

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

Pedro Massochin Medeiros

A GÊNESE DA PAISAGEM NA ESTRUTURA DE IMPACTO DO CERRO DO
JARAU (RS), COM O USO DE VANT

Porto Alegre

2019

PEDRO MASSOCHIN MEDEIROS

**A GÊNESE DA PAISAGEM NA ESTRUTURA DE IMPACTO DO CERRO DO
JARAU (RS), COM O USO DE VANT**

Monografia apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Rafael da Rocha Ribeiro.

Porto Alegre

2019

PEDRO MASSOCHIN MEDEIROS

**A GÊNESE DA PAISAGEM NA ESTRUTURA DE IMPACTO DO CERRO DO
JARAU (RS), COM O USO DE VANT**

Monografia apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Geografia.

Aprovado em: 12/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Katia Kellem da Rosa
Departamento de Geografia/UFRGS

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa
Professor aposentado do Instituto de Geociências/UFRGS

Prof. Dr. Rualdo Menegat
Departamento de Paleontologia e Estratigrafia/UFRGS

Prof. Dr. Rafael da Rocha Ribeiro (orientador)
Departamento de Geodésia/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meus pais, Pedro Luiz da Silva Medeiros (*in memoriam*) e Soeli Terezinha Medeiros por sempre me incentivarem a ser uma pessoa correta e me oportunizar, através dos seus esforços, a estudar e estar completando esta etapa de vida.

As minhas irmãs, Suellen e Brenda, por sempre me incentivarem a ir atrás dos meus sonhos.

A minha esposa e ao meu enteado, Laura e Murilo, por sempre me apoiarem durante este período de graduação, principalmente neste último semestre.

Ao professor Rafael da Rocha Ribeiro pela árdua tarefa de me orientar no trabalho de conclusão de curso.

Aos colegas de trabalho, técnicos e professores, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, por me apoiarem e me ajudarem durante o período de graduação.

Aos colegas técnicos Éder e Robson do Instituto de Geociências, e ao professor Nelson Amoretti Lisboa por me ajudarem no levantamento de campo.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul por me oportunizar a formação de Bacharel em Geografia através do ensino público de qualidade.

RESUMO

As crateras originadas por impactos de meteoritos são formações raras presentes no relevo terrestre. O estudo dessas feições é de extrema importância para o conhecimento da evolução geológica, geomorfológica e biológica do planeta, pois estes eventos ocorridos a milhares de anos atrás causaram a extinção de espécies e a modificação do relevo no local do impacto. A estrutura de impacto do Cerro do Jarau (Latitude: 30°11'59" S e Longitude: 56°33'57" O) no município de Quaraí (RS), é uma possível cratera de impacto por um corpo celeste. Geologicamente pertencente à Bacia do Paraná, a estrutura apresenta-se em forma circular com um diâmetro de aproximadamente 14 km, diferenciando-se das feições geomorfológicas da Cuesta do Haedo, onde está inserida. O presente trabalho realizou um levantamento aerofotogramétrico com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) com o objetivo de elaborar um Modelo Digital de Superfície (MDS) e um ortomosaico de dois transectos, um no sentido norte-sul e outro no sentido leste-oeste, com dimensões de aproximadamente 12 km de comprimento por 150 metros de largura. Através da obtenção do MDS com resolução espacial de 0,25 m/pixel e do ortomosaico com resolução espacial de 0,10 m/pixel foi possível interpretar a geomorfologia/geologia da área de estudo, identificando feições de relevo como morros, morrotes e corpos d'água com padrão radial centrípeto, que distinguem o Cerro do Jarau da paisagem do entorno. A visualização de afloramentos e lineamentos nos ortomosaicos auxiliaram no entendimento da configuração litoestratigráfica, onde as bordas norte e nordeste do núcleo da estrutura de impacto apresentam afloramentos de arenitos da Formação Botucatu (brechas de impacto) e altitudes superiores ao oeste e sul. Isto reforça a hipótese de que através do conjunto de falhas existentes houve o soerguimento do setor norte/nordeste e um rebaixamento ao sul/oeste.

Palavras-chaves: cratera de impacto; VANT; modelo digital de superfície; fotointerpretação geomorfológica e geológica.

ABSTRACT

Craters originating from meteorite impacts are rare formations present in the earth's relief. The study of these features is of extreme importance for the knowledge of the geological, geomorphological and biological evolution of the planet, because these events occurred thousands of years ago caused the extinction of species and the modification of the relief at the impact place. The impact structure of the Cerro do Jarau (Latitude: 30°11'59" S and Longitude: 56°33'57" W) in the city of Quaraí (RS), is a possible impact crater by a celestial body. Geologically belonging to the Paraná Basin, the structure is circular in shape with a diameter of approximately 14 km, differing from the geomorphological features of the Cuesta do Haedo, where it is inserted. The present work carried out an aerophotogrammetric survey with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) with the objective of elaborating a digital elevation model (DEM) and an orthomosaic of two transects, one in the north-south direction and another in the east-west direction, with dimensions approximately 12 km long by 150 meters wide. By obtaining DEM with spatial resolution of 0,25 m/pixel and the orthomosaic with spatial resolution of 0,10 m/pixel, it was possible to interpret the geomorphology/geology of the study area, identifying relief features such as hills, small hills and bodies of water with a radial centripetal pattern, which distinguish the Cerro do Jarau from the surrounding landscape. The visualization of outcrops and lineaments in the orthomosaics helped to understand the lithostratigraphic configuration, where the north and northeast edges of the core of the impact structure present sandstones of Botucatu Formation (impact gaps) and higher altitudes to the west and south. This reinforces the hypothesis that through the set of existing failures there was a rise of the north/northeast sector and a downgrading to the south/west.

Keywords: impact crater; UAV; digital surface model; geomorphological and geological interpretation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os pontos brancos indicam a localização de crateras de impacto reconhecidas pela PASSC na superfície terrestre.	14
Figura 2 - Localização das estruturas com origem e possível origem por impacto no Brasil.	14
Figura 3 - Localização da estrutura de impacto do Cerro do Jarau.	16
Figura 4 - Representação dos processos de formação de uma cratera de impacto.	20
Figura 5 - Imagem e figura esquemática de uma cratera simples na superfície da Lua.	21
Figura 6 - Imagem e figura esquemática de uma cratera complexa na superfície de Vênus.	21
Figura 7 - Modelo Digital de Elevação SRTM 90 metros do Cerro do Jarau.	22
Figura 8 - Cone de Estilhaçamento da cratera de Vista Alegre (PR).	23
Figura 9 - Feições de Deformação Planar em cristais de quartzo dos arenitos da porção centro-leste da estrutura de impacto do Cerro do Jarau identificada por Philipp <i>et al.</i> (2010).	24
Figura 10 - Possível brecha de impacto em rocha de arenito encontrada no núcleo da estrutura de impacto do Cerro do Jarau.	25
Figura 11 - Unidades Geomorfológicas do Rio Grande do Sul.	28
Figura 12 - Domínios Morfoclimáticos do Rio Grande do Sul.	30
Figura 13 - Regiões Geomorfológicas do Rio Grande do Sul, segundo IBGE (1986).	31
Figura 14 - Mapa Geológico da Bacia do Paraná.	33
Figura 15 - Mapa Geológico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.	34
Figura 16 - Mapa Geológico da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná.	36
Figura 17 - Mapa Geológico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau proposto por Philipp <i>et al.</i> (2010).	37
Figura 18 - Mapa Geológico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau proposto por Lourenço (2007).	38
Figura 19 - Mapa Geológico da Estrutura de Impacto do Cerro do Jarau proposto por Sánchez (2014).	40
Figura 20 - Elementos da orientação exterior.	42
Figura 21 - Exemplo da elaboração de uma ortofoto.	44

Figura 22 - Posicionamento relativo GNSS.....	46
Figura 23 - Macroformas do relevo.	47
Figura 24 - Formas de relevo.	48
Figura 25 - VANT eBee fabricado pela empresa SenseFly.....	51
Figura 26 - Receptor GNSS de navegação modelo Garmin GPS 72H.	52
Figura 27 - Receptor GNSS Topcon GR-3 rastreando um ponto de controle.	53
Figura 28 - Fluxograma das etapas e processos realizados.	55
Figura 29 - Transectos e Pontos de Controle planejados.	57
Figura 30 - Plano de voo elaborado para o setor 1 do transecto norte-sul.....	58
Figura 31 - Fotografias aéreas carregadas no <i>software Agisoft Metashape Pro</i>	61
Figura 32 - Alinhamento das fotografias aéreas.....	62
Figura 33 - Identificação dos pontos de controle.....	63
Figura 34 - Nuvem densa de pontos com os pontos de controle em azul.....	64
Figura 35 - Construção do MDS dos transectos na estrutura de impacto do Cerro do Jarau.	65
Figura 36 - Construção do ortomosaico dos transectos na estrutura de impacto do Cerro do Jarau.	66
Figura 37 - Modelo digital de superfície e ortomosaico do transecto norte-sul.	68
Figura 38 - Modelo digital de superfície e ortomosaico do transecto leste-oeste.....	69
Figura 39 - MDS e perfil altimétrico com exagero vertical de 10 vezes do transecto norte-sul.	70
Figura 40 - MDS e perfil altimétrico com exagero vertical de 10 vezes do transecto leste-oeste.....	71
Figura 41 - Aspectos geomorfológicos da estrutura de impacto do Cerro do Jarau..	73
Figura 42 - Interpretação geológica da estrutura de impacto.	76
Figura 43 - Mapa de anomalia Bouguer residual da estrutura de impacto.	77
Figura 44 - Perfil altimétrico, anomalias Bouguer e ortomosaico do transecto norte-sul.	78
Figura 45 - Perfil altimétrico, anomalias Bouguer e ortomosaico do transecto leste-oeste.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas obtidas para as bases e pontos de controle.	60
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil.

ASPRS – *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.*

GNSS – *Global Navigation Satellite System.*

GSD – *Ground Control Points.*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária.

Landsat – *Land Remote Sensing Satellite.*

MDS – Modelo Digital de Superfície.

MDT – Modelo Digital do Terreno.

NASA – *National Aeronautics and Space Administration.*

PASSC – *Planetary and Space Science Centre.*

PDF – Feição de Deformação Planar.

RADAMBRASIL – Projeto Radar do Brasil.

RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistema GNSS.

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission.*

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	16
1.3.	OBJETIVOS	18
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1.	CRATERAS DE IMPACTO	19
2.1.1.	Processo de Formação.....	19
2.1.2.	Morfologia das Crateras de Impacto.....	20
2.1.3.	Feições de Impacto	23
2.2.	A ESTRUTURA DE IMPACTO DO CERRO DO JARAU.....	25
2.2.1.	Aspectos Geomorfológicos.....	27
2.2.2.	Contexto Geológico	31
2.3.	FOTOGRAMETRIA	40
2.3.1.	Fotogrametria Digital	41
2.3.2.	Orientação da Câmera	41
2.3.3.	Fototriangulação.....	42
2.3.4.	Modelo Digital de Superfície (MDS).....	43
2.3.5.	Ortofoto e Ortomosaico	43
2.4.	POSICIONAMENTO COM RECEPTOR GNSS	45
2.5.	INTERPRETAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS.....	47
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1.	MATERIAIS	50
3.1.1.	Veículo Aéreo Não Tripulado.....	50
3.1.2.	Receptores GNSS	52
3.1.3.	Outros Equipamentos	53

3.1.4. <i>Softwares</i>	54
3.2. MÉTODOS	54
3.2.1. Levantamento de Dados.....	55
3.2.2. Etapa de Campo.....	56
3.2.2.1. Materialização e Rastreo GNSS dos Pontos de Controle.....	56
3.2.2.2. Elaboração dos Planos de Voo	58
3.2.2.3. Execução do Levantamento Aerofotogramétrico.....	59
3.2.3. Processamento.....	59
3.2.3.1. Bases e Pontos de Controle.....	59
3.2.3.2. Fotografias Aéreas	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.1. MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE E ORTOMOSAICO	67
4.2. FOTOINTERPRETAÇÃO DOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS.....	70
4.3. FOTOINTERPRETAÇÃO DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	74
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. INTRODUÇÃO

“A colisão de corpos celestes (asteroides e cometas) é reconhecida como o principal processo de modificação da superfície dos planetas rochosos no sistema solar” (KOEBERL, 2001). Além disso, eventos como estes foram de vital importância para a “origem e evolução da vida na Terra” (ALVAREZ *et al.*, 1980).

O planeta Terra em seus 4,54 bilhões de anos sofreu diversos impactos ocasionados por corpos celestes. Entretanto, existem poucos registros testemunhos no relevo dessas atividades, pois devido à dinâmica da superfície do nosso planeta, essas crateras, em sua maioria, foram destruídas pelos processos de erosão e sedimentação, bem como pela atividade vulcânica, tectônica e humana. Estas feições na paisagem ocasionadas por impacto de corpos celestes são denominadas de crateras de impacto, que segundo Crósta (2006):

São estruturas formadas quando um planeta ou satélite é atingido por meteoritos, asteroides ou cometas. Os estudos planetários mostraram que não só a Lua como também todos os corpos sólidos do nosso Sistema Solar sofreram intenso bombardeio por corpos desses tipos durante sua história. (p. 1).

