUMBULL, et al., 2004);
- c) **Messum**, gabros e sienitos (EWART, et al., 1998a; EWART, et al., 1998b; HARRIS, et al., 1999; TRUMBULL, et al., 2000);
- d) **Paresis**, basaltos, fonolitos, lamprófiros, riolitos metaluminosos e peralcalinos (MINGRAM, et al., 2000);
- e) **Spitzkoppe** (THOMPSON, et al., 2007);
- f) **Cape Cross** (TRUMBULL, et al., 2000);
- g) **Kalkfeld e Etaneno** (BUHN, et al., 2003); e
- h) **Okenyenya, Okorusu e Doros** (MILNER, et al., 1996).

Figura 6 - Mapa da localização dos Complexos intrusivos Damaraland.



Fonte: MILNER, et al., 1995.

Após a abertura do Oceano Atlântico, ainda no Cretáceo, começou o processo de formação das bacias de margem passiva, representada localmente pela Bacia de Namibe (PAUTOT, et al., 1973; GINDRE-CHANU, et al., 2015).

O impacto da tectônica do Cretáceo, desenvolvendo a elevação da margem continental e subsidência *offshore*, foi de grande importância para o desenvolvimento da geomorfologia atual da Namíbia (GOUDIE e VILES, 2015). Após o rompimento, houve um período de peneplanização, desenvolvendo planícies com perfis de intemperismo de clima tropical úmido preservados, incluindo depósitos lateríticos, conhecidos como Grupo Kalahari com depósitos de areias, calcretes, sedimentos lacustes e eólicos (NASH et al., 1994) com espessura maior atrás da grande escarpa.

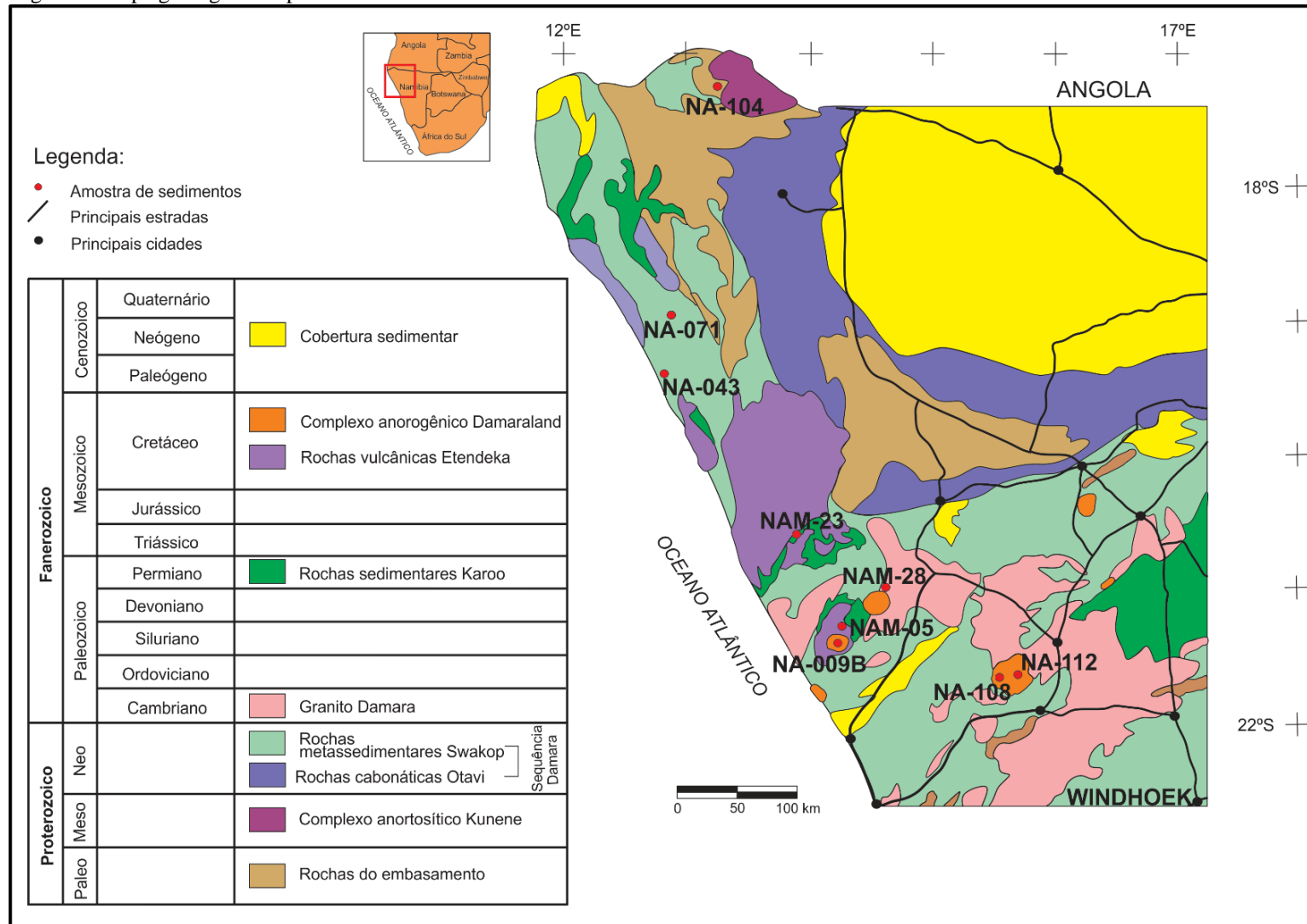
O “*Great Escarpment*” (BURKE E GUNNELL, 2008) é representado por cadeias de montanhas de aproximadamente 1000 metros de altitude formadas a partir do rifteamento associado com o da quebra do Supercontinente Gondwana. Esta feição se estende do norte ao sul da Namíbia, com lacunas erodidas ao longo de milhões de anos. Essa escarpa separa o setor oeste do país com erosões mais acentuadas até o nível de base oceânico, da área do planalto centro-leste, com níveis de base atingindo altitudes de aproximadamente 1000 a 2000 metros (GOUDIE e VILES, 2015).

