



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Michael McMaster

**Caracterização e implicações tectônicas do Enxame de Diques da Costa do
Esqueleto da região noroeste da Namíbia**

Rio de Janeiro

2017

Michael McMaster

Caracterização e implicações tectônicas do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto da região noroeste da Namíbia

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientado: Prof. Dr. Julio Cesar Horta de Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Miguel Ângelo Mane

Rio de Janeiro

2017

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

M478 McMaster, Michael.
Caracterização e implicações tectônicas do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto da região noroeste da Namíbia / Michael McMaster. – 2015.
120 f. : il.

Orientador: Julio Cesar Horta de Almeida.
Coorientador : Miguel Ângelo Mane
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Geologia estrutural – Sudeste, Brasil – Teses. 2. Geologia estrutural – Noroeste Namíbia, África – Teses. 3. Geologia física – Teses. 4. Geoquímica – Teses. 5. Cinemática – Teses. I. Almeida, Julio Cesar Horta de. II. Mane, Miguel Ângelo. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 551.1

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

Assinatura

Data

Michael McMaster

Caracterização e implicações tectônicas do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto da região noroeste da Namíbia.

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Aprovada em 22 de Fevereiro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Julio Cesar Horta de Almeida (Orientador)
Faculdade de Geologia - UERJ

Prof. Dr. Miguel Ângelo Mane (Coorientador)
Faculdade de Geologia - UERJ

Profª. Dra. Monica da Costa Pereira Lavalley Heilbron
Faculdade de Geologia - UERJ

Profª. Dra. Eliane Guedes
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2017

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas me ajudaram a tornar este mestrado uma realidade, eu gostaria agradecer estas pessoas aqui. Em primeiro lugar meus pais que sempre me apoiaram em tudo o que eu faço mesmo quando a vida me levou para muito longe deles.

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Julio Almeida, meu orientador e amigo, que vem me motivando desde 2012, quando nós começamos a sonhar em realizar este projeto de mestrado com campo na Namíbia.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro da pesquisa através do processo no. E-26/010.002995/2014 (“Geodinâmica do Atlântico Sul no contexto do Gondwana: Implicações para Exploração de Petróleo e Gás no Estado do Rio de Janeiro”) da Profa. Monica Heilbron.

À Profa. Dra. Monica Heilbron por ter acreditado neste projeto e pela ajuda com questões geotectônicas e geoquímicas. Ao Prof. Dr. Miguel Mane, meu coorientador, pela paciência em explicar as técnicas de processamento e interpretação de dados aeromagnéticos.

Ao Geological Survey of Namíbia (GSN) pelo fornecimento de dados geológicos e aerogeofísicos que foram utilizados neste trabalho. Também pelo apoio logístico pra realizar o trabalho de campo no noroeste da Namíbia, com um agradecimento especial à geóloga Johanna Linus (GSN) que nos acompanhou durante o campo.

Aos meus amigos e colegas tanto da pós-graduação como da graduação da Faculdade de Geologia da UERJ pelo companheirismo, especialmente o Henrique Bruno e Aimée Guida que ajudaram no campo e pelos momentos de alegria e "sofrimento" compartilhados durante os últimos dois anos. Ao Prof. Dr. Marcelo Motta do Departamento de Geografia da PUC-RJ, e o Felipe Frai que também participaram do trabalho de campo na Namíbia.

Aos Daniel Adelino, Bruno Gomes, Wilmer Geraldo, pelas discussões geológicas (mesmo no bar) e por Vitalino do Carmo, que me recebeu no seu sítio num momento crítico do processo criativo. Aos Ibyata Shirakawa, Jefer Caldeira e Natasha Albuquerque pela revisão do meu português.

A Davi Miguens do Laboratório de Estudos Tectônicas (LET), por ajudar com ArcGIS e pela amizade. Para todos os funcionários do LGPA-FGEL pela confecção das lâminas petrográficas e pela preparação das minhas amostras para análise litogeoquímica.

A Profa. Dra. Eliane Guedes e Prof. Dr. Anderson Costa pela ajuda com a petrografia e geoquímica das minhas amostras.

RESUMO

MCMASTER, Michael. *Caracterização e implicações tectônicas do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto da região noroeste da Namíbia*. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O Enxame de Diques da Costa do Esqueleto (SCDS) é intrusivo em sedimentos permocarboníferos, e granitos pan-africanos, metasedimentos neoproterozoicos, e embasamento arqueno á mesoproterozoico da região noroeste da Namíbia. Dados aeromagnéticos e imagens de satélite permitiram o mapeamento de diques máficos, que tende se paralelo ao litoral mas com um número significativo de diques que cortam as estruturas pan-africanas da Faixa Kaoko. O SCDS se estende por mais de 2000 km com uma provável continuação para Angola, esses diques são encontrados até 200 km do litoral em direção ao interior. Observações de campo indicaram que os diques são relacionados às rochas vulcânicas do Grupo Etendeka que, junto com os basaltos, vulcânicas ácidas e enxames de diques toleíticos do S-SE do Brasil, formam a província magmática de Paraná-Etendeka, de idade eocretácica (119-139 Ma). A análise litogeoquímica de 30 diques mostrou que a maioria dos diques são qtz-toleítos de baixo-Ti, de dois tipos: 1) qtz-toleítos enriquecidos $[(La/Yb)_N - 3,43 \text{ a } 6,46]$ e; 2) qtz-toleítos com padrões de REE semelhantes ao E-MORB $[(La/Yb)_N < 3,4]$. O primeiro grupo de diques são geralmente de orientação N15W enquanto a segundo grupo são de orientação N70E / N85E. É possível determinar as direções de esforços máxima e mínima atuantes durante a intrusão dos diques aplicando os princípios da análise cinemática e através da identificação de feições assimétricas tais como bifurcações, pontes, zigue-zagues, e diques escalonados. Três gerações de diques foram identificadas: 1) diques de orientação NNW-SSE associado à extensão normal de direção ENE-WSW; 2) diques de orientação ENE-WSW, geralmente com uma componente sinistral indicando extensão NW-SE e; 3) diques de orientação N80W a N45W com uma componente dextral ou sinistral, indicando extensão 25-225°. O SCDS pode se comparado com o Enxame de Diques do Florianópolis (FDS), ao restuarar a América do Sul para sua posição pré-quebra, mostrando que a direção principal de ambos os enxames de dique é equivalente. Gerações múltiplas de diques também são reconhecidas no FDS, mas é intepretado que a maioria dos diques dos dois enxames intrudiu durante a fase inicial da quebra de Gondwana, caracterizada por extensão ENE-WSW.