Estas crateras são importantes testemunhos de impactos de corpos celestes do passado, pois essas colisões foram responsáveis por alterar a dinâmica do relevo nestas áreas, além de causar a extinção de espécies, resfriamento do planeta devido a nuvens de partículas em suspensão entre outros efeitos. A geomorfologia através da paisagem, a morfologia de suas feições e a altimetria apresentam características únicas nestas crateras de impacto. Com isso, os estudos geomorfológicos, paleoclimáticos, geológicos de alteração estrutural das rochas, entre outros, são de extrema importância para o entendimento da evolução do relevo terrestre destas estruturas (LISBOA *et al.*, 1987).

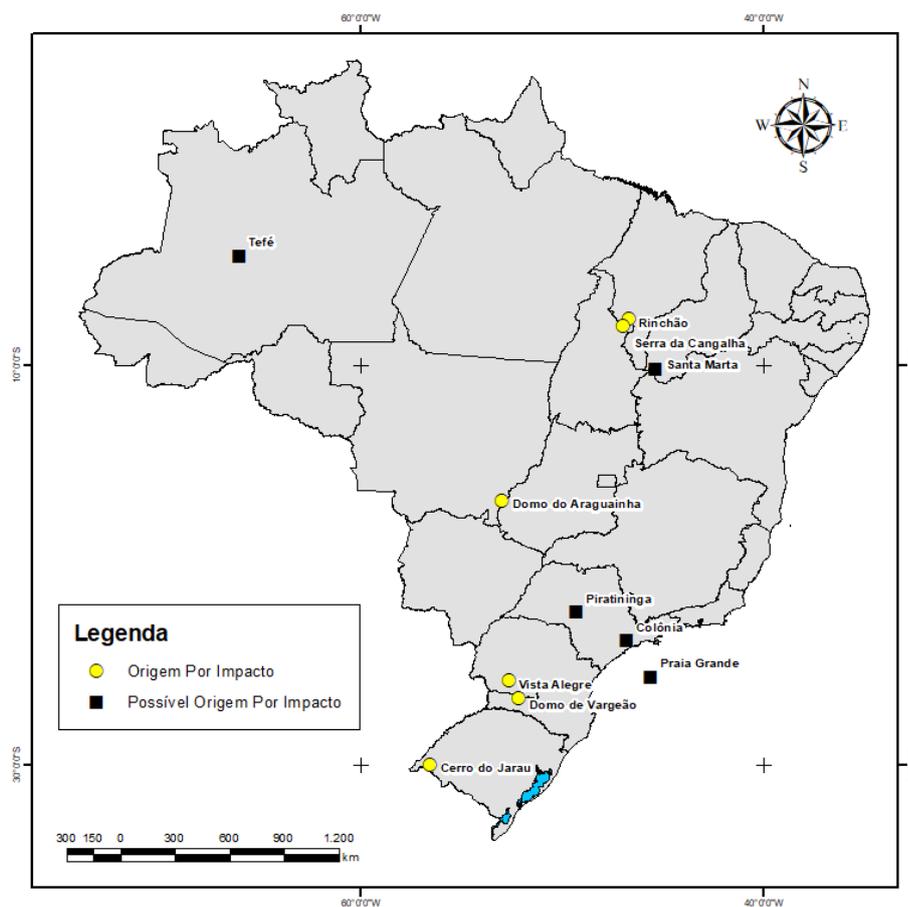
Atualmente, são reconhecidas pelo PASSC (em inglês *Planetary and Space Science Centre*) 190 crateras de impacto na superfície terrestre (Figura 1). No Brasil são reconhecidas 6 estruturas de impacto e outras 5 necessitam de um estudo mais completo para a sua comprovação (Figura 2).

Figura 1 - Os pontos brancos indicam a localização de crateras de impacto reconhecidas pela PASSC na superfície terrestre.



Fonte: Página da internet do *Planetary and Space Science Centre* (<http://www.passc.net>).

Figura 2 - Localização das estruturas com origem e possível origem por impacto no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Este trabalho tem o propósito de realizar um levantamento aerofotogramétrico com VANT em dois transectos (um no sentido norte-sul e o outro no sentido leste-oeste) na estrutura de impacto do Cerro do Jarau. Nestes transectos, com dimensões de 12 km de comprimento por 150 m de largura, serão tomadas fotografias aéreas de alta resolução para geração de Modelo Digital de Superfície e ortomosaico. Com isso, através destes produtos será possível visualizar e estudar a geomorfologia, a estrutura geológica e o relevo presente nesta estrutura de impacto. A escolha destes transectos ocorreu através dos estudos de Giacomini (2015) que em seu trabalho de inversão gravimétrica 3D da estrutura do Cerro do Jarau utilizou dados de gravimetria e rastreamento GNSS para construir um modelo tridimensional de anomalias gravimétricas, onde nestes locais foram interpretadas as unidades litológicas em subsuperfície.

Além disso, através do modelo digital de superfície é possível elaborar perfis topográficos dos transectos, sendo esta ferramenta utilizada em estudos geomorfológicos e geológicos. De acordo com Granell-Pérez (2001) “se bem construído, o perfil apresenta uma imagem precisa da topografia ao longo da linha de interseção, informando sobre a geometria das vertentes, os comprimentos da rampa, as rupturas de declive, a simetria e a dissimetria dos vales, etc.”. Para Ab’Saber (2006 e 2010) estes perfis são denominados de transectos, onde, se preparados adequadamente são ferramentas importantes para compreensão das unidades geomorfológicas, estruturas geológicas, entre outras informações importante da área de estudo.

1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

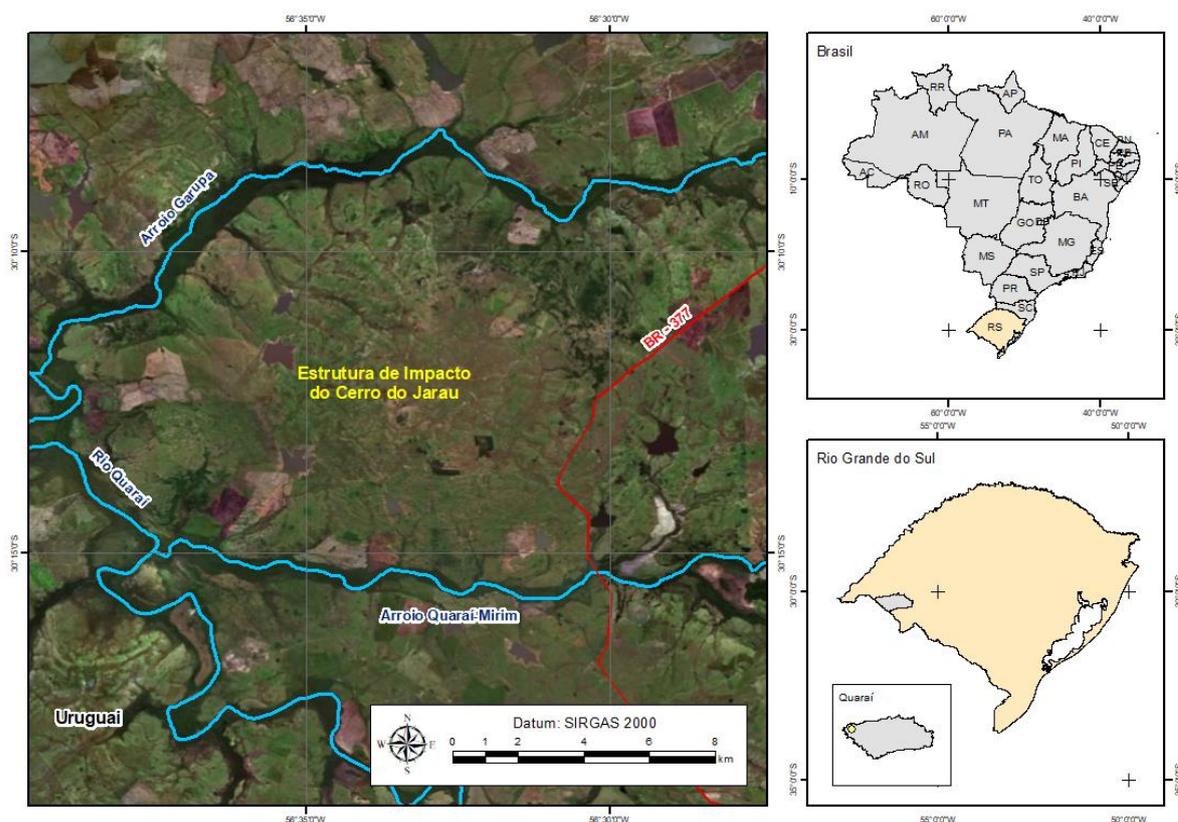
A estrutura originária de impacto por corpo celeste localiza-se no Cerro do Jarau, município de Quaraí, região sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, próximo à fronteira com o Uruguai (Figura 3). Seus limites externos estão marcados pelo arroio Garupá ao norte, arroio Quaraí-Mirim ao sul, rio Quaraí ao oeste e a rodovia BR 377 a leste.

Inserida geologicamente na porção sul da Bacia do Paraná, a estrutura do Cerro do Jarau, apresenta forma circular estruturalmente complexa com diâmetro de

cerca de 14 km. O núcleo da estrutura está soerguido e tem forma circular com 7 km de diâmetro e desníveis de até 160 m entre a sua borda e a porção externa da estrutura (PHILIPP *et al.*, 2010).

Em relação a hidrografia, a drenagem interna da estrutura apresenta um padrão radial centrípeto evidenciando as características de astroblema (CRÓSTA *et al.*, 2010). Além disso, o Cerro do Jarau encontra-se inserido geomorfologicamente na *Cuesta do Haedo* e no domínio morfoclimático das pradarias mistas. Entretanto, esta área apresenta feições diferentes do entorno.

Figura 3 - Localização da estrutura de impacto do Cerro do Jarau.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

1.2. JUSTIFICATIVA

Com a evolução da tecnologia, um levantamento aerofotogramétrico por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), onde são obtidas fotografias aéreas com grande precisão, auxiliado pelo rastreamento GNSS (em inglês *Global Navigation Satellite*

System) de pontos de controle, possibilitará a elaboração de um ortomosaico e um Modelo Digital de Superfície (MDS) em escala de precisão para a realização de interpretações geomorfológicas e geológicas da estrutura de impacto. Sendo esta modalidade de levantamento uma alternativa prática e com um menor tempo de execução em relação aos levantamentos tradicionais de campo (e.g. topografia) para a obtenção destas informações.

Além disso, autores que estudam estas feições como Kazzuo-Vieira (2009), Crósta (2011) e Anjos-Coelho (2015) costumam utilizar modelos de elevação do terreno SRTM (em inglês *Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 90 metros e imagens de satélites Landsat (em inglês *Land Remote Sensing Satellite*) com resolução espacial de 30 metros, onde não é possível a interpretação de algumas feições e estruturas existentes devido à baixa resolução destes dados. Sendo assim, com a realização do levantamento aerofotogramétrico no Cerro do Jarau, será possível o trabalho de pesquisa em crateras de impacto com dados em alta resolução, podendo assim identificar as feições de relevo de forma mais precisa e obter um melhor entendimento da geomorfologia resultante na cratera de impacto.

Estudos geomorfológicos com VANT são escassos, pois os profissionais destas áreas estão mais habituados aos métodos tradicionais de levantamentos e investigação, como no caso de Philipp *et al.* (2010) que utilizaram fotografias aéreas em escalas de 1:110.000 e 1:60.000. Entretanto, a utilização de VANTs nas ciências naturais, como a geografia, geologia, biologia entre outras, está crescendo, por esses veículos transportarem câmeras de alta precisão, GNSS e sistemas inerciais para navegação automática. Com isso, a qualidade dos levantamentos é elevada a um custo reduzido em relação aos tradicionais levantamentos aerofotogramétricos do passado com o uso de aeronaves.

Desta maneira, a execução de um levantamento aerofotogramétrico com VANT no Cerro do Jarau possibilitará a obtenção de fotografias aéreas em alta resolução dos dois transectos para a elaboração de um Modelo Digital de Superfície e um ortomosaico para a realização de interpretações geomorfológicas e geológicas. Sendo assim, a interpretação e análise da morfologia do relevo; e a interpretação das unidades litoestratigráficas da estrutura; serão melhores avaliados através destes dados de alta resolução e escala. Além disso, através destes transectos será possível

complementar os resultados obtidos por Giacomini (2015) que interpretou as unidades litoestratigráficas em subsuperfície através de um levantamento gravimétrico da área de estudo.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo da gênese da paisagem na estrutura de impacto do Cerro do Jarau através de levantamento aerofotogramétrico com VANT.

Além disso, os objetivos secundários deste trabalho serão:

- Elaborar um Modelo Digital de Superfície (MDS);
- Elaborar um ortomosaico;
- Fotointerpretar os aspectos morfológicos;
- Fotointerpretar as unidades litoestratigráficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. CRATERAS DE IMPACTO

As crateras de impacto por meteoritos, asteroides ou cometas são formadas a partir do choque desses objetos em hipervelocidade (velocidades superiores a 10.000 km/h) com a superfície de um planeta ou satélite deixando como marca do impacto, crateras com intensas modificações. De acordo com Crósta (2012), no processo de formação da Terra, o choque desses objetos representou um dos principais processos de agregação de massa nos períodos iniciais do Sistema Solar, há cerca de 4 bilhões de anos.

