



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 129

**USO DE LIDAR AEROTRANSPORTADO PARA MAPEAMENTO E
ANÁLISE ESTRUTURAL DE DEPÓSITOS FERRÍFEROS NA SERRA
SUL DE CARAJÁS, AMAZÔNIA**

Tese apresentada por:

FRANCISCO RIBEIRO DA COSTA

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro (UFPA)

BELÉM

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Costa, Francisco Ribeiro da, 1973-

Uso de lidar aerotransportado para mapeamento e análise estrutural de depósitos ferríferos na serra sul de Carajás, Amazônia / Francisco Ribeiro da Costa. – 2018

xii, 90 f. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Coorientador: Roberto Vizeu Lima Pinheiro

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2018.

1. Sensoriamento Remoto - Carajás, Serra dos (PA). 2. Radar óptico - Carajás, Serra dos (PA). I. Título.

CDD 22. ed.: 621.3678098115

Elaborado por
Hélio Braga Martins
CRB-2/698



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**USO DE LIDAR AEROTRANSPORTADO PARA
MAPEAMENTO E ANÁLISE ESTRUTURAL DE DEPÓSITOS
FERRÍFEROS NA SERRA SUL DE CARAJÁS, AMAZÔNIA**

**TESE APRESENTADA POR:
FRANCISCO RIBEIRO DA COSTA**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOLOGIA**

Data de Aprovação: 29 /03 /2018

Banca Examinadora:



Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador)



Prof. Venerando Eustáquio Amaro
Membro – UFRN



Prof. Carlos Eduardo Mesquita de Barros
Membro – UFPR



Prof. Arnaldo de Queiroz da Silva
Membro– UFPA



Prof. Moacir José Buenano Macambira
Membro– UFPA

A minha família, em especial a Elisângela e Maria Eduarda pela paciência, perseverança e amor. Dedico a vocês esta Tese

AGRADECIMENTOS

- A Deus pelo dom da vida;
- A Universidade Federal do sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), pela licença para cursar o Doutorado
- A CAPES/PRODOUTORAL e a PROPIT pela concessão da bolsa de Doutorado;
- Ao PPGG pela infraestrutura concedida;
- Aos Professores José Augusto, Marcelo Cohen e Marcondes Lima pela avaliação da proposta de doutorado
- Aos meus amigos e orientadores Prof. Dr. Pedro Walfir e Prof. Dr. Roberto Vizeu pelo tempo dedicado à orientação;
- A minha esposa Elisângela pela ajuda e compreensão nos diversos momentos de dificuldade, um agradecimento ESPECIAL;
- Aos meus pais Raimundo e Terezinha pelo incentivo e apoio;
- Aos meus cunhados, cunhadas, concunhados e cuncunhadas (Gorete, Everaldo, Elivaldo, Deka, Neuza, Meuri) pelo incentivo e apoio “Logístico” em Tailândia e Concordia do Pará;
- Aos diversos amigos da UNIFESSPA;
- Aos amigos do ITV (Instituto Tecnológico Vale), Tasso Guimarães, Prafulla Kumar, Marcio Souza pela amizade e contribuição durante os trabalhos de campo.
- Aos amigos do LAIT, Paulo, Afonso, Wilson, Michele, Lourival, Glenda, Thiele entre outros, pelos momentos de descontração no nosso café da tarde e pela convivência sempre agradável;
- Aos amigos da FAGEO, Professores Ari, Aderson, Leonardo, Emídio, Gilmara, Valeria e Alice pelos momentos de descontração no nosso café da tarde e pela convivência sempre agradável;
- Aos amigos da VALE S.A, Daniele Freitas, Rafael Guimarães, Carlos Teles, Divino Fleury,
- Ao projeto PROCAV - LEVANTAMENTO GEOESPELEOLÓGICO DE CAVIDADES NATURAIS DA UNIDADE ESPELEOLÓGICA DE CARAJÁS, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS – PA, pelo apoio logístico e financeiro no desenvolvimento desta tese. Em nome do Prof. Dr. Antônio Emídio faço esse agradecimento extensivo ao Prof. Dr. Marivaldo Nascimento idealizador deste projeto.

- A empresa VALE S.A que forneceu as informações aqui utilizadas e financiou esta Tese;
- Ao LAIT (Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido) pelo uso da infraestrutura e licenças de softwares nesses anos de Trabalho
- A todas as pessoas que contribuíram de forma positiva para que esta tese tivesse êxito.