No Quaternário, mais especificamente, se desenvolveu o Deserto de Namibe na margem oeste do país, com uma largura média de 100 km ao longo do litoral também chamada de Costa do Esqueleto (WATSON e LEMON, 1985).

As nove amostras de sedimentos superficiais coletadas para este estudo foram representadas no mapa geológico simplificado do Noroeste da Namíbia da figura 7.



Figura 7- Mapa geológico simplificado do Noroeste da Namíbia.



Legenda: Localização das amostras estudadas e as principais estradas e cidades

Fonte: Modificado pela autora de *Geological Survey of Namibia*, 2005.



## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Pesquisa bibliográfica**

A pesquisa bibliográfica foi baseada na literatura publicada em forma de livros, artigos, sites e mapas disponibilizados na Internet sobre a geologia local. Esta etapa contribuiu para obtenção de dados de razões isotópicas de Estrôncio (Sr) e Neodímio (Nd) para compor o campo isotópico referente aos principais terrenos da área estudada, para aquisição dos mapas geológicos e hidrográficos (detalhados e simplificados) da região, além da coleta e informações sobre a geoquímica e mineralogia local.

### **4.2 Amostragem**

As amostras estudadas foram coletadas em duas campanhas de campo. A primeira etapa, coordenada pelo Dr. Claudio Valeriano, foi realizada entre os dias 03 e 13 de maio de 2015. As amostras de sedimentos coletadas nessa etapa foram NAM-05, NAM-23 e NAM-28.

A segunda campanha de campo, coordenada pelo Dr. Julio Almeida foi realizada entre os dias 12 de setembro e 03 de outubro de 2015, quando foram coletadas as amostras de sedimentos NA-009B, NA-043, NA-071, NA-104, NA-108 e NA-112.

As amostras de sedimentos superficiais coletadas em campo para essa pesquisa possuem massas entre 745 g e 2465 g, sendo armazenadas em sacos plásticos resistentes e trazidas para o processamento no Brasil.

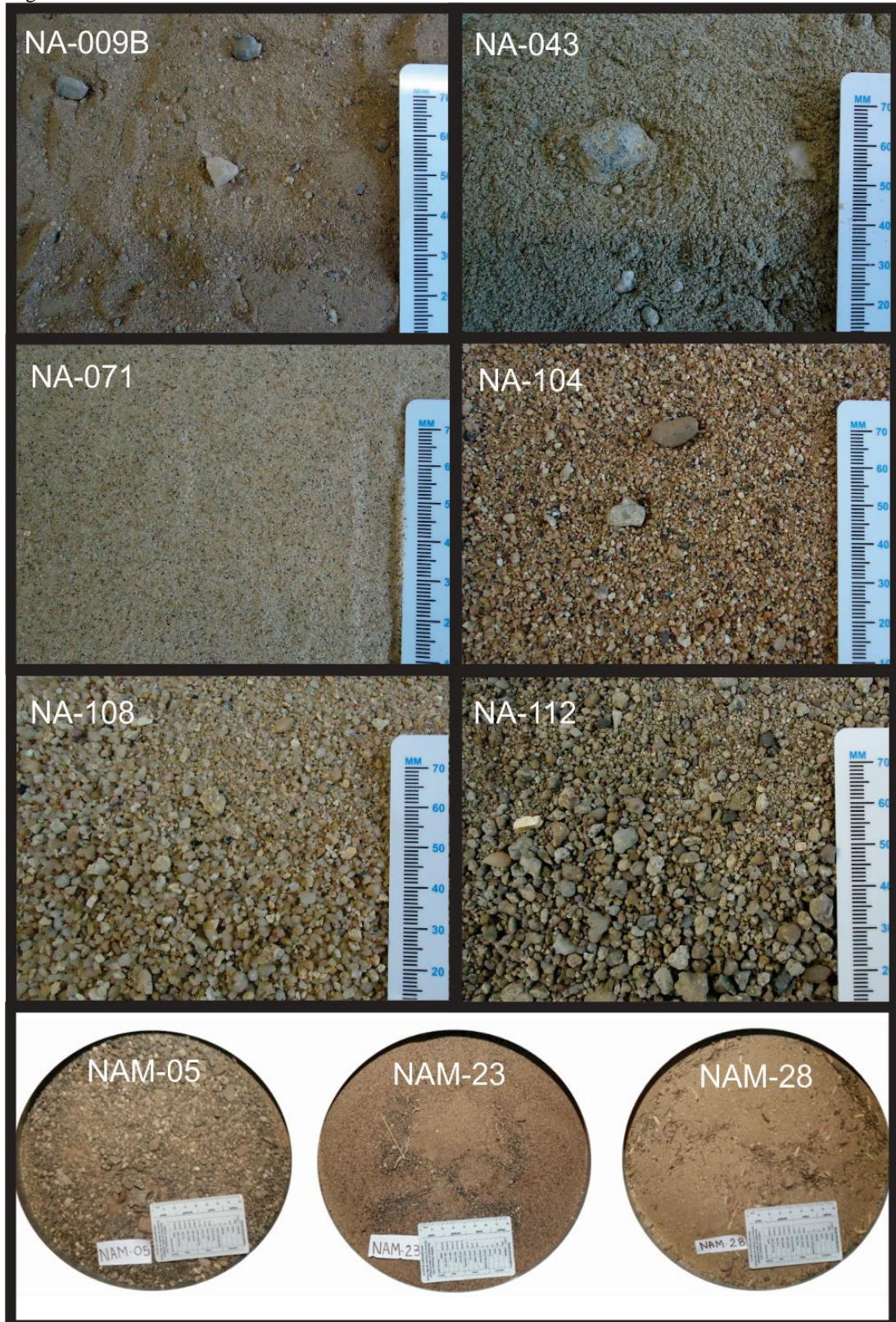
A ficha descritiva das amostras encontra-se no Apêndice A.