O termo estrutura de impacto é utilizado em casos nos quais a erosão ou soterramento mascarou a feição topográfica original que caracteriza uma cratera de impacto (GARCIA, 2015). Já o uso do termo astroblema dá-se quando uma cratera de impacto meteorítico encontra-se em estágio avançado de erosão (DIETZ, 1961).

2.1.1. Processo de Formação

Uma cratera de impacto, normalmente possui uma feição em planta na forma circular ou oval com diâmetro variado. A sua formação ocorre através de um processo complexo e contínuo dividido em três estágios onde atuam diferentes forças e mecanismos (Figura 4), que são: contato e compressão; escavação e modificação (GAULT *et al.*, 1968).

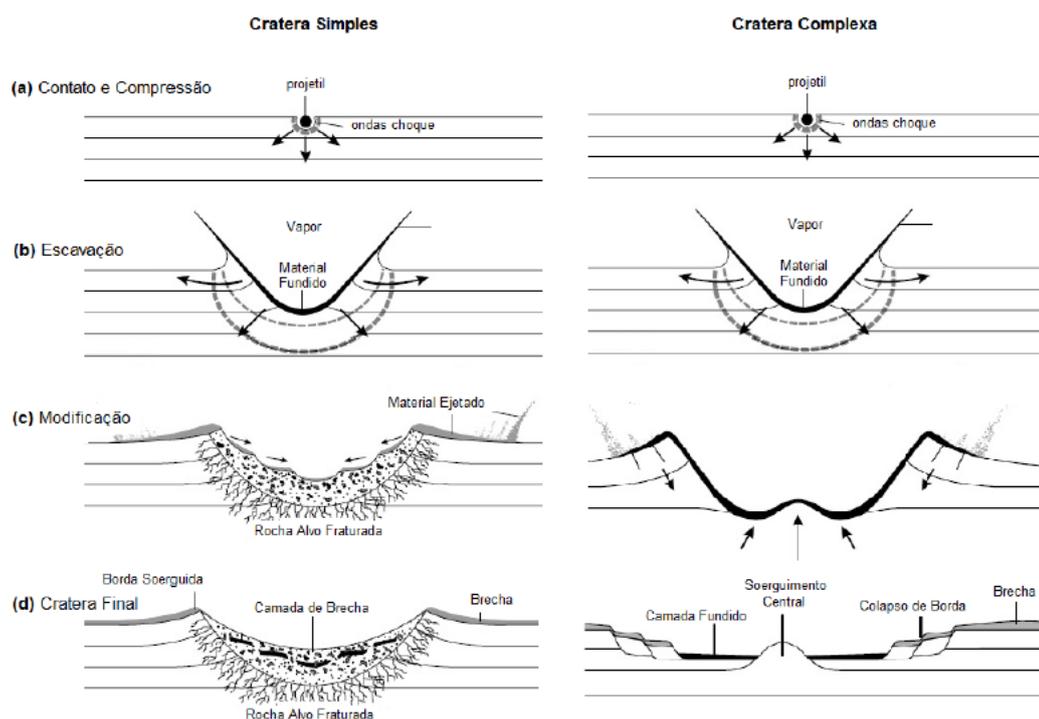
O primeiro estágio, denominada contato e compressão, ocorre quando o corpo celeste colide com a superfície do planeta. A abrupta desaceleração do corpo celeste no momento do choque com a superfície transfere uma grande quantidade de energia cinética para a mesma em um pequeno intervalo de tempo, formando assim, uma zona de altíssima pressão e temperatura onde a propagação das ondas de choque causa a deformação da superfície (VIEIRA, 2009).

No segundo estágio, denominado escavação, ocorre a abertura da cratera de impacto através de uma complexa interação entre a expansão das ondas de choque

e a superfície do terreno (MELOSH, 1989; GRIEVE, 1991). Após a fase anterior, o corpo celeste é envolvido por ondas de impacto que se expandem rapidamente. Além disso, a reflexão e refração das ondas de impacto produzem ondas de rarefação que causam o intenso fraturamento, estilhaçamento e vaporização da rocha da superfície e do corpo celeste (FRENCH, 1998).

O terceiro e último estágio, o de modificação, inicia-se após a cratera atingir seu diâmetro máximo, passando a sofrer modificações geradas por fatores convencionais como a ação da gravidade entre outros processos terrestres de modificação do relevo. Este processo avança ao longo do tempo, através das movimentações de massa, erosão e sedimentação (FRENCH, 1998).

Figura 4 - Representação dos processos de formação de uma cratera de impacto.



Fonte: Modificado de French (1998).

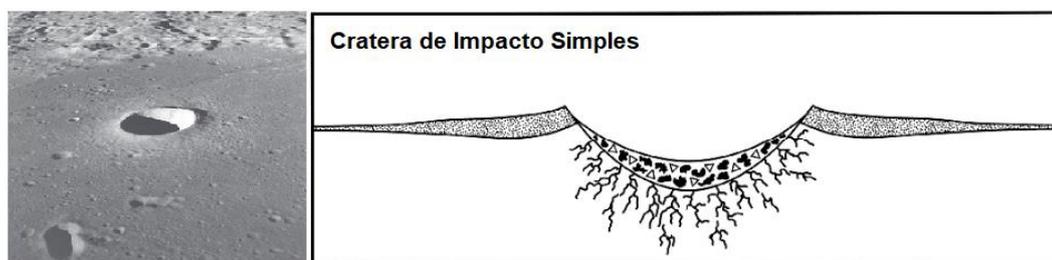
2.1.2. Morfologia das Crateras de Impacto

A morfologia resultante de uma cratera de impacto depende das alterações ocorridas no estágio de modificação de sua formação. Além disso, o tamanho do corpo celeste e as propriedades estruturais da superfície contribuem para essas alterações.

Desta maneira, segundo French (1998), as crateras de impacto podem ser classificadas em até três tipos dependendo da sua extensão e modificação, que são: crateras simples, crateras complexas e crateras do tipo bacia multi-anelar.

As crateras simples (Figura 5) são caracterizadas por depressões circulares em forma de taça ou bacia com até 4 quilômetros de diâmetro, possuindo a borda elevada com o núcleo rebaixado e regular. Após a sua formação as paredes marginais colapsam seguido por deposição no seu interior, sendo este material composto por fragmentos de rochas (FRENCH, 1998).

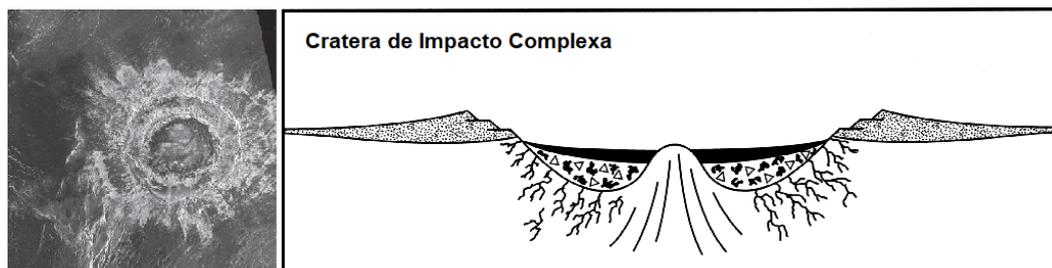
Figura 5 - Imagem e figura esquemática de uma cratera simples na superfície da Lua.



Fonte: Modificado da página de internet da Nasa (<https://www.nasa.gov/feature/asteroid-day-and-impact-craters>).

As crateras complexas (Figura 6) são caracterizadas pela presença de um núcleo soerguido, como no caso do Cerro do Jarau, acrescida de uma depressão em formato de anel no entorno e diâmetro variando de 4 a centenas de quilômetros (FRENCH, 1998). Conforme Philipp *et al.* (2010) a estrutura apresenta feição circular de 14 km de diâmetro e um conjunto morfológico de anéis concêntricos em volta do núcleo. Além disso, o núcleo soerguido reforça esta classificação (Figura 7).

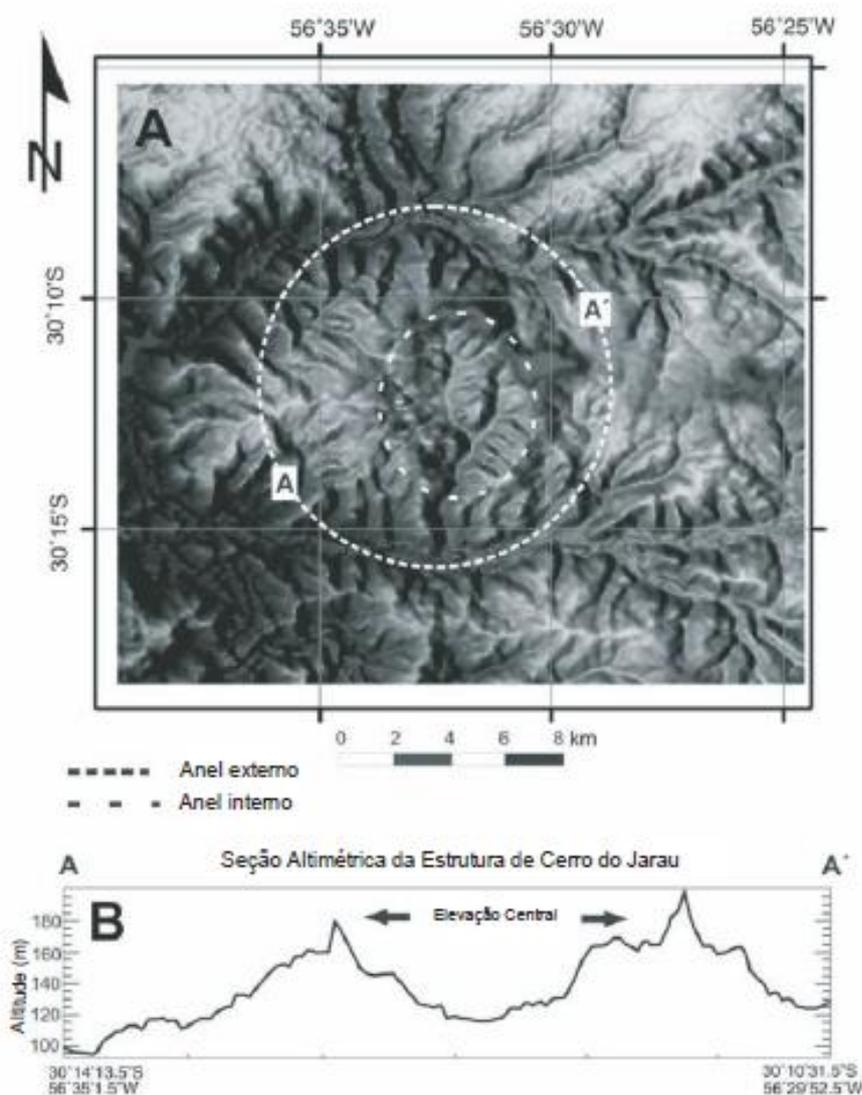
Figura 6 - Imagem e figura esquemática de uma cratera complexa na superfície de Vênus.



Fonte: Modificado da página de internet da Nasa (<https://www.nasa.gov/feature/asteroid-day-and-impact-craters>).

Figura 7 - Modelo Digital de Elevação SRTM 90 metros do Cerro do Jarau.

As linhas pontilhadas indicam a delimitação do limite superior e inferior do conjunto morfológico dos anéis concêntricos. O perfil transversal A-A' com exagero vertical de 8 vezes evidência o núcleo soerguido da estrutura mostrando que a sua altitude é superior à de sua área no entorno.



Fonte: Crósta (2010).

As crateras do tipo bacia multi-anelar são compostas por múltiplos anéis concêntricos e chegam a atingir mais de 1000 quilômetros de diâmetro. Essas foram formadas pelo impacto de projéteis com centenas de quilômetros de diâmetro e datam um período superior a 3,9 bilhões de anos, quando grandes objetos e colisões eram mais frequentes (FRENCH, 1998).

2.1.3. Feições de Impacto

O impacto de um corpo celeste na superfície de um planeta produz como evidência do choque feições características. Estas, quando encontradas em determinadas áreas, ajudam a comprovar a sua origem. Entre as principais feições resultantes por um impacto por corpo celeste estão os Cones de Estilhaçamento (em inglês *Shatter Cones*), as Feições de Deformação Planar (em inglês *Planar Deformation Feature*) e as Brechas de Impacto.

Os Cones de Estilhaçamento (Figura 8) são feições macroscópicas composta por fraturas estriadas cônicas. Estas podem ser encontradas nas partes profundas das crateras como nas brechas, variando de poucos milímetros até vários metros de comprimento. Esta feição forma-se em qualquer tipo de rocha atingida por impacto, como os arenitos, folhelhos, basaltos, carbonatos, rochas cristalinas e metamórficas (SÁNCHEZ, 2014).

Figura 8 - Cone de Estilhaçamento da cratera de Vista Alegre (PR).