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”. (Roger Von Oech)

RESUMO

Esta pesquisa está centrada na definição de métodos para a utilização de dados de Light Detection And Range – LiDAR em mapeamento geológico estrutural. Na Região Amazônica, em particular nas formações ferríferas bandadas da Província Mineral de Carajás – PMC, a cobertura vegetal compromete a extração de informações estruturais a partir de dados de sensoriamento remoto ótico, pois ela mascara as feições geomorfológicas e estruturais que podem corresponder as estruturas geológicas. Esta tese abordou a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens de dados LiDAR, a partir de i) modelo de relevo sombreado – MRS do, o qual foi utilizado uma configuração com oito modos de iluminação com visadas distintas variando de 45° entre elas, para geração de mapas de alinhamentos; e ii) filtragem laplaciana em modelo de relevo sombreado – FLMRS em visadas multidirecionais. Em ambos os mapas resultantes foram observados os mesmos trends estruturais, NE-SW, NW-SE e secundariamente N-S e E-W. No entanto, o mapa gerado a partir da FLMRS em visadas multidirecionais apresentou uma melhor geometria da distribuição espacial dos lineamentos. Os resultados obtidos a partir da análise dos dados LiDAR foram comparados com dados estruturais coletados e analisados a partir do estudo da deformação do minério de ferro e nas rochas vulcânicas associadas na mina da Serra Sul de Carajás - S11D. A análise estrutural mostrou um único episódio refletindo encurtamento na direção E-W, com a instalação de dois sistemas de falhas, uma de direção NE-SW e a mais nova de direção NW-SE. Esta deformação é responsável pela geometria das rochas do platô S11D, formando uma sequência sinformal/antiformal com caimento para NE e SE acompanhando o e desses sistemas de falhas e com planos axiais mergulhando em alto ângulo para NW e NE formando dobras com padrões de interferência complexos. A laminação no minério de ferro preserva ainda estruturas primárias e não há evidências de milonitização pervasiva nestas rochas. Propõe-se um modelo deformacional para as rochas do Platô S11D relacionado a transpressão controlada pela Falha Carajás durante movimentos sinistrais regionais. A análise comparativa de mapas estruturais gerados com dados LiDAR aerotransportados e métodos manuais tradicionais foram realizados a partir do comparativo dos dois mapas. O cálculo e quantificação da dispersão das linhas de contorno estrutural em cada área a partir dos diferentes métodos mostrou um coeficiente de correlação que variou entre 0,91 e 0,93, sugerindo um bom grau de similaridade entre as estruturas mapeadas, embora haja variações na orientação e abundância nas linhas de contorno

estrutural. Em geral, os resultados demonstram a eficácia dos dados LiDAR aerotransportado para extrair informações estruturais detalhadas e precisas em terrenos tropicais, podendo ser utilizados para complementar o mapeamento estrutural baseado em dados de campo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; LiDAR; Carajás; S11D.

ABSTRACT

This research is focused on the definition of methods for the use of Light Detection And Range - LiDAR data in structural geological mapping. In the Amazon Region, in particular in the banded iron formations of the Mineral Province of Carajás - PMC, the vegetal cover compromises the extraction of structural information from optical remote sensing data, since it masks the geomorphological and structural features that can correspond the geological structures. This thesis addressed the application of digital image processing techniques of LiDAR data, from i) shaded relief model - MRS do, which used a configuration with eight lighting modes with different views ranging from 45° between them, to generation of alignment maps; and ii) laplacian filtration in shaded relief model - FLMRS in multidirectional visions. In both resulting maps the same structural trends, NE-SW, NW-SE and secondarily N-S and E-W were observed. However, the map generated from the FLMRS in multidirectional visions presented a better geometry of the spatial distribution of the lineaments. The results obtained from the analysis of LiDAR data were compared with structural data collected and analyzed from the study of iron ore deformation and associated volcanic rocks at the Serra Sul de Carajás mine - S11D. The structural analysis showed a single episode reflecting shortening in the E-W direction, with the installation of two fault systems, one NE-SW direction and the new NW-SE direction. This deformation is responsible for the geometry of the rocks of the S11D plateau, forming a sinformal / antiformal sequence with NE and SE trim along with these fault systems and with axial planes dipping at high angles to NW and NE forming folds with complex interference patterns. Lamination in iron ore still preserves primary structures and there is no evidence of pervasive milonization in these rocks. It proposes a deformational model for the rocks of the S11D Plateau related to transpression controlled by the Carajás Fault during regional sinistral movements. The comparative analysis of the structural maps generated with airborne LiDAR data and traditional manual methods were performed from the comparative of the two maps. The calculation and quantification of the dispersion of the structural contour lines in each area from the different methods showed a correlation coefficient that varied between 0.91 and 0.93, suggesting a good degree of similarity between the mapped structures, although there are variations in the orientation and abundance in the structural contour lines. In general, the results demonstrate the effectiveness of the airborne LiDAR data to extract detailed

and accurate structural information on tropical terrain and can be used to complement the field-based structural mapping.

Keywords: Remote Sensing; LiDAR; Carajás; S11D.