Palavras-chave: Análise cinemática. Paraná-Etendeka. Gondwana Ocidental.

ABSTRACT

MCMMASTER, Michael. *Characterisation and tectonic implications of the Skeleton Coast Dyke Swarm (SCDS) North West Namibia*. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The Early Cretaceous, Skeleton Coast Dyke Swarm (SCDS) was intruded into Permo-Carboniferous sediments, Pan-African granites, Neoproterozoic metasediments, and Archaean to Mesoproterozoic basement of NW Namibia. Aeromagnetic data and satellite imagery has been used to map the distribution of the generally coast parallel mafic dykes and a significant number of dykes that cut across Pan-African structures of the Kaoko Belt. Dykes of the SCDS were mapped up to 200km from the coast and across 2000km of NW Namibia with likely continuation into Angola. Field relationships indicate that the majority of the dykes are related to the Etendeka volcanics of Namibia. These volcanics, together with the basalt and rhyolite lava flows and associated mafic dyke swarms of S-SE Brazil, form the Paraná-Etendeka magmatic province of Early Cretaceous age (119-139 Ma). Geochemical analysis of about 30 dykes show that the majority of the dykes are low-Ti quartz tholeiites of two types: 1) qtz-tholeiites enriched in LREE [(La/Yb)_N - 3.43 to 6.46]; & 2) more 'primitive' qtz-tholeiites with REE patterns similar to E-MORB [(La/Yb)_N < 3.4]. The former dykes typically strike N15W whilst the latter strike N70E / N85E. By applying the principals of kinematic analysis and through the identification of asymmetrical features such as zigzagging, branching and en échelon dykes, and bridges between dyke segments we were able to determine the shear sense and estimate the direction of maximum and minimum stress of the regional stress field active during dyke intrusion. Three dyke generations have been identified within the SCDS: 1) NNW-SSE dykes associated with normal ENE-WSW extension; 2) ENE-WSW dykes often with a sinistral component indicating NW-SE extension; & 3) WNW-ESE to NW-SE trending dykes with sinistral or dextral components related to NNE-SSW extension. The SCDS has been compared with the contemporary Florianopolis dyke swarm (FDS), by restoring South America to its pre-break-up position, showing that the principal direction of both dyke swarms is equivalent. Multiple generations of dykes are also recognised in the FDS, but we interpret that the majority of the dykes of the SCDS & FDS were intruded during an early phase of Gondwana break-up characterised by ENE-WSW extension.

Keywords: Kinematic Analysis. Paraná-Etendeka. West Gondwana. Conjugate margins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa de localização da área de estudo	20
Figura 2 –	Etapas de processamento dos dados magnéticos	22
Figura 3 –	Comparação entre os dados do campo magnético anômalo e os mesmos dados reduzidos ao polo da Área 3 (Torra Bay)	25
Figura 4 –	Primeiras derivadas do campo magnético anômalo de Área 3	27
Figura 5 –	Comparação entre mapas temáticos dos dados magnéticos de Área 3	28
Figura 6 –	Deconvolução de Euler dos dados magnéticos da região de Torra Bay	31
Figura 7 –	Mapa Geológico e seção esquemática da Faixa Kaoko	35
Figura 8 –	Eventos tectôno-metamórficos da Faixa Kaoko	37
Figura 9 –	Reconstrução Tectônica de parte do Gondwana Ocidental	39
Figura 10 –	Isótopos de Nd-Sr dos basaltos (e vulcânicas ácidas) da Paraná-Etendeka	40
Figura 11 –	Geoquímica dos tipos de basaltos do Grupo Etendeka, clastos basálticos do conglomerado de Albin, Basaltos de Kudu e OIB do Atlântico Sul	41
Figura 12 –	Diagrama de Mohr e o envoltório de ruptura com as fraturas relacionadas	43
Figura 13 –	Classificação da geometria de dique-fratura	44
Figura 14 –	Dique lamprofírico em zigue-zague, Aiguablava, Espanha	45
Figura 15 –	Relação geométrica entre os diversos componentes dos campos de tensão interna	46
Figura 16 –	Geometrias indicativas de cisalhamento durante alojamento	47
Figura 17 –	A relação das fraturas internas de resfriamento com o campo de esforço externo	47
Figura 18 –	Mapeamento dos diques na região de Torra Bay	49
Figura 19 –	Histograma da espessura dos diques do SCDS.....	50
Figura 20 –	Dique de diabásio na margem norte do Rio Huarusib	51
Figura 21 –	Dique dolerítico em zigue-zague exposto na planície costeira entre <i>Terrace Bay</i> e <i>Mowe Bay</i>	52
Figura 22 –	Fotomicrografias de um dique de dacito e olivina toleitos do NW da	