### **4.3 Preparação de amostras**

As amostras coletadas (Figura 8) foram processadas no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Inicialmente foram levadas a uma estufa a 60°C por 48 horas para retirar a umidade, que variou em proporções de até 0,75% da massa.

Figura 8 - Amostras de sedimentos.



Fonte: A autora, 2018.

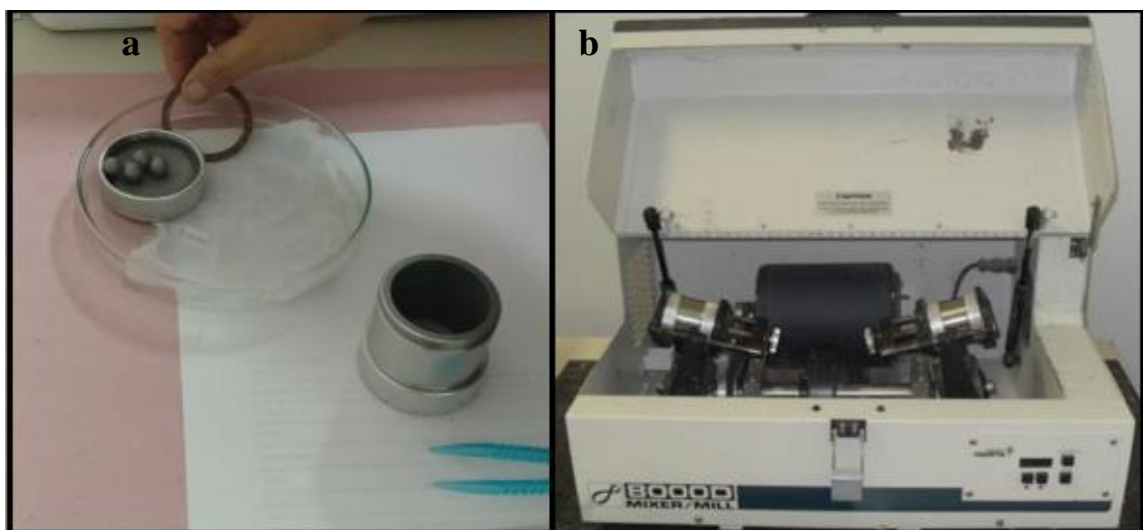
Após a secagem, as amostras foram quarteadas (Figura 9) até obter-se uma quantidade de aproximadamente 100g para representar a fração rocha total, posteriormente processadas no moinho de bolas de tungstênio (Figura 10) por 10 minutos. O material pulverizado resultante foi utilizado para análise geoquímica (elementar e isotópica) e para difratometria de raios-X. O restante de cada amostra foi reservado para caracterização granulométrica.

Figura 9- Amostra quarteada.



Legenda: Exemplo da amostra NA-043.  
Fonte: A autora, 2018.

Figura 10 - Pulverizador: moinho de bolas



Legenda: a) Amostrador e b) Moinho de bolas - LGPA  
Fonte: A autora, 2018



#### 4.4 Separações granulométricas

A separação granulométrica das amostras foi realizada em três etapas: utilizando peneiras de aço; peneiras montadas com telas de nylon, e separação aerodinâmica da parte mais fina utilizando o sistema cascade MOUDI™ (*MicroOrifice Uniform Deposit Impactor*), modelo 100/110.

##### 4.4.1 Separações por peneiramento

O peneiramento foi feito no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA) na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), utilizando um agitador de peneira pelo tempo de 10 minutos com reostato 6 (Figura 11). Foram utilizadas peneiras de aço com malhas de 4,0 mm, 2,0 mm, 1,0 mm e 0,5 mm.

O peneiramento subsequente foi feito em telas de nylon descartáveis em um suporte especial de PVC. As telas com malhas 250  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$ , 64  $\mu\text{m}$  e 36  $\mu\text{m}$  foram utilizadas com suporte de PVC de 7 cm de diâmetro e peneiradas manualmente a seco por 20 minutos em cada fração. Foi determinada a massa de cada fração granulométrica utilizando-se duas balanças: uma com capacidade máxima de 30kg e outra com capacidade máxima de 200g com precisão de 0,0001g.