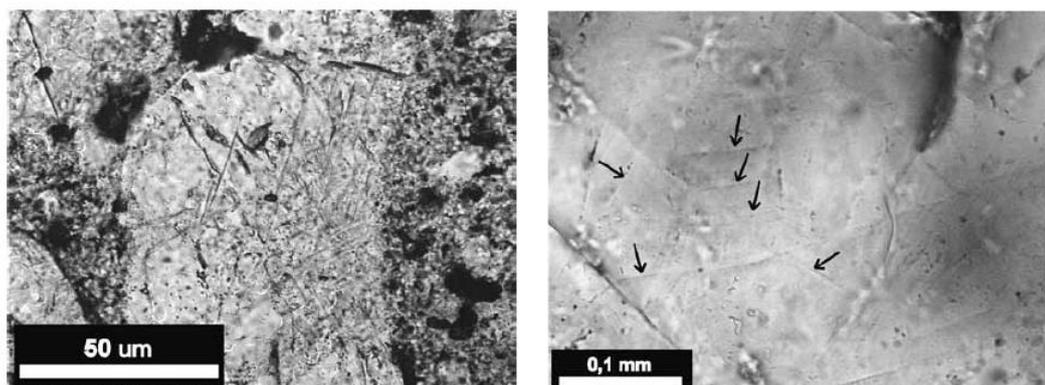


Fonte: Sánchez (2014).

A Feição de Deformação Planar (PDF) é a feição de impacto mais analisada nos processos de identificação de crateras de impacto. Os PDF's (Figura 9) são

estreitos, planos e se formam dentro de cada cristal seguindo a orientação dos planos cristalográficos do quartzo. Esta feição microscópica, evidencia que dentro de cada PDF a estrutura do quartzo sofreu deformação devido à pressão do impacto, apresentando uma fase amorfa distinta (SÁNCHEZ, 2014).

Figura 9 - Feições de Deformação Planar em cristais de quartzo dos arenitos da porção centro-leste da estrutura de impacto do Cerro do Jarau identificada por Philipp *et al.* (2010).



Fonte: Philipp *et al.* (2010).

As brechas de impacto (Figura 10) são encontradas no núcleo e na borda da estrutura de impacto e são formadas através do resfriamento do material fundido oriundo do impacto. Quando o corpo celeste atinge a superfície ele quebra as diferentes rochas presentes na estrutura fazendo elas se depositarem e fundirem juntas, formando uma nova matriz. Além disso, as brechas de impacto podem se formar durante diferentes estágios da formação das crateras, como na expansão da onda de choque, na formação da cratera transitória, no soerguimento do núcleo central ou no colapso do aro lateral (FRENCH, 1998).

Figura 10 - Possível brecha de impacto em rocha de arenito encontrada no núcleo da estrutura de impacto do Cerro do Jarau.



Fonte: Autor (2019).

2.2. A ESTRUTURA DE IMPACTO DO CERRO DO JARAU

A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, localizada no município de Quaraí, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, foi identificada pela primeira vez por Grehs (1969) que observou anomalias circulares no padrão das redes de drenagens e na morfologia das rochas basálticas através de fotografias aéreas.

Outros estudos realizados na área foram desenvolvidos por Hausman (1966), que denominou como Horst do Jarau a estrutura de esforços tectônicos. Já Moreira *et. al.* (1980) e Horbach (1986), através da interpretação de imagens de radar do Projeto RADAMBRASIL, evidenciaram a estrutura dômica da cratera e que as rochas ígneas vulcânicas da Formação Serra Geral do local aparentavam soerguimento por movimentos tectônicos.

Interpretações de fotografias aéreas e imagens de radar por Schuck & Lisboa (1987) identificaram uma estrutura dômica nas cabeceiras do arroio Garupá e uma menor denominada Estrutura Falhada Anelar do Jarau. Lisboa *et al.* (1987), em seus estudos, ressaltaram que o Cerro do Jarau pode representar um astroblema, ou seja, uma estrutura de impacto por corpo celeste. Além disso, os autores destacaram a

origem desta estrutura circular a partir da diferenciação morfológica, litológica, estrutural e pela ação do tempo.

Estudos mais recentes de Crósta *et al.* (2010) descrevem a estrutura circular da cratera de impacto com cristas de arenitos silicificados com elevação de 200 metros em relação as feições geomorfológicas do entorno. Além disso, o autor relata que a origem da estrutura vem sendo debatida há décadas, sendo que as evidências existentes indicam tratar-se de uma estrutura de impacto por meteorito.

Philipp *et al.* (2010) discutem a estrutura circular do Cerro do Jarau como um astroblema. Em suas análises dos aspectos geológicos e do metamorfismo de impacto das rochas na cratera foram utilizados dados de fotografias aéreas nas escalas 1:110.000 e 1:60.000 e trabalhos de campo. Além disso, o autor descreveu o núcleo central da estrutura soerguido com 7 km de diâmetro e 160 metros de elevação nas suas bordas mais elevadas.

Crosta *et al.* (2010) e Philipp *et al.* (2010) determinaram feições petrográficas, cones de estilhaçamento, feições planares de deformação (PDF), brechas de impacto e mineralógicas nos grãos de quartzo do arenito da Formação Botucatu. Segundo Philipp *et al.* (2010),

a presença de uma intensa tectônica rúptil e deformadora concentrada na porção central da estrutura, a ocorrência de prováveis brechas de impacto e de injeção e de cristais de quartzo com microestruturas do tipo PDF's e PF's são as principais evidências que sugerem que a estrutura circular do Cerro do Jarau foi causada pelo impacto de um meteorito. (p. 15).

Estudos de Sánchez (2014) propõem uma nova proposta estratigráfica para a estrutura do Cerro do Jarau, onde a autora mostra que os arenitos estão estratigraficamente sobrepostos aos basaltos com as duas unidades realizando mergulhos centrípetos, caracterizando assim, uma bacia com a porção central rebaixada. Além disso, segundo Sánchez (2014),

com o mapeamento geológico de detalhe, foi possível identificar três unidades litoestratigráficas na área do Cerro do Jarau: a Formação Serra Geral, inferior, constituída por basaltos com intercalações de brechas ígneas e arenitos intertraps; arenitos médios a grossos estratificados, com camadas

decimétricas de arenitos conglomeráticos, com clastos de basalto, frequentes na base; e arenitos laminados, superiores (p. 275).

Giacomini (2015) em sua dissertação de mestrado realiza estudos sobre a Inversão Gravimétrica 3D da Estrutura do Cerro do Jarau. Com a utilização de dados obtidos através de levantamento gravimétrico associados a posições obtidas com GNSS o autor constrói um modelo geológico 3D da estrutura. Além disso, foram calculadas as anomalias Bouguer para os pontos levantados. Segundo Giacomini (2015),

o mapa de anomalia Bouguer residual mostra uma forte anomalia positiva com tendência NE-SW, localizada na porção nordeste da estrutura, uma feição incomum em outras estruturas de impacto. No entanto, a anomalia negativa na porção central e a anomalia circular positiva ao redor do centro podem ser relacionadas a uma cratera de impacto (p. 5).

Com o principal objetivo de testar a hipótese de impacto meteorítico para explicar a estrutura do Cerro do Jarau através de dados gravimétricos, o autor apresentou o modelo geológico das rochas em subsuperfície através da interpretação visual dos resultados da inversão. Nesse modelo, a disposição das rochas é similar a modelos de formações de crateras, caracterizando a estrutura de impacto do Cerro do Jarau como uma cratera de impacto.

2.2.1. Aspectos Geomorfológicos

O Rio Grande do Sul apresenta cinco unidades geomorfológicas, de acordo com Müller Filho (1970), em seu território (Figura 11), que são: a Depressão Central, o Escudo Sul-Riograndense, o Planalto Meridional, a *Cuesta do Haedo* e a Planície Costeira. Ao norte do Estado, situa-se o Planalto Meridional, formado por rochas basálticas decorrentes de derrames de lavas ocorridos na era Mesozóica. No extremo oeste, o resultado do trabalho da erosão diferencial formou a *Cuesta do Haedo*. Já no centro do Estado, a Depressão Central caracteriza-se por rochas sedimentares que dão origem a um corredor de baixa altitude. O escudo Sul-Riograndense, localizado no sul do Estado, apresenta rochas ígneas do período Pré-Cambriano. E a Planície

Costeira, a leste, foi formada no período quaternário e apresenta uma faixa arenosa com a ocorrência de lagoas e lagos (ATLAS SOCIOECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL, 2019).

Figura 11 - Unidades Geomorfológicas do Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptado do Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (disponível na página de internet <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/>).

A *Cuesta do Haedo*, unidade geomorfológica onde encontra-se a estrutura de impacto do Cerro do Jarau, localiza-se na região sudoeste do Rio Grande do Sul sendo delimitada ao norte pelo rio Ibicuí e ao sul pelo rio Negro (em território uruguaio). Segundo Müller Filho (1970),

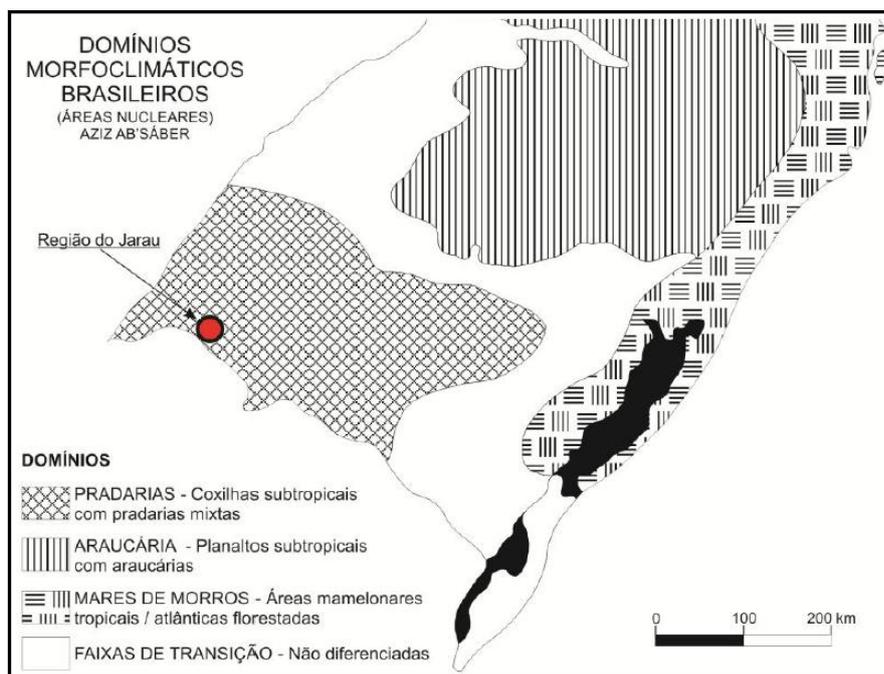
a *Cuesta do Haedo*, do ponto de vista litoestratigráfico, está integrado na área dos derrames basálticos; vincula-se, assim, ao Planalto. Mas quanto à topografia, aproxima-se mais da Depressão, motivo pelo qual, no zoneamento geoeconômico, é enquadrada na região denominada “Campanha”; nela continua o domínio morfológico das coxilhas (p. 19).

Esta região apresenta feições de forma arredondada denominadas de coxilhas. Segundo Suertegaray (1998), estas coxilhas apresentam altitudes em torno de 400 metros a oeste, diminuindo progressivamente a leste, chegando próximo ao rio Quaraí a uma altitude entre 80 e 100 metros.

De acordo com Ab'Sáber (1969), a unidade *Cuesta do Haedo* está associada a uma das grandes fases de aplainamento denominada de Superfície do Cerro da Cadeia. Já Suertegaray (1998) afirma que a *Cuesta do Haedo* estaria associada a um conjunto homoclinal aplainado pela superfície da cadeia, sendo que esta nova fase de aplainamento neogênica deu origem a superfície da campanha, cuja altitude oscila entre 200 e 140 m.

Além disso, Ab'Sáber (1967) ao dividir o Brasil em grandes domínios morfoclimáticos, caracterizou a região do oeste do Rio Grande do Sul como Domínio das Coxilhas Subtropicais com Pradarias Mistas (Figura 12). Nesta região o autor destaca o domínio de colinas pluriconvexizadas, denominadas tradicionalmente de coxilhas, com campos pastoris de prados mistos. Em relação ao domínio das coxilhas na paisagem, estas constituem uma "(...) expressão de grande significação morfoclimática, pois traduz os efeitos mamelonizadores dos processos subtropicais úmidos que, por último, agiram na fisionomia do relevo regional" (AB'SÁBER, 1969).