	Namíbia	54
Figura 23–	Fotomicrografias de quartzo-toleítos do NW da Namíbia	55
Figura 24–	Diagrama de Total-álcali vs. Sílica (Cox et al., 1979)	56
Figura 25–	Diagrama ternário AFM de Irvine & Baraga, 1971	57
Figura 26–	Diagrama binário de Sr e TiO ₂ das rochas 'basálticas'	61
Figura 27–	Aranhagrama dos REE dos quartzo-toleítos normalizados para condrito	64
Figura 28–	Aranhagrama dos REE dos diques dacitos, olivina-basaltos e nefelinito amostrados	65
Figura 29–	Diagrama binário da razão (La/Yb) _N vs. MgO (%) dos quartzo-toleítos (Grupos 4, 5a, 5b)	66
Figura 30–	Rosetas das direções dos diques eocretácicos e das estruturas pan-africanas da Faixa Kaoko	69
Figura 31–	Dique de basalto de orientação NNW cortando filitos da Fm. Braks River	69
Figura 32–	Rosetas das direções de diques do SCDS com <50 km e >50 km do litoral	70
Figura 33–	Diques com bifurcações ~40 km NW de <i>Mowe Bay</i>	71
Figura 34–	Dique basáltico aflorando num corte do Rio Hoarusib no núcleo orogênico da Faixa Kaoko	72
Figura 35–	Dique basáltico de orientação ENE-WSW cortando um dique diabásico de orientação NNW-SSE, ~3,3km SE do <i>Mowe Bay</i> na Costa do Esqueleto.....	73
Figura 36–	Diques basálticos de orientação ENE-WSW, ~3 km NNE do <i>Mowe Bay</i> na Costa do Esqueleto.....	74
Figura 37–	Dique em zigue-zague de orientação NW-SE entre <i>Terrace Bay</i> e <i>Mowe Bay</i> , Costa do Esqueleto.....	75
Figura 38–	Roseta das direções de esforço mínimo e máximo esforços atuantes durante a intrusão dos diques do noroeste da Namíbia	76
Figura 39–	Imagem de satélite mostrando três gerações de diques cortando granitos na região de <i>Mowe Bay</i>	77
Figura 40–	Razões de Zr/Y e Ti/Zr dos diques e derrames máficos amostrados neste estudo e os diques do enxame de Henties Bay-Outjo (HOD)	80

Figura 41–	Razões de Zr/Nb e La/Nb dos diques 'basálticos' amostrados e os diques do (HOD)	82
Figura 42–	Detalhe da reconstrução tectônica de parte do Gondwana Ocidental	84
Figura 43–	Mapa geológico simplificado do sudeste de Santa Catarina e rosetas de direções dos diques do FDS	86
Figura 44–	Ponte entre segmentos de um dique e uma roseta das direções de mínimo e máximo esforços dos diques do FDS	87
Figura 45–	Conteúdo de TiO ₂ e MgO dos diques do FDS e os diques e derrames 'basálticos' amostrados	88
Figura 46–	Razões de Ti/Y e conteúdo de Sr do diques do FDS e os diques e derrames 'basálticos' amostrados	89
Figura 47–	Comparação dos campos de esforços do SCDS e FDS na sua posição pré-quebra com os eventos extensionais associados à abertura do Atlântico identificado no NW da Namíbia por Salomon et al. (2015) ...	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Dados dos levantamentos aerogeofísicos usados neste estudo.....	21
Tabela 2 –	Valores de referência do campo magnético nas áreas com dados aeromagnéticos de alta resolução	24
Tabela 3 –	Modelos geológicos e seus valores do Índice estrutural (SI)	48
Tabela 4 –	Classes dos diques mapeados	32
Tabela 5 –	Análise normativa CIPW	59
Tabela 6 –	Terras Raras, normalizados para condrito, das rochas vulcânicas e intrusivos amostrados	62
Tabela 7 –	Características dos cinco grupos geoquímicos	67
Tabela 8 –	Eventos distensivos associados à intrusão de diques no NW da Namíbia ..	77
Tabela 9 –	Características dos principais tipos de magmas básicos da Província Etendeka	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACT Labs	<i>Activation Laboratories Ltd.</i>
AS	<i>Analytical Signal</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CKZ	<i>Central Kaoko Zone</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil)
COGO	<i>Coordinate geometry</i>
D	Declinação do campo magnético terrestre
dX	Primeira derivada horizontal em X (leste-oeste)
dY	Primeira derivada horizontal em Y (norte-sul)
dZ	Primeira derivada vertical
EKZ	<i>Eastern Kaoko Zone</i>
Elev.	Elevação
Espac.	Espaçamento
FGEL/UERJ	Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro
FDS	<i>Florianópolis Dyke Swarm</i>
Fm.	Formação
Fcl	Fratura interna de resfriamento - longitudinal
Fct	Fratura interna de resfriamento - transversal
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GSN	<i>Geological Survey of Namibia</i>
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
GHT	Gradiente Horizontal Total
Gp.	Grupo
HFSE	Elementos de elevado potencial iônico
I	Inclinação do campo magnético terrestre
Ia	Inclinação pra correção da amplitude do filtro
ICP-OES	Espectrometria de emissão atômica de plasma acoplado indutivamente
ICP-MS	Espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
LGPA	Laboratório geológico de processamento de amostras