Figura 11- Agitador de peneiras – LGPA.



Fonte: A autora, 2018.

Para evitar contaminação cruzada entre cada amostra, foi realizada uma limpeza rigorosa dos recipientes (peneiras e suportes de telas) feita com bucha e detergente Extran neutro, três enxágues com água destilada e um enxágue com água milli-Q. Por último, foi feito banho de acetona, secagem na estufa a 60°C por 24 horas e ar comprimido.

#### 4.4.2 Separação aerodinâmica

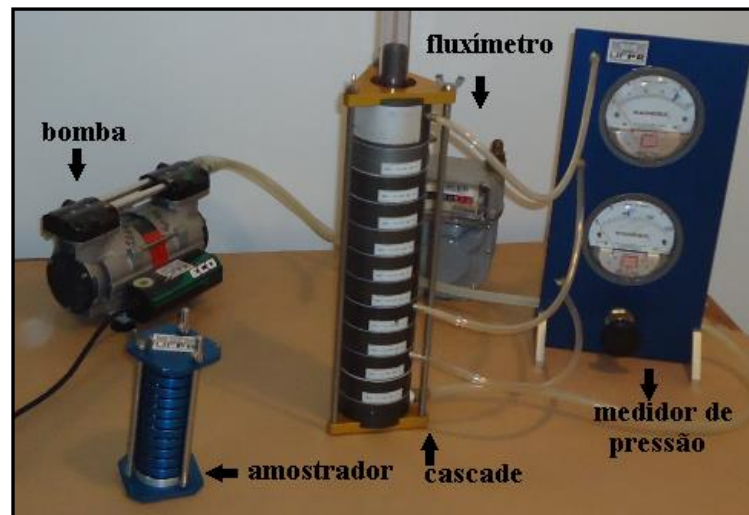
A operação e montagem do sistema aerodinâmico foram realizadas no Laboratório de Radioecologia e Mudanças Globais (LARAMG) da UERJ com o MOUDI™ cedido pelo Laboratório de Análises e Qualidade do Ar (Lab-Air) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O sistema é composto por um fluxímetro, um medidor de pressão, uma bomba, uma bateria (“cascade”) de coletores e um amostrador (Figura 12) que divide a amostra em 11 frações (Tabela 2 e Figura 13).

Tabela 2 - Estágios do MOUDI™ X diâmetro aerodinâmico.

Estágio	Diâmetro aerodinâmico ( $\mu\text{m}$ )
S0	18
S1	10
S2	5,6
S3	3,2
S4	1,8
S5	1,0
S6	0,56
S7	0,32
S8	0,18
S9	0,10
S10	0,0056

Fonte: A autora, 2018.

Figura 12 - Sistema Cascade MOUDI™.



Fonte: A autora, 2018.

Figura 13 - Estágios de separação do MOUDI™.

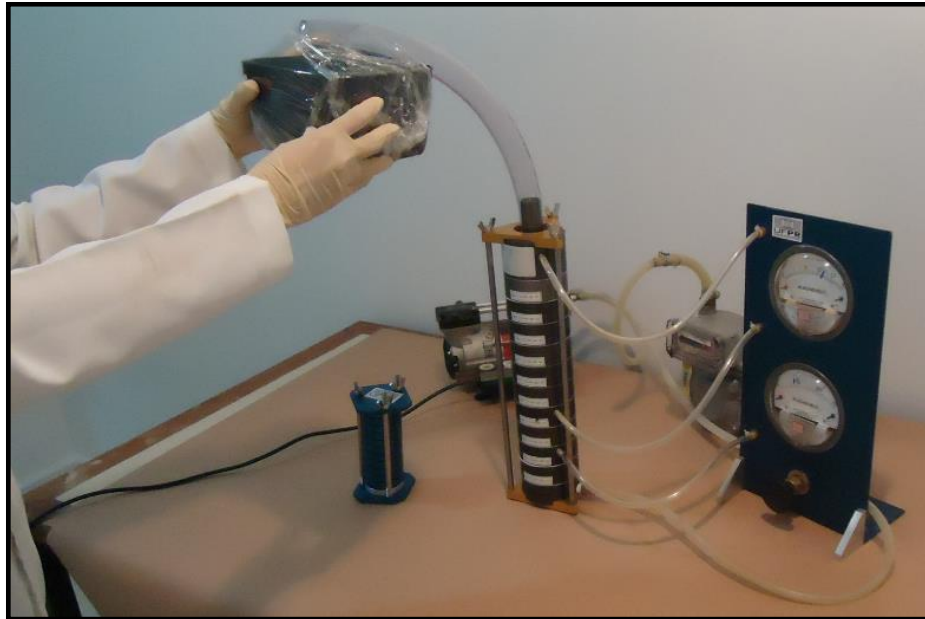


Fonte: A autora, 2018.

Para cada amostra foram utilizados recipientes limpos e descartáveis (mangueira e pote plástico para a ressuspensão da amostra). A limpeza foi feita com bucha e detergente Extran neutro, em três enxágues com água destilada, um enxágue com água milli-Q, secagem na estufa a 30°C por 24 horas e ar comprimido.