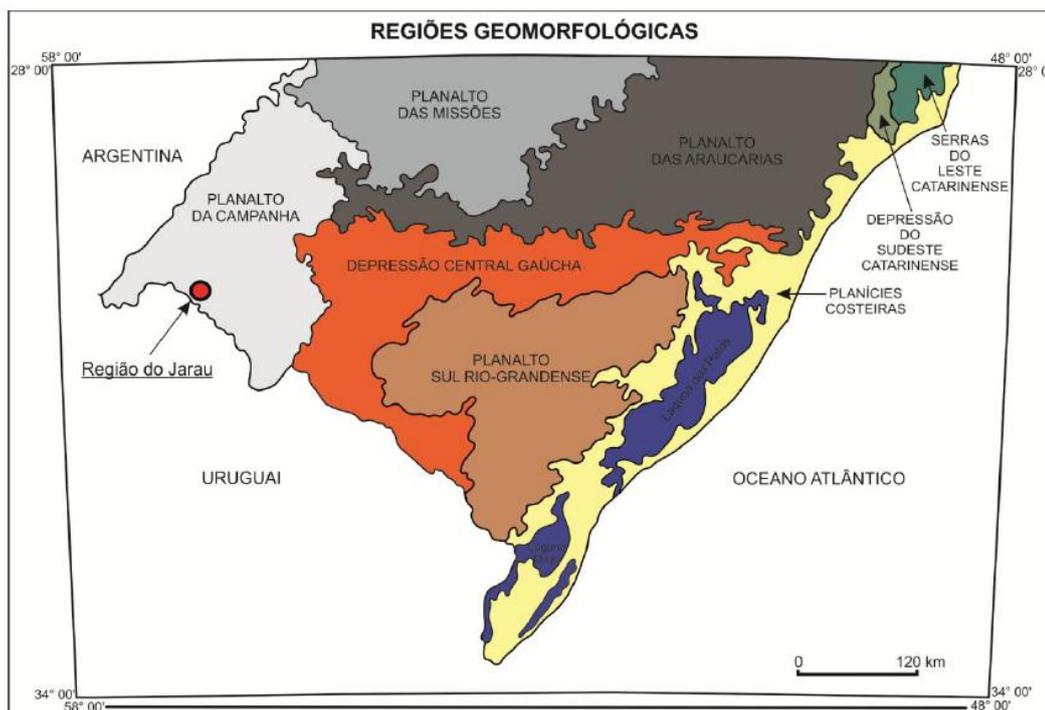
Figura 12 - Domínios Morfoclimáticos do Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptado de Ab'Sáber (1967) por Alves (2012).

O mapa geomorfológico elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE) em 1986 divide o Estado do Rio Grande do Sul em 6 regiões geomorfológicas (Figura 13). Neste caso, a estrutura de impacto do Cerro do Jarau encontra-se no Planalto de Uruguaiana, região geomorfológica do Planalto da Campanha. O relevo do Planalto de Uruguaiana caracteriza-se “(...) por apresentar generalizadamente uma morfologia plana, sub horizontalizada, com caimento suave para oeste, em direção ao rio Uruguai” (IBGE, 1986. P. 341). Além disso, os autores afirmam que a área apresenta formas de colinas com vales pouco aprofundados causados pela erosão fluvial nas nascentes dos rios de ordem inferior.

Figura 13 - Regiões Geomorfológicas do Rio Grande do Sul, segundo IBGE (1986).



Fonte: Adaptado de IBGE (1986) por Alves (2012).

A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, localizada entre os arroios Quaraí-Mirim e Garupá, no interior do Planalto da Campanha, apresenta feições geomorfológicas caracterizadas por uma área semicircular de cristas alongadas com média de 240 metros de altitude e declividade entre 15% e 25%. Sua estrutura apresenta o núcleo soerguido com cristas bem caracterizadas e delimitadas ao norte; e ao sul do núcleo, o relevo apresenta-se aplainado, onde o arroio Nhanduvaí, de feições radiais, segue o seu curso. Este local destaca-se na região por apresentar feições únicas e distintas em relação ao restante do Planalto da Campanha, sendo este um dos motivos dos diversos estudos existentes da área que objetivam esclarecer a origem da estrutura, que possivelmente trata-se de uma cratera de impacto complexa (SÁNCHEZ, 2014).

2.2.2. Contexto Geológico

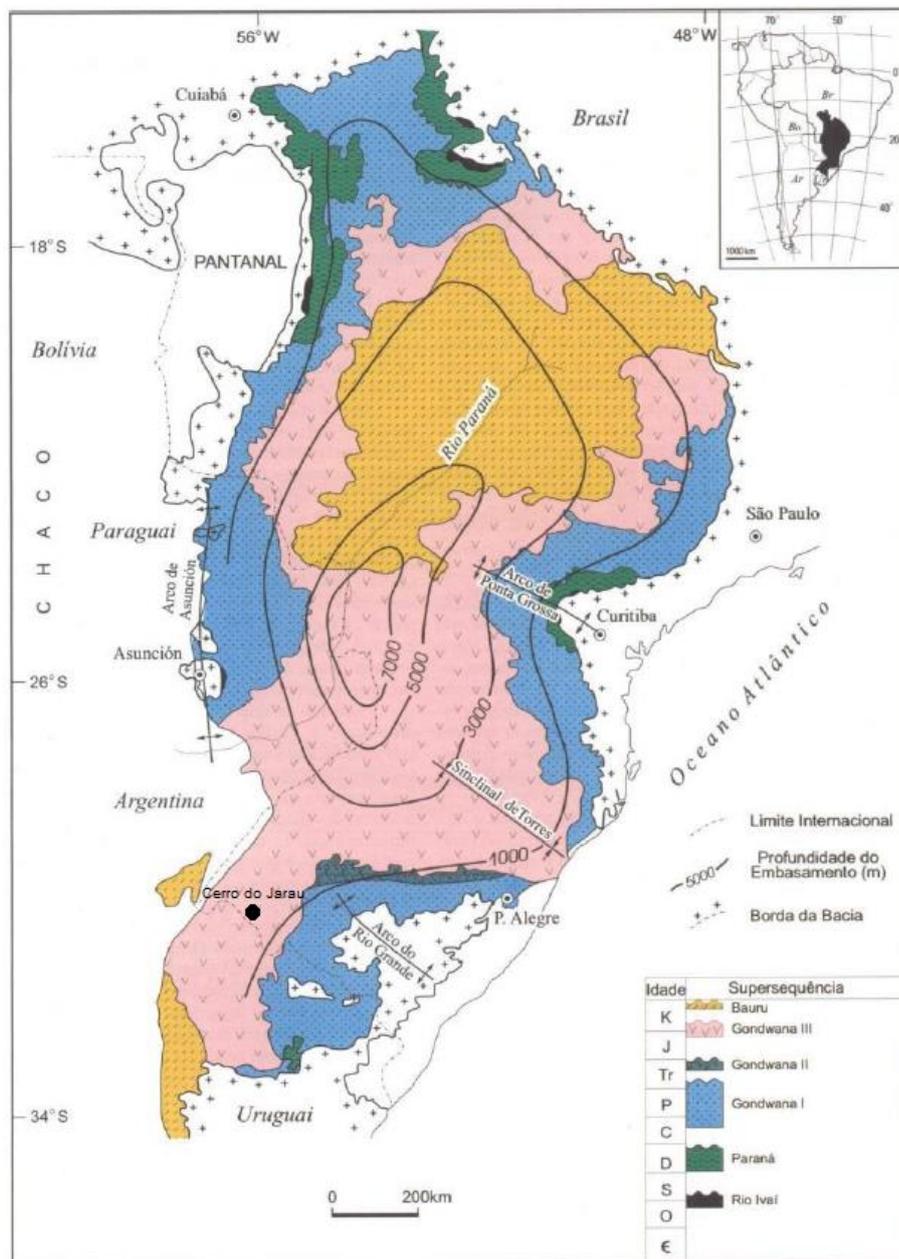
A estrutura de impacto do Cerro do Jarau localiza-se geologicamente na Bacia do Paraná, a qual têm uma área total de cerca de 1.500.000 km² situada na porção central da placa tectônica sul-americana. Em termos da divisão geopolítica, localiza-

se nos territórios do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, sendo que a sua maior porção se encontra no Brasil, nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

A Bacia do Paraná é uma estrutura geológica que possui uma forma oval com o seu eixo maior no sentido norte-sul e com seus limites definidos por bordas erosivas relacionadas a geotectônica do cenozoico. Essa bacia é caracterizada por uma sequência de depósitos sedimentares que foram recobertos por rochas vulcânicas, sendo que as espessuras podem atingir até 7.000 m. A formação dessa estrutura iniciou a cerca de 400 milhões de anos atrás, sendo que seu preenchimento e evolução tectônica estratigráfica se deu entre os períodos Devoniano e Cretáceo. (MILANI, *et al.*, 2007).

Com relação as sequências deposicionais, Faccini (1989) dividiu o pacote Mesozoico da bacia em quatro sequências: Sequência I (Formações Rio do Rasto e Sanga do Cabral), Sequência II (Fm. Santa Maria e porção inferior da Fm. Caturrita), Sequência III (porção superior da Fm. Caturrita ou Arenito da Mata) e Sequência IV (Fm. Botucatu e Fm. Serra Geral). Já Milani (1997) dividiu o registro estratigráfico da bacia em seis unidades aloestratigráficas de segunda ordem (supersequências): Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carvonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico) e Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo). Estas supersequências são importantes registros remanescentes de sucessivas fases de acumulação sedimentar alternando com épocas de erosão generalizada ocorridas na bacia, sendo as três primeiras associadas a ciclos relacionados as oscilações do nível relativo do mar no Paleozoico e as demais aos pacotes de sedimentos continentais associados as rochas ígneas (Figura 14).

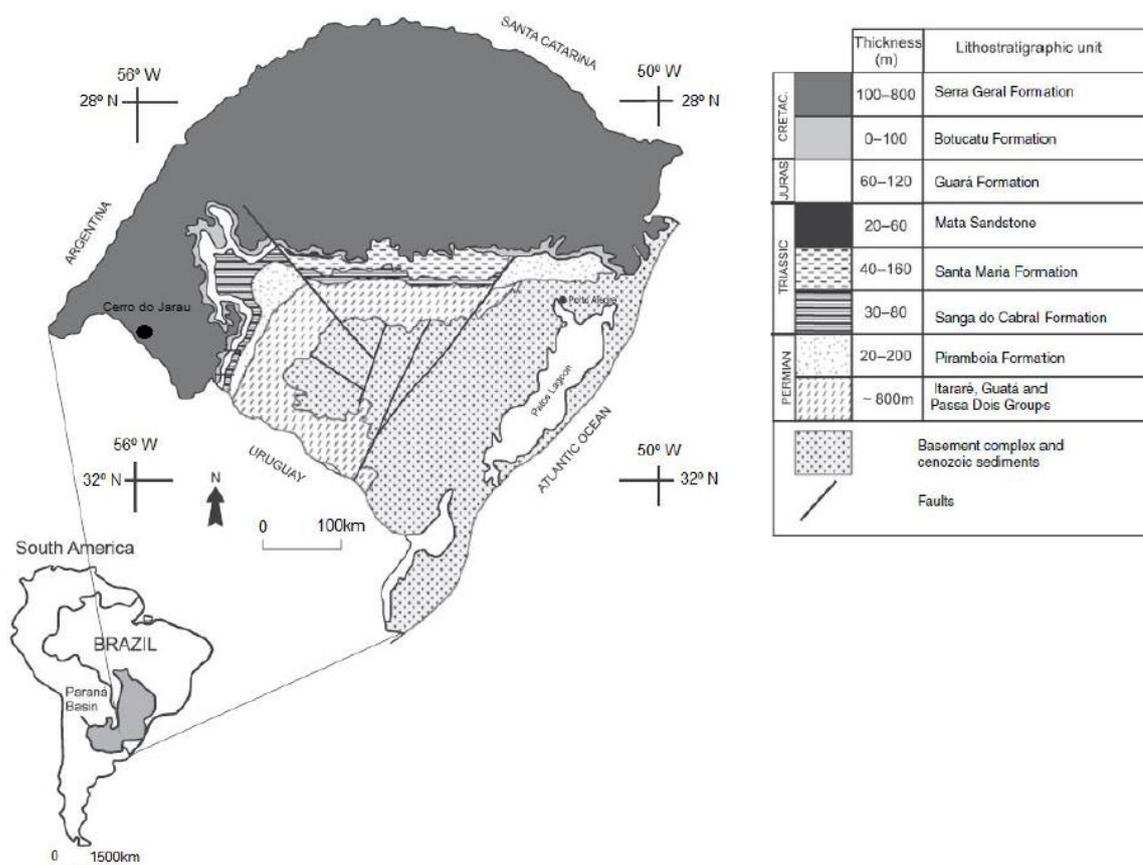
Figura 14 - Mapa Geológico da Bacia do Paraná.



Fonte: Adaptado de Milani (1997).

A Bacia do Paraná, ocupa a porção norte e oeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 15). A região da estrutura de impacto do Cerro do Jarau, localizada no extremo oeste do Estado é caracterizada pela presença de litologias do Grupo São Bento de idade Jurássico-Cretáceo. Em relação a ordem estratigráfica, a Formação Serra Geral recobre as rochas sedimentares das Formações Botucatu e Guará (SCHERER & LAVINA, 2005). Estas formações, presentes na área de estudo, ocupam uma área superior a 150.000 km² no Estado e espessura em torno de 1.000 m em subsuperfície, sendo seus limites definidos por desconformidades de topo e de base.

Figura 15 - Mapa Geológico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptado de Scherer & Lavina (2005).