Lat.	Latitude
Long.	Longitude
NCEI	<i>National Centers for Environmental Information</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NEE	<i>North-east-east</i>
NNW	<i>North-north-west</i>
NW	<i>North West</i>
Orient.	Orientação
Plag.	Plagioclásio
Qtz	Quartzo
REE	Terras raras
RTP	<i>Reduced-to-pole</i>
RTMI	<i>Residual Total Magnetic Intensity</i>
Seq.	<i>Sequência</i>
SCDS	<i>Skeleton Coast Dyke Swarm</i>
SQR	<i>Square Root</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSE	<i>South-south-east</i>
SW	<i>South west</i>
SWW	<i>South-west-west</i>
T	<i>Campo magnético total</i>
WKZ	<i>Western Kaoko Zone</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

km^2	Quilômetros quadrados
m	Metros
-	Negativo/subtrair
\leq	Menor ou igual
=	Igual
π	Pi
Θ	Direção do número de onda (relação com o orient. da anomalia magnética)
sin	seno
cos	coseno
$\sqrt{\quad}$	Raiz quadrada
+	Mais
nT	Nanoteslas
%	Porcentagem
mm	Milímetro
g	Gramas
\pm	Mais ou menos
\times	Multiplicação
cm	Centímetro

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	17
1	OBJETIVOS	18
2	PROCEDIMENTOS E METODOS	19
2.1	Revisão Bibliográfica	19
2.2	Processamento dos dados aeromagnéticos	19
2.1.1	<u>Redução ao polo magnético</u>	22
2.1.2	<u>Primeiras derivadas e gradiente horizontal total do campo magnético anômalo</u> ...	26
2.1.3	<u>Sinal Analítico (AS)</u>	26
2.2.4	<u>Deconvolução de Euler</u>	29
2.3	Trabalho de campo	30
2.4	Litogeoquímica e Petrografia	32
2.5	Análise Estrutural	33
3	SÍNTESE DA GEOLOGIA DA REGIÃO NW DA NAMÍBIA	34
3.1	Embasamento cristalino: Faixa Kaoko	34
3.2	Magmatismo Paraná-Etendeka e a Quebra Eocretácea do Gondwana	38
4	CONCEITOS SOBRE A TECTÔNICA DE ENXAMES DE DIQUES	42
5	CARACTERIZAÇÃO DO ENXAME DE DIQUES DA COSTA DO ESQUELETO	48
5.1	Mapeamentos dos diques com dados aeromagnéticos e sensoriamento remoto	48
5.2	Aspectos de campo	50
5.3	Petrografia	52
5.4	Dados Litogeoquímica	56
6	ANÁLISE GEOMÉTRICA, CINEMÁTICA E DINÂMICA DO ENXAME DE DIQUES DA COSTA DO ESQUELETO	68
6.1	Distribuição geográfica e orientação dos diques	68
6.2	Análise cinemática e dinâmica	71
7	DISCUSSÕES	78
7.1	Correlação entre os enxames de diques e derrames da Província Etendeka	78
7.2	Correlação do SCDS com o enxame de diques da Florianópolis (FDS)	83

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS.....	93
ANEXO A - Dados aeromagnéticas do NW da Namíbia	106
ANEXO B – Mapas dos diques do NW da Namíbia	107
ANEXO C – Resultados Geoquímicas	108
ANEXO D – Mapa geológico da região de Brandberg-Ugab	118
ANEXO E – Mapa geológico do Complexo de Erongo	119
ANEXO F – Mapa geológico do Rio Hoarusib/Purros	120

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o Prof. Dr. Julio Almeida e outros pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Geotectônica - Tektos vêm desenvolvendo técnicas de mapeamento e análise estrutural dos exames de diques Eocretácicos no litoral sul-sudeste do Brasil (Almeida et al., 2013). Nesta dissertação realizou-se a aplicação destas técnicas e o conhecimento acumulado nesses anos á caracterização do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto associados as rochas vulcanicas do Grupo Etendeka na ão noroeste da Namíbia (SW África).

O embasamento cristalino da área de estudo esta inserido na porção central da Faixa Kaoko, que se formou durante a amalgamação da Gondwana Ocidental (Miller, 1983). Muitos autores sugeriram que a quebra do Gondwana Ocidental no Eocretáceo foi controlada por estas zonas de cisalhamento e outras estruturas pan-africanas/brasilianas pré-existentes. É importante ressaltar o evento precursor da quebra, o magmatismo da Província Ígnea de Paraná-Etendeka. Este evento é representado na região de estudo por diques doleríticos frequentemente subparalelos às estruturas pan-africanas e portanto de orientação WSW-ENE na faixa Damara e NNW-SSE na Faixa Kaoko. Além da intrusão de diques doleríticos com idades ca. 132 e 125 Ma (Renne et al., 1996a , Ewart et al., 1984), o magmatismo é caracterizado pela extrusão volumosa dos basaltos de Etendeka (132Ma; Renne et al., 1996a) e pelos complexos ígneos de Damaraland (134-128 Ma; Allsopp et al., 1984, Milner et al., 1995b, Renne et al., 1996a).

Os objetivos da presente dissertação incluem o mapeamento e a caracterização cinemática do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto (aqui caracterizado), na região noroeste da Namíbia. A contribuir para a elaboração de um modelo de evolução deformacional para a quebra do Gondwana e subsequente abertura do Oceano Atlântico.

Este trabalho é justificado pela ausência de trabalhos científicos similares e pela esperada contribuição ao refinamento de modelos geodinâmicos da abertura do Atlântico Sul e o desenvolvimento de bacias marginais com suas acumulações importantes de óleo e gás.

1 OBJETIVOS

A identificação e caracterização de um enxame de diques máficos na região costeira do sudoeste africano, e a presença das vulcânicas de Etendeka na Namíbia motivou a realização de uma pesquisa geológica, a fim de reconhecer e comparar este magmatismo com as vulcânicas da Fm. Serra Geral e os enxames de diques conhecidos no sul-sudeste do Brasil. A falta de dados específicos sobre os diques do noroeste da Namíbia e a sua possível correlação com os enxames de Florianópolis e de Ponta Grossa no sul do Brasil estimularam o interesse no levantamento de dados estruturais, petrológicos e geoquímicos daqueles diques.