A amostra da fração que passou na tela de 36  $\mu\text{m}$  foi levada a um recipiente plástico e ressuspensa para entrar no MOUDI™ através de uma mangueira por aproximadamente 10 minutos (Figura 14).

Figura 14 - Operação de ressuspensão de amostra no MOUDI™.



Fonte: A autora, 2018

Para a realização dessa técnica, foi necessária a utilização de membranas de policarbonato 47mm nos estágios do MOUDI™ para reter a amostra de cada etapa. As membranas são armazenadas em um amostrador e depois colocadas no “cascade”. Com isso, foi determinada a massa da amostra em cada estágio. A massa de cada membrana foi determinada antes e depois do procedimento, utilizando-se uma balança de alta precisão analítica da marca Mettler Toledo® e modelo KA-52C, com precisão de  $10^{-6}$ g (Figura 15), disponível no Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR) em ambiente limpo.

Figura 15 - Balança de alta precisão analítica.



Fonte: A autora, 2018.



#### 4.5 Geoprocessamento

As tecnologias digitais de geoprocessamento foram utilizadas como principal ferramenta para produzir os mapas temáticos desta pesquisa, que incluiu a integração dos mapas de elevação do terreno (*Hillshade Map*), além da produção de mapa de drenagens e bacias hidrográficas a partir de um modelo digital do terreno (MDT) sobre a área de estudo. Todos esses produtos foram elaborados em ambiente de Sistemas de Informação Geográficas (SIG), através da plataforma ArcGIS® (versão 10.3), georreferenciados no sistema de coordenadas geográficas com datum WGS-84.

A relação dos mapas utilizados como base para a produção do trabalho está abaixo representada:

- a) Mapa Geológico da Namíbia, (*Geological Survey of Namibia*), cujas bases subsidiaram a confecção das bacias de drenagem (Tabela 3);
- b) Mapa Hidrográfico da Namíbia (*Hydrography of Namibia: Rivers, basins, pans and lakes*), gentilmente fornecido pelo Dr. Andreas Bolten, responsável pelo *Project E1 - Digital Atlas* da *University of Cologne*, na Alemanha;
- c) Cartas Geológicas na escala 1:250 000, adquiridas pelo SGN (Tabela 3);
- d) Mapa de elevação de terreno (*World Hillshade Map*), obtidos no banco de dados do ArcGIS® online, utilizados para a integração com a geologia;
- e) Imagens de Satélite do Google Earth®, utilizadas para fotointerpretação e verificação da amostragem *in situ*.

Tabela 3 - Bacias de drenagens e cartas base utilizadas, com escalas e referências.

Bacia	Folha	Escala	Referência
NA-009B	Omaruru (2114)	1:250 000	SCHREIBER e GOSCOMBE, 1997
NA-071	Opuwo (1812)	1:250 000	SCHREIBER e GOSCOMBE, 2011
NA-043	-	1: 1 000 000	<i>Geological Survey of Namibia</i> , 1980
	Swartbooisdrif	1:250 000	
NA-104	(1712)		SCHREIBER e GOSCOMBE, 2002
NA-108	Omaruru (2114)	1:250 000	SCHREIBER e GOSCOMBE, 1997
NA-112	Omaruru (2114)	1:250 000	SCHREIBER e GOSCOMBE, 1997
NAM-05	Omaruru (2114)	1:250 000	SCHREIBER e GOSCOMBE, 1997
NAM-23	-	1: 1 000 000	<i>Geological Survey of Namibia</i> , 1980
NAM-28	-	1: 1 000 000	<i>Geological Survey of Namibia</i> , 1980

Fonte: A autora, 2018.

O mapa com as bacias hidrográficas e o sistema de drenagem da área de estudo foram gerados a partir de um modelo digital de terreno (MDT) oriundo das imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), obtidas através da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*). Estes dados estão disponíveis na página da internet <https://earthexplorer.usgs.gov> do Earth Explorer do *United States Geological Survey* (USGS).

O processamento das variáveis geomorfométricas elaboradas a partir do MDE/SRTM foi realizado no sistema ArcGIS® 10.3, através da ferramenta *Spatial Analyst Tools – Hydrology*. Esta modelagem levou em conta cinco variáveis: 1) Preenchimento (*fill*); 2) Direção de fluxo (*flow direction*); 3) Acumulação de fluxo (*flow accumulation*); 4) Hierarquia dos rios (*stream order*) até 5ª ordem; e 5) Delineamento dos rios (*stream to feature*). Após a definição dessas variáveis, foi gerado o arquivo *basin*, correspondente à bacia hidrográfica de cada amostra.

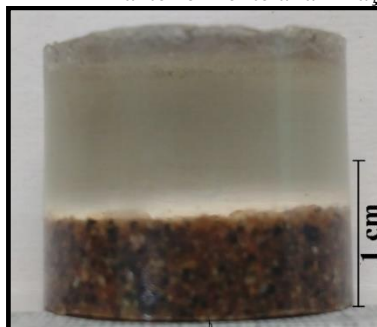
Posteriormente, a partir do comando da extensão *Spatial Analyst Tools – Extract – Clip*, foi feita a compartimentação da área total das bacias e as áreas das unidades litológicas pertencentes a cada uma delas, sendo calculada a área (em km<sup>2</sup>) das unidades identificadas.