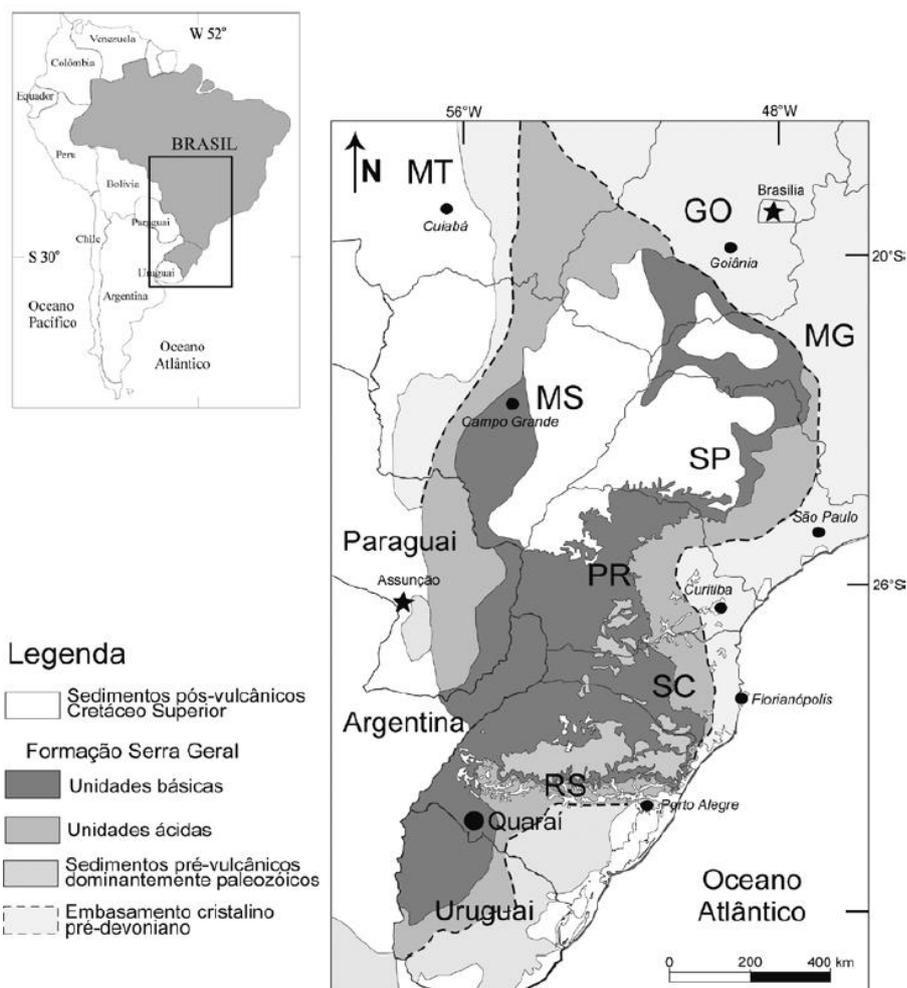
Desta maneira, estão presentes na estrutura de impacto do Cerro do Jarau as unidades litoestratigráficas Guará, Botucatu e Serra Geral.

A Formação Guará é caracterizada por um pacote de arenitos quartzosos esbranquiçados com ocorrência na margem sul da Bacia do Paraná, divisa do Estado do Rio Grande do Sul com o Uruguai e com a Argentina. Segundo Scherer *et al.* (2000) a Formação Guará apresenta arenitos grossos a conglomeráticos e pelitos depositados em um sistema fluvial entrelaçado ao norte, e arenitos médios e finos, depositados em um sistema eólico ao sul. Scherer & Lavina (2005) postulam que a formação é limitada ao norte por falhas de direção NW possuindo espessura média de 60 m em subsuperfície.

A Formação Botucatu aflora nas margens da Bacia do Paraná, ocupando uma área de aproximadamente 1.500.000 km² no Brasil, Uruguai e Argentina. Esta é caracterizada por apresentar arenitos de granulometria fina a média, com coloração rosada e estratificação cruzada de grande porte vinculadas a migração de dunas eólicas; e arenitos grossos a conglomeráticos interpretados como depósitos de lençóis de areia (SCHERER & LAVINA, 2006). Além disso, é comum encontrar intercalações entre os arenitos e os derrames vulcânicos, indicando que a deposição por processo eólico permaneceu ativa durante os episódios de vulcanismo (SCHERER, 2002).

A Formação Serra Geral (Figura 16), tem o seu início marcado pelo rompimento do supercontinente Gondwana na transição entre os Períodos Jurássico e Cretáceo, que provocou um amplo processo de vulcanismo na Bacia do Paraná. Desta maneira, estes derrames ocorridos originaram a Formação Serra Geral, a qual é a unidade litoestratigráfica mais recente da Bacia do Paraná, ocupando uma área de 917.000 km² correspondendo a 75% da bacia e com uma espessura de até 2.000 m em subsuperfície. Em relação a composição de suas rochas, 90% do volume são de composição básica e 10% de composição intermediária a ácida (PEATE *et al.*, 1992; PEATE & HAWKESWORTH, 1996). Na região da estrutura de impacto do Cerro do Jarau, ocorre a unidade vulcânica Alegrete da Formação Serra Geral, esta é formada por magmatismo intermediário a félsico, variando de andesito a riodacito com estruturas de fluxo e autobrechas no topo e na base (BERGMANN, 2014).

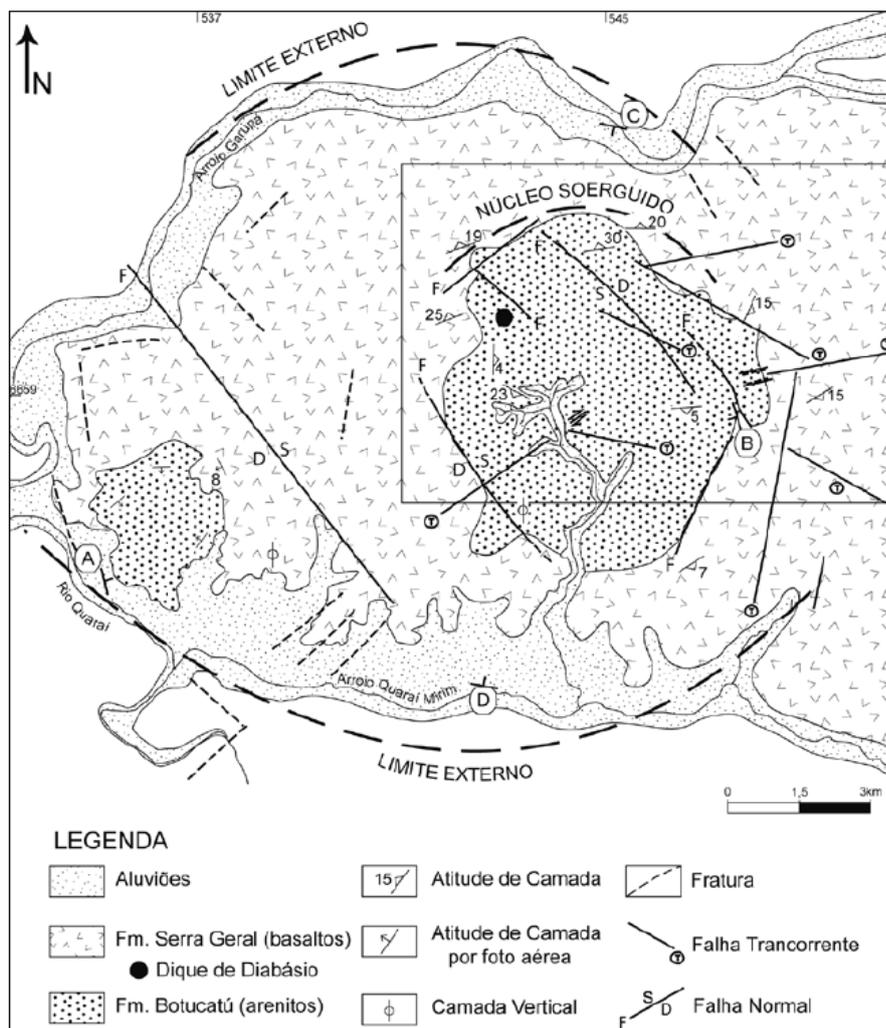
Figura 16 - Mapa Geológico da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná.



Fonte: Adaptado de Philipp *et al.* (2010).

No contexto local da cratera de impacto do Cerro do Jarau, trabalhos anteriores de Lisboa *et al.* (1987) e Philipp *et al.* (2010) identificaram através de imagens de satélite, fotografias aéreas, trabalhos de campo e análises laboratoriais rochas sedimentares de idade jurássica da Formação Botucatu cobertas por derrames basálticos de idade mesozoica da Formação Serra Geral (Figura 17). Entretanto, no núcleo da estrutura, os autores descrevem os arenitos da Formação Botucatu na camada superior, apresentando relevo marcado por cristas ao norte e ao leste do núcleo.

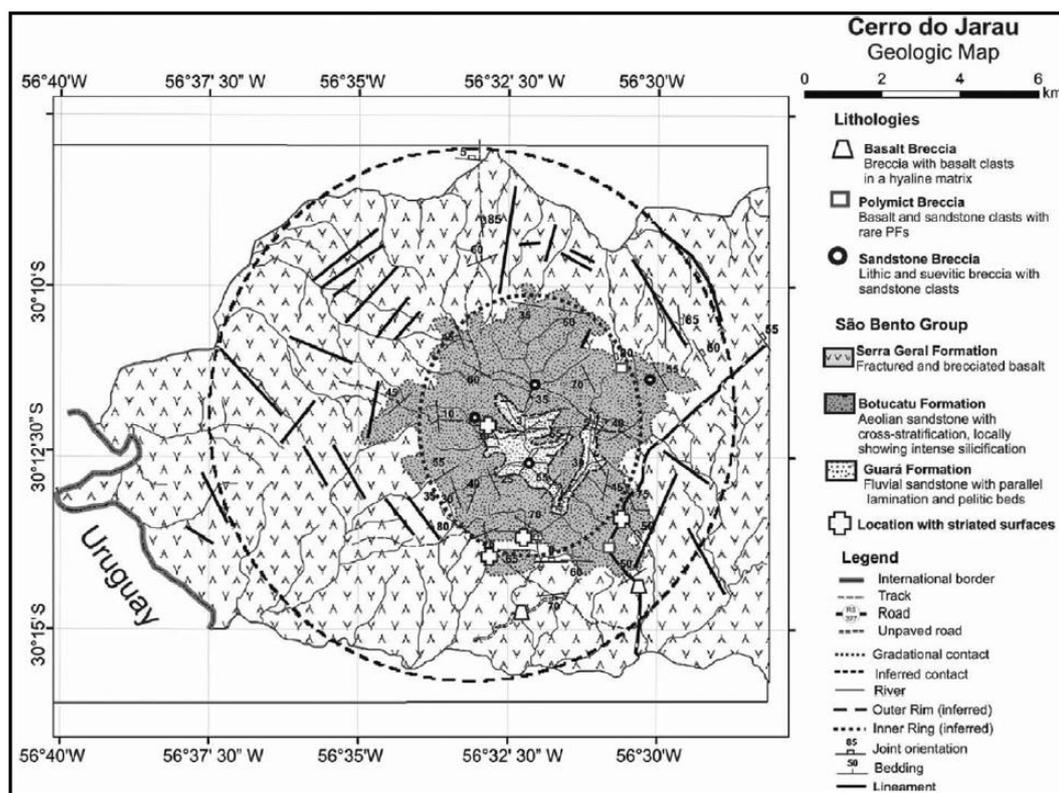
Figura 17 - Mapa Geológico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau proposto por Philipp *et al.* (2010).



Fonte: Philipp *et al.* (2010).

Crósta *et al.* (2010) identificaram seis diferentes tipos de rochas na estrutura do Cerro do Jarau: arenitos fluviais da Formação Guará, arenitos eólicos da Formação Botucatu, basalto da Formação Serra Geral e três tipos de rochas classificadas como brechas não pertencentes às unidades litoestratigráficas anteriores. Com o acréscimo da presença da Formação Guará na área de estudo, o mapa geológico proposto por Lourenço (2007) apresenta as três unidades litoestratigráficas em um padrão de anéis concêntricos, sendo a Formação Guará no centro seguida pela Formação Botucatu e Serra Geral (Figura 18).

Figura 18 - Mapa Geológico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau proposto por Lourenço (2007).



Fonte: Lourenço (2007).

Os arenitos fluviais pertencentes a Formação Guarã afloram na região central e sul do núcleo da estrutura de impacto, seguindo a drenagem do arroio Nhanduvaí. Estes apresentam granulação fina a média, com cores variando entre branco e róseo. Em sua porção mais ao sul é possível encontrar essas rochas em contato direto com os basaltos da Formação Serra Geral (CRÓSTA *et al.*, 2010).

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu afloram em formato anelar em torno dos arenitos da Formação Guarã. Estes apresentam granulometria fina a média com a predominância de grãos foscas com forma arredondada a subarredondada. Em relação a coloração, apresenta cor esbranquiçada, cinza clara e rosada com textura arenosa (PHILIPP *et al.*, 2010). Em relação as feições petrográficas, Philipp *et al.* (2010) destacam a

estratificação cruzada de grande porte, a granulação grossa a média, os grãos foscas, o caráter bimodal, o elevado grau de seleção e arredondamento, a composição mineral rica em quartzo, presença notável de feldspatos, ocorrência comum de cimento silicoso e coesão média a elevada (p. 6).

No núcleo central da estrutura de impacto, os arenitos apresentam elevado grau de fraturamento, sendo que as estruturas apresentam uma disposição irregular e um espaçamento centimétrico. Em relação às cristas Philipp *et al.* (2010) relatam que na

porção norte da estrutura, parte das fraturas estão preenchidas por veios de quartzo de cor branca e espessuras entre 2 a 15 mm. Os limites das fraturas são retilíneos a pouco curvilíneos. Na parte leste do núcleo central, os arenitos estão muito deformados e são observadas brechas e/ou cataclasitos, caracterizadas por fragmentos de arenitos com formas irregulares, angulosos a subangulosos (p. 7).