O presente projeto de dissertação teve como objetivos o reconhecimento e a caracterização petrológica, geocronológica e estrutural do “Enxame de Diques da Costa do Esqueleto”, ou *Skeleton Coast Dyke Swarm (SCDS)*, descrito pela primeira vez neste trabalho, e sua inserção no contexto da fase inicial da quebra do Gondwana e da abertura do Atlântico Sul no Eocretáceo.

Como objetivos específicos desta pesquisa destacam-se:

- a) Elaboração de um mapa do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto (SCDS);
- b) Caracterização geoquímica do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto;
- c) Identificação do campo de esforços atuante durante a intrusão dos diques do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto
- d) Correlação estrutural do Enxame de Diques da Costa do Esqueleto com o Exame de Diques de Florianópolis.

2 PROCEDIMENTOS E METODOS

O trabalho focou no mapeamento dos diques, na sua caracterização geoquímica e na análise estrutural e cinemática do enxame de diques toleíticos ecretácicos da região noroeste da Namíbia.

Para atingir este objetivo foi adoptado uma metodologia multidisciplinar envolvendo as seguintes etapas abaixo escrita: a) levantamento bibliográfico; b) análise de dados aeromagnéticos; c) trabalho de campo; d) petrografia; e) litogeoquímica; f) análise cinemática e dinâmica dos diques; g) integração regional.

2.1 Revisão Bibliográfica

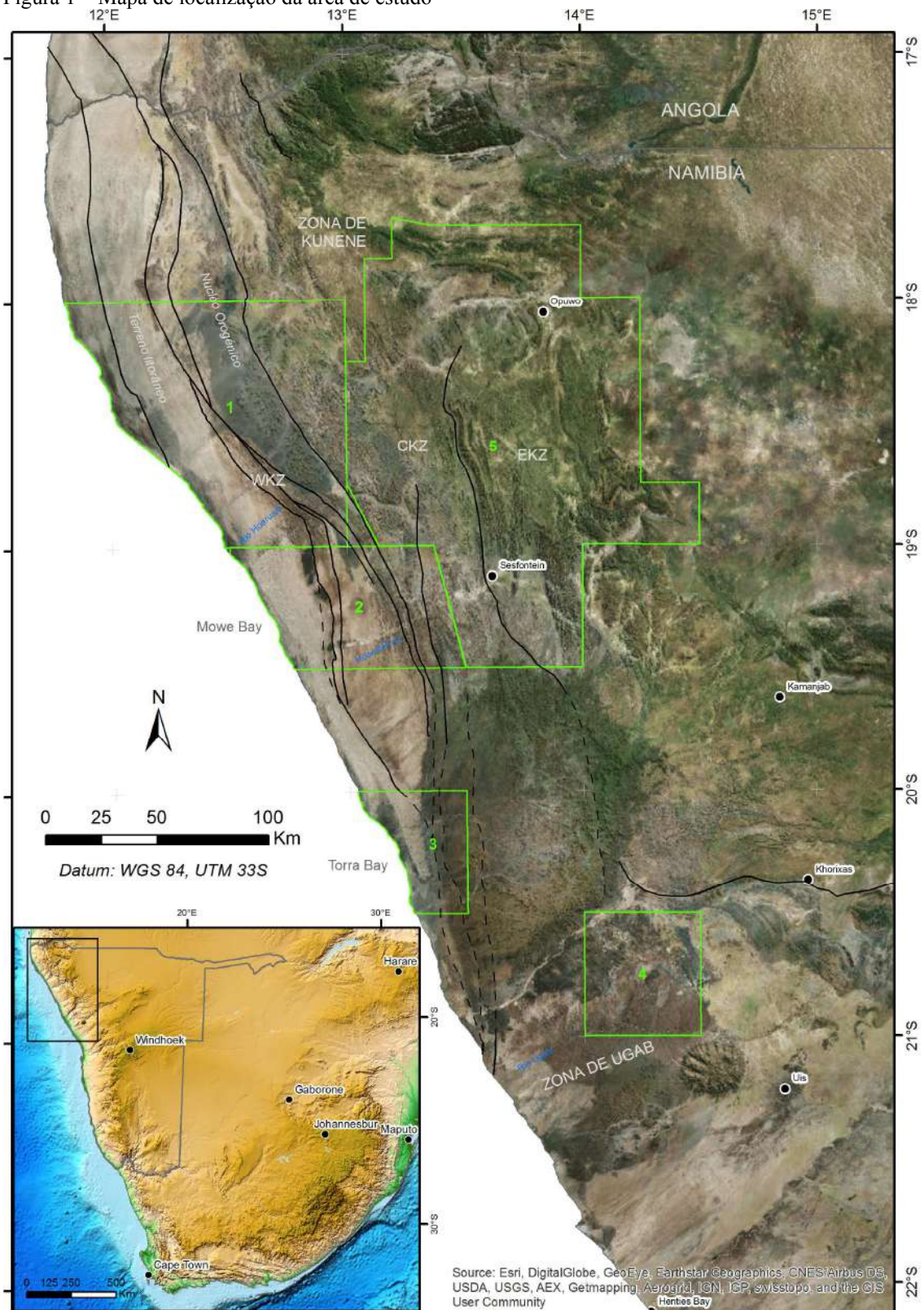
Foi necessário o levantamento de dados sobre as principais características petrológicas deste magmatismo, sua comparação com as vulcânicas da província magmática de Paraná-Etendeka (uma *LIP-Large Igneous Province* reconhecida mundialmente), além de uma extensa investigação sobre a dinâmica de intrusão desses diques, com o intuito de fornecer subsídios para o entendimento do campo de esforços atuante durante a quebra do Gondwana, nos seus estágios iniciais.