Para cada amostra foi utilizado um mapa geológico integrado com a elevação do terreno (*Hillshade Map*), drenagens e bacias, sobrepostos em 50% de transparência, em escalas variadas.

#### 4.6 Aspectos petrográficos

As lâminas delgadas foram produzidas no LGPA-UERJ a partir de um molde de resina epóxi com endurecedor (Figura 16). As fotografias foram realizadas no Laboratório de Petrologia e Petrografia da UERJ.

Figura 16 - Amostra com resina epóxi anteriormente a laminação.



Fonte: A autora, 2018.

#### 4.7 Análise mineralógica por difração de raios-X

As análises por difratometria de raios-X (DRX) pelo método do pó, foram realizadas no CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro).

A preparação das amostras para DRX está descrita em detalhe no Apêndice B.

Foi utilizado o difratômetro BRUKER-AXS modelo D4 ENDEAVOR com tubo de radiação de cobalto (Co-K $\alpha$ ). Os parâmetros referentes à análise foram:  $\lambda=0.179021$  nm, corrente de 40 mA, tensão de 40 kV, velocidade do goniômetro de  $0,02^\circ$   $2\theta$  por passo, com tempo de contagem de 1 segundos por passo e ângulo de varredura  $2\theta$  entre 4 e 105 graus, com detector sensível à posição *LynxEye*. O padrão de coríndon foi utilizado no laboratório para ajustar resolução instrumental.

A identificação qualitativa das fases minerais foi comparada com os padrões do banco de dados PDF-04 (ICDD, 2016) utilizando o programa Bruker-AXS Diffrac.Eva 4.1 e, para os cálculos quantitativos dos teores (%) mineralógicos, foi utilizado o método *Rietveld* utilizando o programa TOPASR.

## 4.8 Análise química elementar

As análises químicas de nove amostras de sedimentos da rocha total e de cinco amostras da fração silte grosso (36-64  $\mu\text{m}$ ) foram realizadas no laboratório ACTLABS (*Activation Laboratories Ltda*) em Ontário, no Canadá. As análises foram feitas por ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) sendo os elementos maiores, menores, traço e terras raras, obtidos por FUS-ICP (*Fusion - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*), TD-ICP (*Total Digestion -Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) e INAA (*Instrumental Neutron Activation Analysis*). A metodologia analítica detalhada pode ser encontrada em <http://www.actlabs.com> - *Geochemistry/Assay - Methods - Code 4E-Research*. A tabela completa de dados analíticos encontra-se no Apêndice C.

Foram utilizados os programas Microsoft Excel® e CorelDraw® para geração e edição dos diagramas *Spiderplot* e REE (*Rare Elements Earth*).

## 4.9 Análise isotópica de Estrôncio e Neodímio

### 4.9.1 Decaimento radioativo

A radioatividade foi descoberta por Henri Becquerel e Pierre e Marie Curie entre 1896-1902 e é o fenômeno onde o átomo se transforma espontaneamente em outro, transmitindo radiação (ALLÈGRE, 2008). A taxa de decaimento radioativo de um átomo para um estado mais estável é proporcional ao número de átomos presentes em qualquer momento tempo e  $\lambda$  é a constante de decaimento, que é uma particularidade de cada isótopo radiogênico. A meia-vida é o tempo necessário para que a metade do número total de átomos radioativos decaia e se transforme em para átomos radiogênicos (DICKIN, 2005).

#### 4.9.2 Geoquímica isotópica do Rb-Sr

O Rubídio (Rb), de número atômico 37, é um metal alcalino do grupo 1A da tabela periódica e possui dois isótopos naturais, o  $^{85}\text{Rb}$  e o  $^{87}\text{Rb}$  com abundâncias 72,2% e 27,8%, respectivamente. O Rb substitui o Potássio (K) devido à mesma carga e semelhança do raio iônico é comum nos minerais formadores de rocha como, K-feldspato, argilominerais e micas (FAURE, 1986).

O Estrôncio (Sr) de número atômico 38 é um elemento alcalino terroso do grupo 2A da tabela periódica e possui 4 isótopos naturais estáveis,  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  e  $^{88}\text{Sr}$ , com abundâncias 0,6%, 9,9%, 7,0% e 82,5%, respectivamente. O Sr tem afinidade com o Cálcio (Ca), devido à equivalência de carga e raio iônico, e ocorre em minerais como plagioclásio, carbonatos e apatita. A composição isotópica do Sr varia com o decaimento do  $^{87}\text{Rb}$  (radioativo) para o  $^{87}\text{Sr}$  (radiogênico), ocorre com uma meia vida de 48,8 Ga (DICKIN, 2005; FAURE, 1986).

O Rb é mais incompatível do que o Sr nas rochas da crosta continental, logo, em produtos de fusão parcial, a razão Rb/Sr é elevada e a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  aumenta rapidamente. A razão Rb/Sr em rochas mantélicas é baixa e a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  aumenta lentamente ao longo do tempo (GILL, 2014).