Na porção nordeste do núcleo soerguido da estrutura de impacto, os arenitos da Formação Botucatu apresentam deformação dútil, algo encontrado em outras duas crateras de impacto na Bacia do Paraná: Vargeão e Vista Alegre (CRÓSTA *et al.* 2006; CRÓSTA *et al.* 2010). Em relação ao soerguimento do núcleo da estrutura, Philipp *et al.* (2010) relacionam este evento

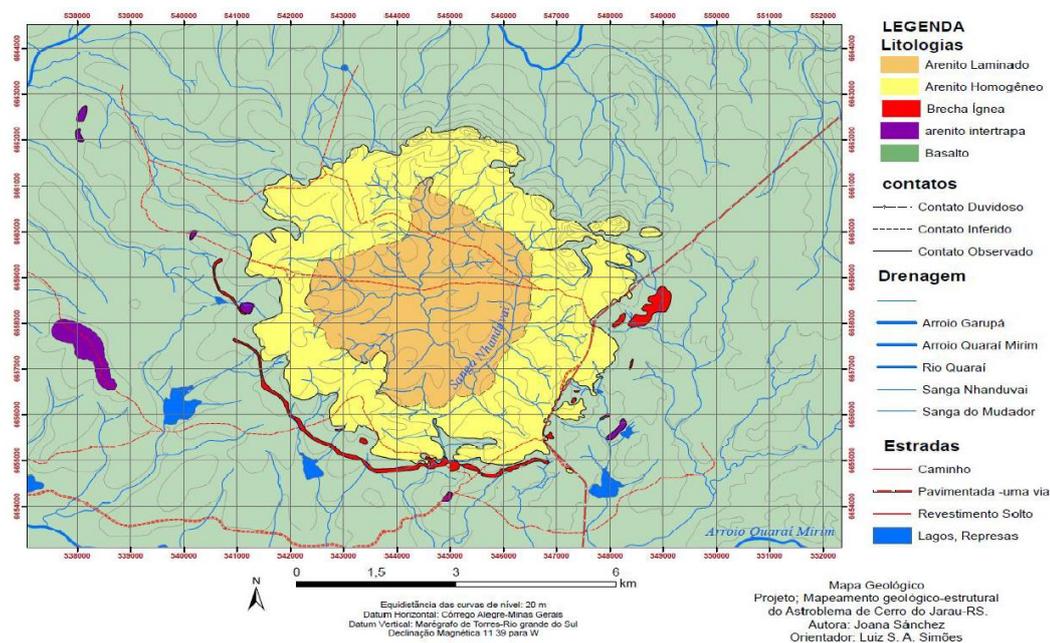
a uma etapa intermediária da evolução da cratera. Posterior ao choque do meteorito e ao colapso inicial da cratera, o alívio de pressão na porção de núcleo ocasionou a ascensão das rochas sedimentares da Formação Botucatu. A ascensão do núcleo está vinculada com a geração, no entorno da porção central da cratera, de zonas de cisalhamento rúpteis, zonas de falhas extensionais e sistemas de fraturas associados (p. 10).

Os basaltos da Formação Serra Geral afloram circundando os arenitos da Formação Botucatu estendendo-se além da borda da estrutura. Estes constituem cerca de 70% da área da superfície do local. Em relação a coloração, os basaltos presentes na estrutura apresentam cor castanho escura a preta variando para castanho avermelhado-alaranjado quando alterados (PHILIPP *et al.*, 2010).

A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, pode ser descrita como uma cratera de impacto complexa que foi afetada por processos de erosão diferencial, onde apenas as feições do norte do núcleo soerguido encontram-se relativamente preservadas. Esta teoria é reforçada pela presença de PDF's (Feições de Deformação Planar) nos grãos de quartzo dos arenitos e de brechas de impacto.

Estudos recentes de Sánchez (2014) interpretam a estratigrafia da estrutura de impacto do Cerro do Jarau com os arenitos estruturalmente e estratigraficamente sobrepostos aos basaltos da Formação Serra Geral, caracterizando uma bacia com a porção central rebaixada (Figura 19). Entretanto, a autora visualiza a estrutura como a porção basal de uma cratera de impacto que não se ajusta aos padrões de cratera simples ou complexa.

Figura 19 - Mapa Geológico da Estrutura de Impacto do Cerro do Jarau proposto por Sánchez (2014).



Fonte: Sánchez (2014).

2.3. FOTOGRAMETRIA

A ASPRS (em inglês *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) define a fotogrametria como “a arte, ciência, e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes” (ASPRS, 2009).

A fotogrametria pode ser aplicada na elaboração de produtos cartográficos através da utilização das fotografias para a obtenção do posicionamento de pontos na superfície terrestre e extração de informações como: rede de drenagem, cobertura de vegetação, relevo, redes viárias, entre outras (ANDRADE, 1998).

Uma das técnicas de trabalho da fotogrametria é o levantamento aerofotogramétrico, onde as fotografias são tomadas a partir de câmeras aerotransportadas sobre a área de interesse obtendo informações precisas sobre a superfície (IBGE, 1999). Este método de levantamento é muito difundido na produção de dados cartográficos para a elaboração de mapas, modelos digitais de superfície (MDS), ortomosaico, entre outros produtos.

2.3.1. Fotogrametria Digital

Com o avanço tecnológico das últimas décadas surgiu a fotogrametria digital que consiste na obtenção de fotografias através de câmeras digitais que são convertidas em arquivos digitais matriciais onde cada elemento da matriz é denominado pixel (SCHENK, 1999). Segundo Brito e Coelho (2007), a fotogrametria digital tem como objetivo a reconstrução automática do espaço tridimensional, como a superfície terrestre, a partir de imagens bidimensionais.

2.3.2. Orientação da Câmera

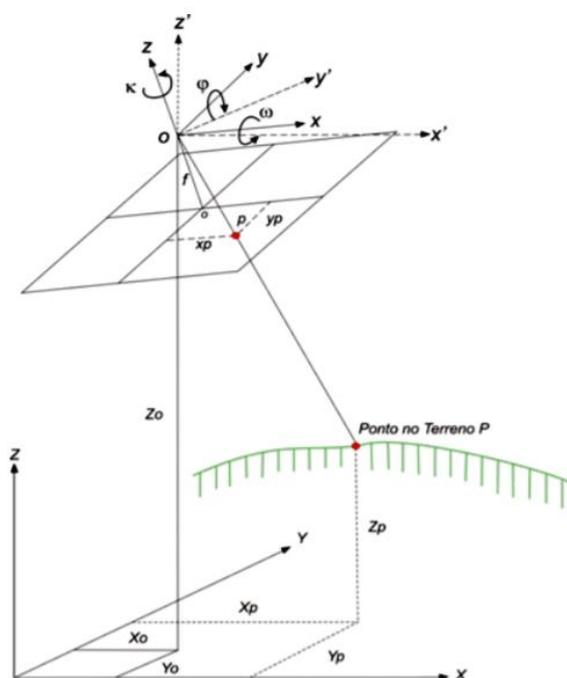
A orientação da câmera consiste nos processos de obtenção de parâmetros geométricos das fotografias com o objetivo de possibilitar a realização de medidas precisas. Com isso, através da obtenção dos parâmetros no interior da câmera (orientação interior) e a localização do centro perspectivo em relação ao espaço objeto (orientação exterior) é possível saber a posição e altitude da câmera no momento do registro da fotografia (ANDRADE, 1998).

A orientação interior é o processo de recuperação da posição da fotografia em relação a câmera. Este procedimento consiste em estabelecer a relação entre o sistema de coordenadas interno da câmera com o sistema de coordenadas do pixel na fotografia (JENSEN, 2009).

A orientação exterior consiste na determinação das posições (X_p , Y_p e Z_p), denominados de translações do centro perspectivo; e atitude (ângulos de rotação ω , ϕ e κ) do sensor em relação ao sistema de coordenadas referencial do objeto no

momento do registro da fotografia (Figura 20). Para a determinação da posição da câmera no sistema de coordenadas do objeto é necessário que exista pontos de apoio no terreno com coordenadas conhecidas que sejam identificáveis nas fotografias. Entretanto, se a plataforma utilizada para a tomada das fotografias possuir sistema inercial e receptor GNSS acoplados, possibilitará que as fotografias sejam orientadas ao sistema de coordenadas do objeto no momento do seu registro, não necessitando pontos de apoio (ANDRADE, 1998).

Figura 20 - Elementos da orientação exterior.



Fonte: Adaptado de Palermo e Leite (2013).

2.3.3. Fototriangulação

Lugnani (1998) define a fototriangulação como um método fotogramétrico de determinação precisa das coordenadas dos pontos de interesse no espaço objeto através da relação geométrica entre as fotografias adjacentes somados aos pontos de controle em campo e ao conjunto de valores aproximados referentes a orientação das fotografias. O principal objetivo da fototriangulação é fornecer as coordenadas dos parâmetros necessários para a orientação dos modelos fotogramétricos. Estes serão utilizados na elaboração das ortofotos. (ANDRADE, 1998).

Desta maneira, o procedimento de fototriangulação consiste em utilizar pontos na região de sobreposição entre fotografias, denominados pontos de ligação, e os pontos de controle referenciados a um sistema de coordenadas para calcular e ajustar as coordenadas dos centros de perspectiva e dos ângulos de atitude da câmera no momento da aquisição de cada fotografia, permitindo a obtenção de coordenadas tridimensionais do espaço objeto (terreno) a partir do espaço imagem (BRITO e COELHO, 2007).

2.3.4. Modelo Digital de Superfície (MDS)

Um Modelo Digital de Superfície (MDS) é uma representação numérica para uma determinada superfície física, podendo expressar atributos de altitude, temperatura, pressão, declividade, entre outros fenômenos (BRITO e COELHO, 2007). Este modelo emprega a utilização de funções matemáticas de interpolação para representar a superfície em função dos dados existentes.

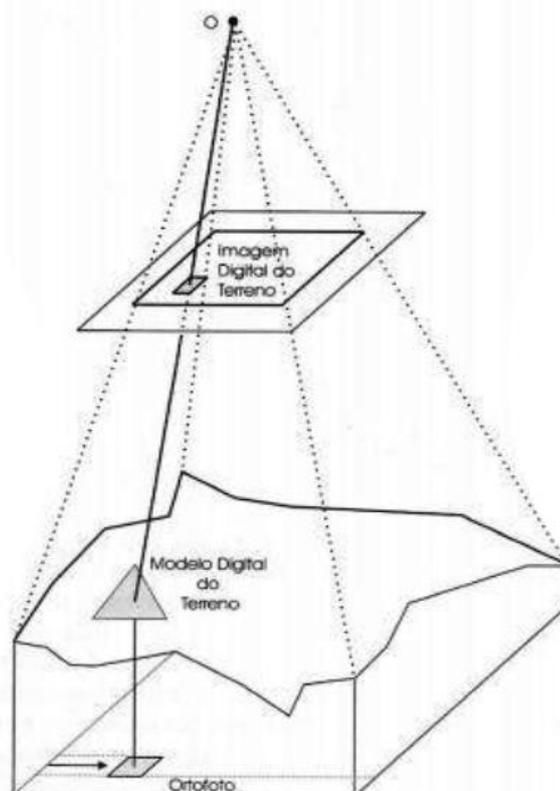
Segundo Andrade (1998), o modelo digital de superfície (MDS) é uma ferramenta para reproduzir a forma do relevo em meio digital, sendo este utilizado quando se quer mostrar as variações de altitude do terreno e das feições presentes no solo. Entretanto, quando a representação altimétrica da superfície da Terra conter apenas informações ao nível do solo, descartando outras feições presentes acima, denomina-se de Modelo Digital do Terreno (MDT).

2.3.5. Ortofoto e Ortomosaico

Ortofoto é o resultado da transformação de uma fotografia em uma projeção ortogonal sobre um plano através do processo de ortorretificação, contendo informações planimétricas, (IBGE, 1999). Sendo assim, uma ortofoto é uma imagem ortogonal, onde os feixes de ondas eletromagnéticas não convergem para um determinado ponto, mantendo-se paralelos, possibilitando a representação plana das feições fotografadas (Figura 21).

Segundo Coelho (2005), o processo de ortoretificação consiste em corrigir distorções devido ao relevo, relativas à atitude da câmera (ângulos de rotação) e os deslocamentos devido a projeção perspectiva das fotografias através de uma transformação geométrica da perspectiva cônica para a ortogonal.

Figura 21 - Exemplo da elaboração de uma ortofoto.



Fonte: Adaptado de Andrade (1998).

Além disso, as ortofotos podem ser classificadas em tradicionais ou verdadeiras. As ortofotos tradicionais não apresentam projeção ortográfica sobre os elementos acima do solo, como as edificações ou feições naturais. Por outro lado, as ortofotos verdadeiras apresentam projeção ortográfica sobre todos os elementos presentes na fotografia, incluindo os elementos acima do solo (JENSEN, 2009).

O ortomosaico, é composto por um conjunto de fotografias ortoretificadas de determinada região unidas através de *software* para homogeneizar sua aparência como se fosse uma única fotografia (IBGE, 1999).