2.2 Processamento dos dados aeromagnéticos

Os dados aeromagnéticos se mostraram adequados para o mapeamento de diques máficos, pois geram anomalias magnéticas lineares devido a sua alta susceptibilidade magnética em contraste com as rochas encaixantes. O processamento dos dados magnéticos é discutido embaixo.

Dados aeromagnéticos de alta resolução foram adquiridos do Serviço Geológico da Namíbia (GSN) de cinco áreas de interesse cobrindo um total de 40.895 quilômetros quadrados (km²) da região noroeste da Namíbia (Figura 1, Anexo A). O restante da região conta com dados de baixa resolução obtidos a partir do georreferenciamento do mapa da variação do campo magnético anômalo/residual (*Residual Total Magnetic Intensity* - RTMI) disponível no site do GSN - *Earth Data Namíbia*.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo



Legenda: Modelo digital de terreno global (SRTM) e imagem de satélite mostrando a localização da área de estudo no noroeste da Namíbia. Os polígonos verdes mostram a cobertura dos dados aeromagnéticos de alta resolução fornecidas pelo *Geological Survey of Namibia* (GSN).

Nota: WKZ - *Western Kaoko Zone* - WKZ, CKZ- *Central Kaoko Zone*, EKZ - *Eastern Kaoko Zone*

Fonte: Modificado de GOSCOMBE & GRAY, 2008.

Os dados de alta resolução foram fornecidos na forma de grids (*.ers - *ER Mapper Data file format*) da variação de RTMI, ou seja, já corrigido pela variação diurna e com a remoção do campo geomagnético internacional de referência (IGRF). Estes dados foram coletados durante levantamentos aéreos executados entre os anos 1994 e 2010 e, em consequência, quatro das cinco áreas contém dados de mais de um levantamento aéreo. O processamento inclui a padronização dos dados pelo GSN por interpolação para produzir *grids* integrados de cada área, com uma resolução espacial de cinquenta metros (50m). Porém, a qualidade dos dados foi heterogênea, já que o espaçamento e a direção das linhas de produção variam entre os levantamentos diferentes, conforme listado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dos levantamentos aerogeofísicos usados neste estudo.

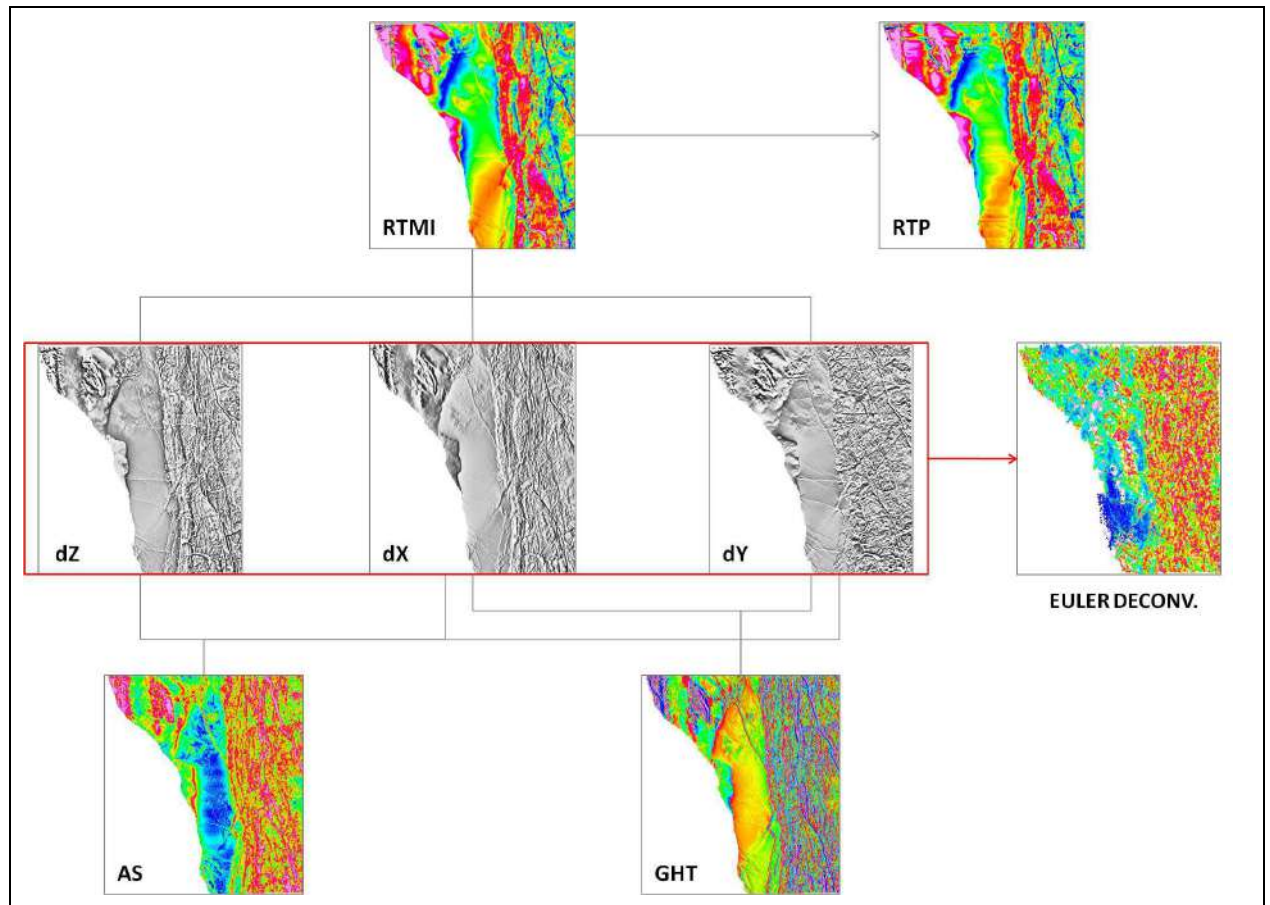
ID	Nome	Área (km ²)	Levantamento	Ano	Espac. das linhas de produção	Direção das linhas de produção	Altitude do voo (nominal)	Modelo IGRF ¹
1	Khumib	10340	GPX Surveys - Skeleton Coast, Geoterrex - sub-blocos Sesfontein e Orubembe	2009/10, 1994/95	200, 200-400m	N-S, E-W	80m, 100m	2005 e 1990
2	Mowe Bay	4582	GPX Surveys - Skeleton Coast, Geoterrex - sub-bloco Sesfontein	2009/10, 1994/95	200m	N-S, E-W	80m, 100m	2005 e 1990
3	Torra Bay	1862	GPX Surveys - Fransfontein	2006/07	200m	E-W	80m	2005
4	Ugab-Brandberg West	2881	GPX Surveys - Brandberg-Central e Fransfontein	2010, 2006	200m	N-S	2895m ASL2, 80m	2005
5	Opuwo	21230	Geoterrex - sub-blocos Sesfontein e Okapawe	1994/95	200m	E-W, N-S	100m	1990