#### 4.9.3 Geoquímica isotópica do Sm-Nd

O Neodímio (Nd) de número atômico 60 e o Samário (Sm) de número atômico 62 são elementos terras raras (ETR) que pertencem à série dos lantanídeos, formados por íons de carga +3 que possuem propriedades químicas similares. O Nd possui sete isótopos naturais,  $^{142}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{145}\text{Nd}$ ,  $^{146}\text{Nd}$ ,  $^{148}\text{Nd}$  e  $^{150}\text{Nd}$ , com abundâncias de 27,1%, 12,2%, 23,8%, 8,3%, 17,2%, 5,8% e 5,6%, respectivamente. O Sm também possui sete isótopos naturais, são eles:  $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{148}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{150}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Sm}$  e  $^{154}\text{Sm}$  com abundâncias de 3,1%, 15,0%, 11,3%, 13,8%, 7,4%, 26,7% e 22,7%, respectivamente. Eles ocorrem nas rochas como elementos constituintes em minerais como monazita e também como elemento traço de

minerais formadores de rocha como apatita, zircão e outros minerais acessórios (FAURE, 1986).

O decaimento radioativo do sistema Sm-Nd é muito lento e ocorre com uma meia vida de 106 Ga, que representa aproximadamente 23 vezes a idade da Terra (DePAOLO, 1988).

A abundância do isótopo  $^{143}\text{Nd}$  (radiogênico) aumenta no decorrer do tempo em função do decaimento do  $^{147}\text{Sm}$  (radioativo). Como consequência disso, a razão  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  aumenta e pode ser descrita em um modelo baseado na idade da Terra de aproximadamente 4,6 Ga, tendo como referência análises dessa razão inicial em meteoritos condríticos (FAURE, 1986). Os valores das razões  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  e de  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  hoje são, respectivamente, 0,512638 e 0,1967 com base no modelo de um reservatório condrítico uniforme, o CHUR (*CHondritic Uniform Reservoir*). Já o valor da razão  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  natural e estável é de 0,7219 (FAURE, 1986 e DICKIN, 2005). A fusão parcial do CHUR gera magmas com razões  $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$  e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  mais baixas que no CHUR e no sólido residual (“*Depleted Mantle*”, DM) e essas razões são maiores do que no presente (DICKIN, 2005).

O parâmetro petrogenético épsilon de Nd (DePaolo e Wasserburg, 1976) compara a razão  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  medida com a composição teórica do CHUR (ALLÈGRE, 2008). Se  $\varepsilon$  (Nd) for maior do que zero a razão é maior do que o valor em CHUR, e se  $\varepsilon$  (Nd) for menor do que zero a razão é menor do que o CHUR (FAURE, 1986 e DICKIN, 2005). O  $\varepsilon$  (Nd) é calculado através da fórmula 1:

$$\varepsilon(\text{Nd}) = \left[ \left( \frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(m)}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(\text{CHUR})}} \right) - 1 \right] * 10000 \quad (1)$$

Sendo,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(m)}$  é a razão medida hoje e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(\text{CHUR})} = 0,512638$ .

LACAN et al., (2012) descrevem que os valores de épsilon de Nd geologicamente significativos variam de +12 a -56.

De maneira análoga, o parâmetro épsilon de Sr (DePAOLO e WASSERBURG, 1977) compara a razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  medida com a composição teórica do CHUR. O  $\varepsilon$  (Sr) é calculado através da fórmula 2:

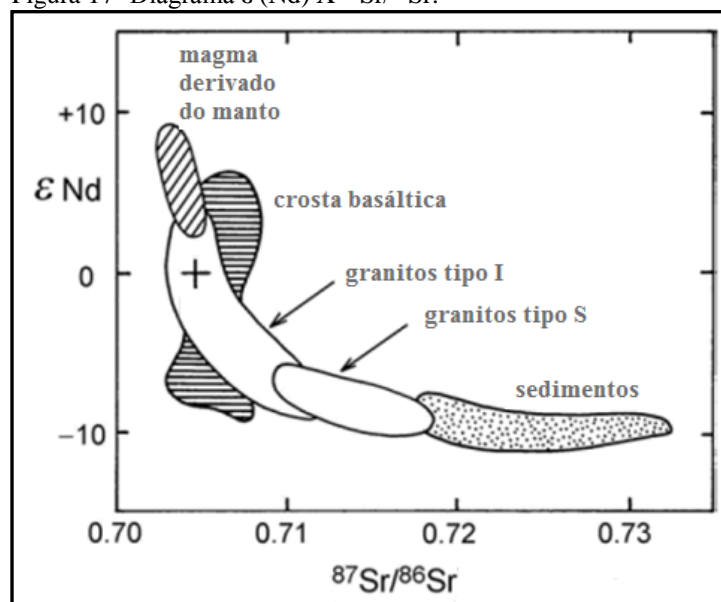
$$\varepsilon(\text{Sr}) = \left[ \left( \frac{^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(m)}}{^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(\text{CHUR})}} \right) - 1 \right] * 10000 \quad (2)$$

Sendo,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(m)}$  é a razão medida hoje e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(\text{CHUR})} = 0,7045$ .

#### 4.9.4 Diagrama $\epsilon$ (Nd) X $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

No diagrama de evolução isotópica do  $\epsilon$  (Nd) X  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (Figura 17) observa-se que altas razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e baixas razões  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , definem o campo de rochas com grande contaminação da crosta continental enquanto que as razões de rochas mantélicas possuem alta razão de Nd e baixa razão de Sr, definindo um caminho hiperbólico entre as rochas de composição mantélica e as rochas mais continentais (DePAOLO, 1981).