Legenda: 1) Modelo do campo geomagnético internacional de referência removido durante aquisição, 2) Esta altitude foi julgada segura pela operação da aeronave durante o levantamento da região do maciço de Brandberg.

Fonte: O autor, 2017.

O programa Geosoft - Oasis Montaj 7.0 foi usado no processamento dos dados aeromagnéticos. No primeiro momento, foi feito a redução ao polo magnético, porém o resultado não foi satisfatório, como discutido na seção 2.2.1. Além disso, foram geradas, a partir o RTMI de cada área, as três primeiras derivadas, uma vertical e duas horizontais (dZ, dX e dY), a Amplitude do Sinal Analítico (AS) e o Gradiente Horizontal Total (GHT). As profundidades das fontes magnéticas das anomalias magnéticas foram estimadas através da Deconvolução de Euler. Uma síntese das etapas de processamento é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Etapas de processamento dos dados magnéticos



Legenda: Etapas de processamento dos dados magnéticos utilizados neste projeto exemplificado pelos dados de Área 4 (Torra Bay). RTMI - campo magnético anômalo; residual, RTP - redução ao polo magnético do campo magnético anômalo, dZ - primeira derivada vertical do campo magnético anômalo; dX - primeira derivada horizontal em X (leste-oeste) do campo magnético anômalo, dY - primeira derivada horizontal em Y (norte-sul) do campo magnético anômalo; AS - sinal analítico; GHT - gradiente horizontal total; EULER DECONV. - Soluções da inversão da Deconvolução de Euler.

Fonte: Modificado do RUY ET AL., 2006.

2.2.1 Redução ao polo magnético

O filtro de redução ao polo magnético (RTP) foi aplicado ao campo magnético anômalo (RTMI) de cada área. Este filtro envolve a correção da geometria das anomalias magnéticas de orientação leste-oeste e a correção da amplitude das anomalias magnéticas de orientação, com o objetivo de aproximar as anomalias que seriam observadas se as respectivas fontes (corpos) magnéticas no polo magnético, onde a inclinação (I) do campo magnético terrestre é vertical (90°). Desta maneira, o filtro tira a dipolaridade das anomalias magnéticas localizadas em latitudes magnéticas baixas ($-30 \leq I \leq 30$) e centraliza-as sobre suas respectivas

fontes (corpos) magnéticas. Este método assume que as anomalias magnéticas são causadas apenas por magnetização induzida e desconsidera os efeitos de magnetização remanente. Grant & Dodds (1972) mostraram que a redução ao polo pode ser calculada através do seguinte algoritmo:

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i\cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2} \quad (1)$$

Onde: θ = Direção do número de onda (relação com a orient. da anomalia magnética)

I = Inclinação do campo magnético terrestre

D = Declinação do campo magnético terrestre

A partir da equação acima (1), é possível observar que, conforme a inclinação (I) se aproximado zero (ou seja, no equador magnético) e a (D- θ) se aproxima de $\pi/2$ (ou seja, associado a feições de orientação norte-sul), o resultado da função se aproxima de infinito (Mendonça & Silva, 1993). Ou seja, as amplitudes de anomalias magnéticas com orientação norte-sul localizadas em baixas latitudes são exageradas. Além disso, esta correção grande da amplitude de feições norte-sul também pode amplificar os componentes norte-sul de ruído e os efeitos magnéticos de corpos com magnetização remanente. Grant & Dodds (1972) introduziram uma segunda variável, a inclinação (Ia) para controlar a amplitude do filtro em latitudes magnéticas baixas:

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(Ia) + i\cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2} \quad (2)$$

Onde: Ia = Inclinação pra correção da amplitude do filtro (nunca menor que I)

Dessa maneira, um valor de latitude magnética alta pode ser aplicado somente para a componente de amplitude do filtro, reduzindo ou eliminando o problema de sobrecorreção das amplitudes de anomalias magnéticas com orientação norte-sul. Por exemplo, se o ângulo da inclinação de amplitude for igual a 90° (negativo no hemisfério sul), a correção da componente de fase vai ser aplicada aos dados, porém, sem nenhuma correção da amplitude. Se um valor igual à inclinação do campo terrestre na área de estudo é usado, as componentes de fase e de amplitude do algoritmo são aplicadas sobre todos os dados. Então, controlando o filtro RTP é uma questão de escolher o menor possível valor de (Ia) que ainda fornece resultados aceitáveis. Para conseguir aplicar o filtro RTP para os dados do projeto, foi necessário obter os valores de inclinação e declinação do campo magnético da Terra do ponto

central de cada área, numa data correspondente ao fim do levantamento aerogeofísico mais recente. Estes valores foram calculados através da calculadora do Campo Magnético Terrestre, disponível on-line no site da NCEI-NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>), usando o modelo mais recente do campo geomagnético de referência internacional (IGRF) - Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de referência do campo magnético nas áreas com dados aeromagnéticos de alta resolução

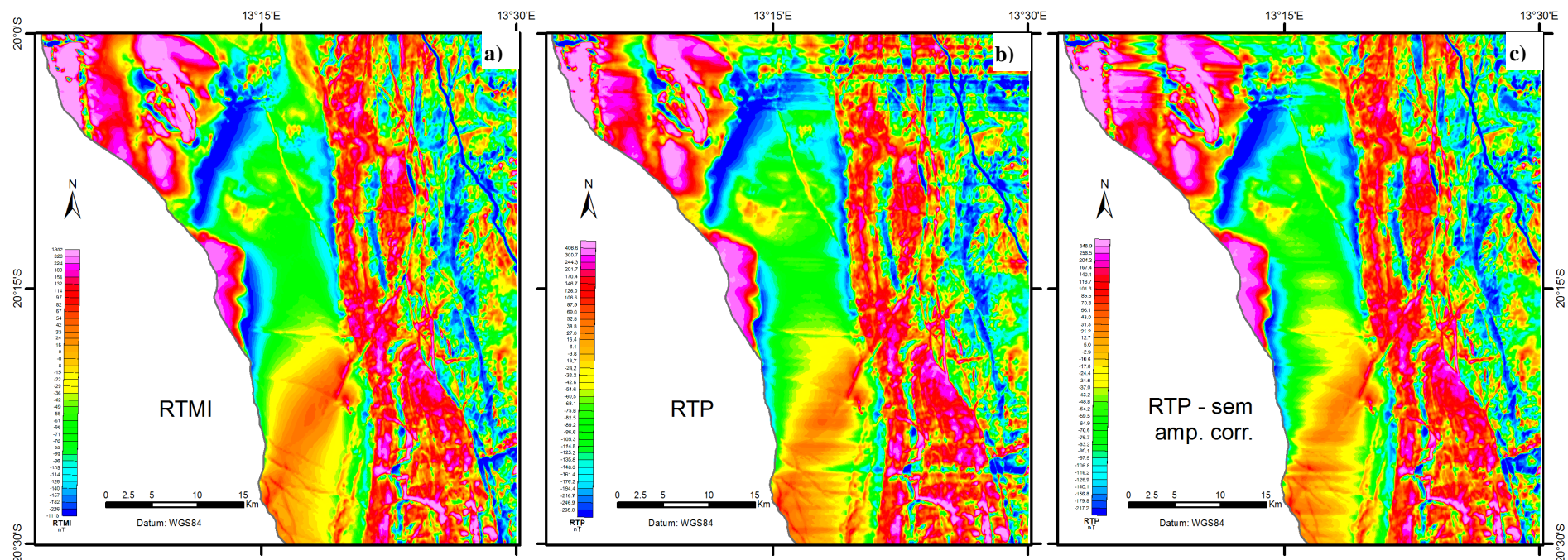
ID	Nome	Declinação (D)	Inclinação (I)	Data	Long. (dd)	Lat. (dd)	Elev. (m) ¹
1	Khumib	-10.75338	-61.04343	30/06/2010	12.50	-18.50	411
2	Mowe Bay	-11.33619	-62.00532	30/06/2010	13.00	-19.50	483
3	Torra Bay	-12.4989	-62.36984	30/06/2006	13.33	-20.25	212
4	Ugab-Brandberg West	-11.91939	-63.02735	30/06/2010	14.25	-20.75	542
5	Opuwo	-12.53718	-60.01812	30/06/1995	13.67	-18.50	1673

Legenda: 1) Valor de elevação do ponto central de cada área tirado do modelo digital de elevação (SRTM) somado com a altura média do avião durante o levantamento de cada área.

Fonte: O autor, 2017.

Os valores de inclinação magnética variam entre -61 e 63° , ou seja, as áreas deste estudo estão localizadas em latitudes magnéticas médias e não deveria sofrer sobrecorreção das amplitudes de feições com orientação norte-sul. Porém, como mostrado na Figura 3b a aplicação do filtro redução ao polo magnético aos dados resultou na criação de anomalias lineares falsas de orientação leste-oeste. Estas feições provavelmente são artificios do processamento sendo a amplificação de ruído presente nos dados devido a erros no nivelamento entre as linhas de produção do levantamento aéreo. O melhor resultado foi obtido quando apenas o componente de fase foi aplicado aos dados, ou seja, usando uma inclinação de amplitude (Ia) de -90 . Mesmo assim, as anomalias falsas da primeira derivada persistiram no mapa (Figura 3c). Por esta razão, os mapas de RTP não foram utilizados na interpretação dos dados aeromagnéticos, e também porque o deslocamento (correção) das anomalias é pequeno sendo que a bipolaridade das anomalias magnéticas não é pronunciada.

Figura 3 – Comparação entre os dados do campo magnético anômalo e os mesmos dados reduzidos ao polo da Área 3 (Torra Bay)



Legenda: a) Mapa do campo magnético anômalo/residual; b) a redução ao polo magnético com aplicação do componente de amplitude; e c) sem nenhuma correção de amplitude.

Fonte: O autor, 2017.