Figura 17- Diagrama  $\epsilon$  (Nd) X  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .



Legenda: Diagrama do Cinturão orogênico *Lachlan* mostrando a hipérbole entre um componente mantélico e um componente crustal. O símbolo + representa a média da Terra (*bulk earth*).  
Fonte: Modificado de DICKIN, (2005) p. 199.

#### 4.9.5 Procedimentos de separação química dos elementos (Sr e Nd) e espectrometria de massas

As amostras pulverizadas foram encaminhadas ao Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR) instalado na Faculdade de Geologia (FGEL) da Universidade

do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) para separação química dos elementos e espectrometria de massa.

O LAGIR dispõe de um moderno sistema de climatização e filtragem de ar com pressão positiva. Todos os ácidos utilizados são bidestilados em frascos de teflon no modo sub-ebulição e a água é deionizada em um purificador Milli-Q® (18 $\Omega$ ).

Os procedimentos químicos são realizados em capelas de fluxo laminar e de exaustão e a análises espectrométricas em um espectrômetro de massa por termo-ionização (TIMS), modelo TRITON multicoletores da Thermo Finnigan® (Figura 18).

Figura 18- Espectrômetro de massa TRITON – LAGIR.



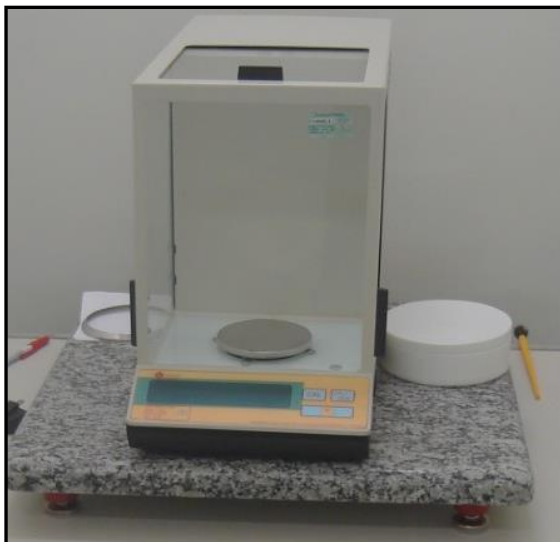
Fonte: A autora, 2018.

A pesagem das amostras (~50mg) foi realizada em balança de precisão analítica com erro de  $\pm 0,0001$  g (Figura 19). Posteriormente, as amostras passaram por um tratamento de remoção de matéria orgânica com peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 30%. Em seguida, a digestão das amostras foi feita em recipientes de teflon Savillex® com 3,0 mL de ácido fluorídrico (HF 48%) e 0,5 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> 6,0N) em chapa quente a 120°C por



três dias. Após esta etapa, foram adicionados 3,0 mL de ácido clorídrico (HCl 6,0N) em cada amostra que foi colocada para secar por dois dias em chapa quente a 120°C.

Figura 19- Balança de precisão analítica.



Fonte: A autora, 2018.

As separações químicas dos elementos Sr e Nd foram realizadas por cromatografia de troca iônica. O Sr e os elementos terras raras (ETR) foram separados em colunas primárias (Figura 20), preenchidas com resina Bio-Rad AG-50W-X-8 (100-200 mesh), o Sr foi eluído com ácido clorídrico (HCl 2,5N) e os ETR's com HCl 6,0N. O Nd foi separado em colunas secundárias (Figura 20) com resina LN-Spec (150 mesh) utilizando HCl 0,18N. Esses procedimentos utilizados no LAGIR/UERJ são descritos em NETO, et al., (2009), VALERIANO, et al., (2009) e VAZ, et al., (2009).

Figura 20 - Colunas de troca iônica.



Legenda: à esquerda, colunas primárias e à direita, colunas secundárias – LAGIR.

Fonte: A autora, 2018.

A deposição das amostras foi realizada em filamentos de Rênio (Re), juntamente com 2  $\mu\text{L}$  do ativador iônico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  1,0N utilizando um amperímetro para secagem total da amostra até a corrente 2,5 A (Figura 21).

Figura 21- Deposição de amostra em filamento.



Fonte: A autora, 2018.

Os filamentos com amostras foram inseridos em um carrossel na fonte de ionização no espectrômetro e analisados no espectrômetro de massa para obtenção das razões  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  naturais (sem adição de traçador isotópico). As análises de Nd e Sr foram realizadas em modo estático com até 8 coletores Faraday e arranjo duplo de filamentos com erro padrão absoluto de  $2\sigma$ .

Para a análise do Sr, a corrente no filamento de ionização fixo foi de 3200 mA e o filamento de evaporação, variando de acordo com a amostra, entre 1800-2200 mA obtendo-se pelo menos 100 ciclos por análise. Para correção do fracionamento isotópico foi usada a razão  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8,3752$  e para correção de uma possível interferência isobárica causada pelo  $^{87}\text{Rb}$  foi utilizada a razão  $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb}$  igual a 0,3860.

A análise do Nd foi realizada com o valor da corrente do filamento de ionização fixo em 4500 mA e o filamento de evaporação, variando de acordo com a amostra, entre 1800-2200 mA, obtendo-se pelo menos 160 ciclos por análise. Para correção do fracionamento isotópico foi usada a razão  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$ . O valor do branco das amostras para Nd ficou abaixo de 200 pg.