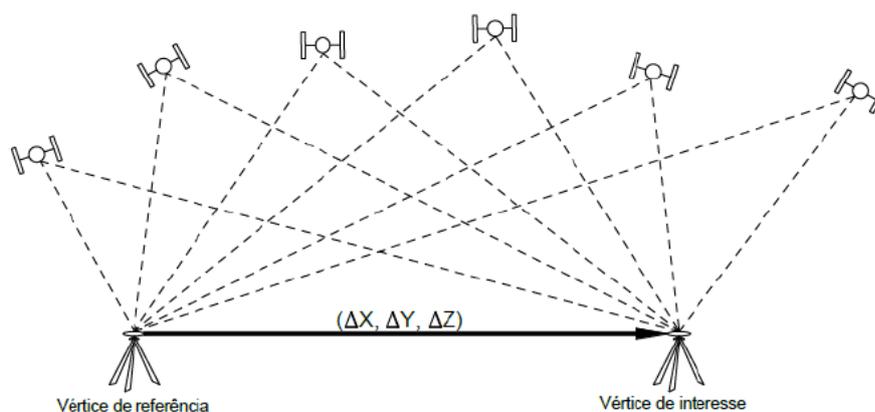
2.4. POSICIONAMENTO COM RECEPTOR GNSS

Os sistemas de navegação GNSS (*Global Navigation Satellite System*) são compostos por satélites artificiais que orbitam a Terra transmitindo sinais de rádio que, quando chegam a um receptor GNSS, determinam a sua posição espacial no sistema de coordenadas dos satélites. O GNSS é composto pelos sistemas de navegação NAVSTAR-GPS, desenvolvido pelos EUA; GLONASS, desenvolvido pela Rússia; GALILEO, desenvolvido pela União Europeia e o sistema chinês *Beidou/Compass* (MONICO, 2008).

Para a determinação da posição do receptor GNSS na superfície terrestre é efetuada a medida de distância entre o mesmo e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência, torna-se possível o cálculo das coordenadas da antena do receptor neste mesmo sistema. Além disso, cada satélite GNSS transmite duas ondas portadoras simultaneamente: L1 e L2. Essas auxiliam na correção dos erros provocados pelos efeitos da ionosfera. Desta maneira, um receptor capaz de captar estas duas frequências minimiza seus erros de posicionamento (MONICO, 2008).

Em relação ao posicionamento com GNSS, podemos classificá-lo em absoluto e relativo. O posicionamento absoluto ocorre quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro. Já o posicionamento relativo (Figura 22) ocorre quando a posição do ponto é determinada em relação a de outros pontos com coordenadas conhecidas, como as estações da RMBC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). Assim, os elementos que compõem a linha de ligação (conhecida também como linha de base) entre a estação de referência e o ponto de interesse são estimados, e com o acréscimo das coordenadas da estação de referência torna-se possível a obtenção das coordenadas do ponto de interesse (MONICO, 2008).

Figura 22 - Posicionamento relativo GNSS.



Fonte: INCRA (2013).

Segundo Monico (2008) o posicionamento relativo pode ser classificado como cinemático, semicinemático, estático e estático rápido.

- **Cinemático:** A coleta de dados ocorre constantemente em intervalos de tempo pré-determinados, onde o receptor mantém-se em movimento.
- **Semicinemático:** Também conhecido como *Stop and Go*, o receptor ocupa o vértice de interesse durante um curto período e permanece coletando dados no deslocamento ao próximo vértice.
- **Estático:** Dois receptores, um denominado de base, permanecem estacionado nos vértices e pontos de interesse durante um intervalo de tempo determinado pela distância entre eles, sendo o tempo mínimo de 20 minutos.
- **Estático Rápido:** Se difere do método estático quando o tempo de rastreamento for inferior a 20 minutos.

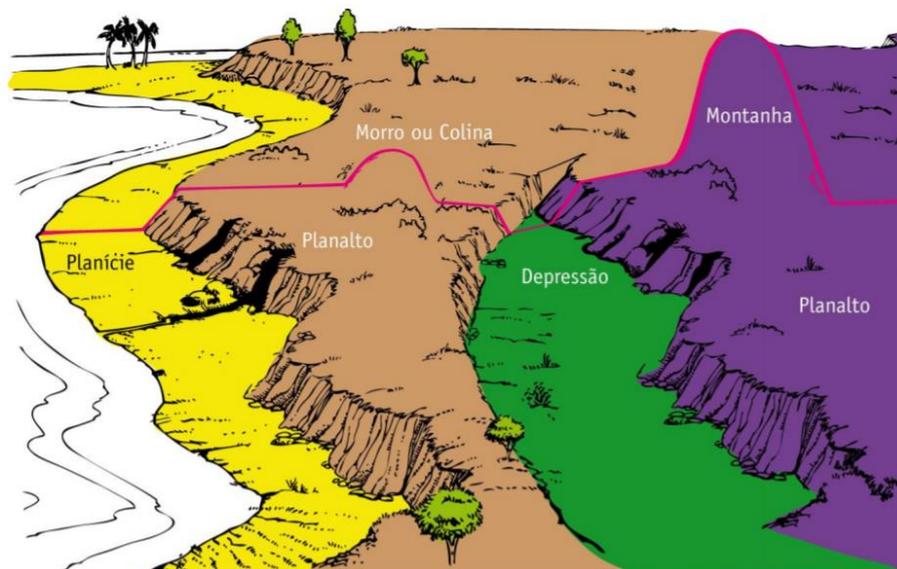
Além disso, para melhorar a precisão dos dados obtidos por estes métodos de rastreamento relativo faz-se necessário o processamento das informações coletadas em *softwares* de ajustamento, onde será realizada a determinação das coordenadas dos pontos com o processamento da linha de base entre as estações de referência e os pontos rastreados.

2.5. INTERPRETAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS

A morfologia é a área da geomorfologia responsável pelo estudo da forma do relevo, sendo formada pela morfografia, que é a descrição qualitativa das formas do relevo; e a morfometria, que é a caracterização do relevo por meio de variáveis quantitativas (FLORENZANO, 2008).

A morfografia é responsável pela descrição dos aspectos da forma e aparência do relevo. Como a superfície do planeta Terra é caracterizada por elevações e depressões que formam o relevo, este pode ser classificado em quatro macroformas: depressões, planícies, planaltos e montanhas (Figura 23). As depressões são áreas situadas abaixo do nível do mar ou abaixo do nível altimétrico das regiões adjacentes. As planícies são relevos baixos e planos formados pela acumulação de material sedimentar. Os planaltos são relevos altos que tem aspectos planos e ondulados. As montanhas são os relevos mais altos existentes no planeta, apresentando características fortemente onduladas (FLORENZANO, 2008).

Figura 23 - Macroformas do relevo.

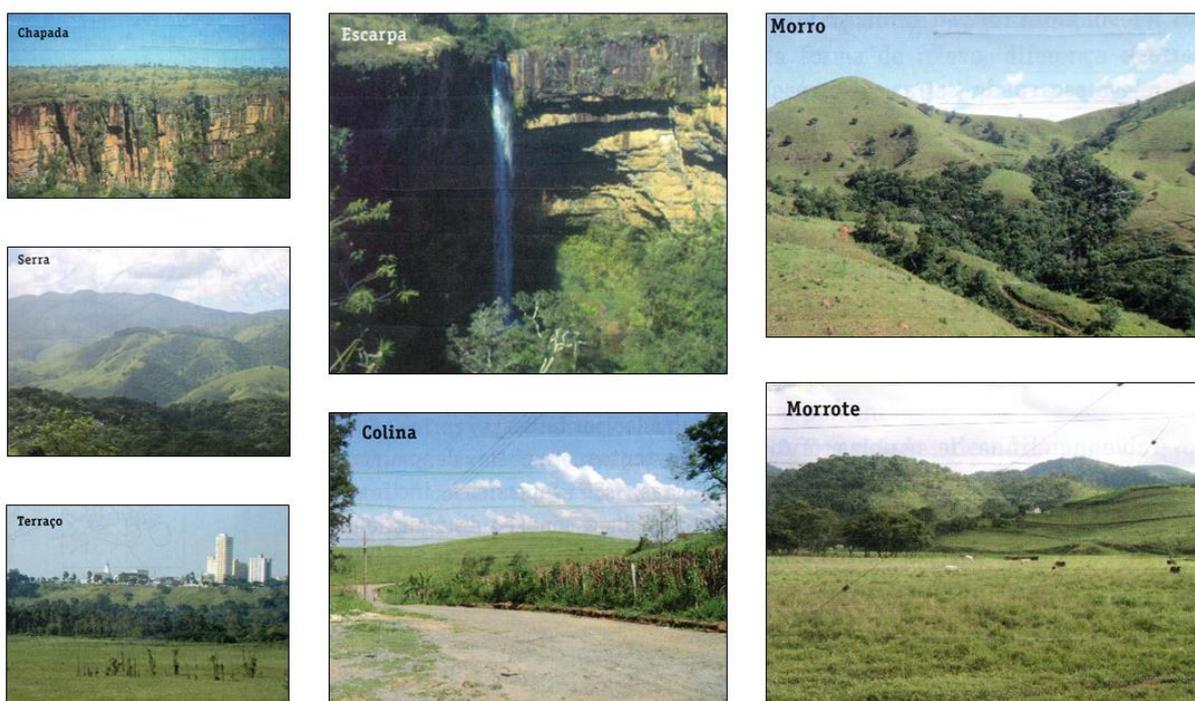


Fonte: Florenzano (2008).

Os planaltos são compartimentos de relevo relacionados a extensas áreas, que em seu interior podem apresentar diversas formas de relevo, que são denominadas como: chapadas, escarpas, serras, morros, morrotes, colinas e terraços

(Figura 24). As chapadas são relevos típicos de planaltos sedimentares, formados por superfícies planas e de estrutura horizontalizada, com altitudes superiores a 600m. As escarpas são definidas como rampas ou degraus de grande inclinação presentes nas bordas do planalto. As serras são caracterizadas por altas elevações do terreno, topos angulares, amplitudes altimétricas superiores a 200m e altas declividades. Os relevos de morros apresentam elevações médias, com amplitudes entre 100m e 200m com topos arredondados e altas declividades. Os morrotes, se distinguem dos morros por apresentar amplitudes altimétricas entre 20m e 100m. As colinas, são caracterizadas por baixas elevações do terreno, com topos arredondados, amplitudes entre 20m e 60m e baixas declividades. E os terraços são patamares em forma de degraus localizados nas encostas dos vales (FLORENZANO, 2008).

Figura 24 - Formas de relevo.



Fonte: Adpatado de Florenzano (2008).

A morfometria, por sua vez, é a caracterização dos aspectos quantitativos do relevo, sendo suas principais variáveis de estudo a altitude e a amplitude altimétrica. Além disso, informações como declividade, extensão de vertentes e frequência de rios podem ser quantificadas pela morfometria. A altitude é a altura absoluta do relevo em relação ao nível do mar. A amplitude altimétrica é a altura relativa do terreno, relaciona

a diferença entre a cota máxima e a cota mínima de uma forma de relevo. A declividade é a inclinação do relevo em relação ao plano horizontal. A extensão de vertentes é dada pela distância entre o divisor e a base da vertente. A frequência de rios é o número de cursos d'água por unidade de área. (FLORENZANO, 2008).

Desta maneira, os dados topográficos provenientes de modelos digitais de superfície fornecem informações quantitativas importantes em relação a geometria da superfície a ser estudada. A extração de variáveis morfométricas de MDS são realizadas com o auxílio de ferramentas presentes em *softwares* de geoprocessamento. Entre as informações que podem ser extraídas destacam-se: a altitude, a amplitude altimétrica, a declividade, a orientação de vertentes, a área de captação e o delineamento dos canais e divisores d'água (VALERIANO, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O problema da pesquisa tratado neste trabalho é o de realizar um levantamento aerofotogramétrico com VANT em dois transectos (um no sentido norte-sul e o outro no sentido leste-oeste) na estrutura de impacto do Cerro do Jarau. Para estes transectos, com dimensões de aproximadamente 12 km de comprimento por 150 m de largura, serão tomadas fotografias aéreas de alta resolução para geração de modelo digital de superfície (MDS) e ortomosaico para análise geomorfológica e geológica da área. Desta maneira, neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento destas atividades para atingir os objetivos do trabalho.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Veículo Aéreo Não Tripulado

O principal equipamento a ser utilizado na execução deste trabalho será o VANT. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2018), caracteriza-se como VANT toda a aeronave projetada para operar sem piloto a bordo, sendo de caráter não recreativo e com carga útil embarcada.

A tecnologia empregada nos VANTs foi inicialmente desenvolvida para o uso militar a partir das grandes Guerras Mundiais com o objetivo de reconhecer territórios, auxiliar em espionagem e em eventuais ataques (JENSEN, 2009). Com o passar do tempo e com a revolução tecnológica das últimas décadas a utilização deste tipo de equipamento tornou-se acessível ao público geral.

Com a utilização dos VANTs nas geociências, principalmente na elaboração de mapas e cartas através de levantamentos aerofotogramétricos, fez com que estes equipamentos fossem equipados com câmeras de alta precisão, sistema de posicionamento por satélite GNSS e sistemas inerciais para navegação automática proporcionando a execução de levantamentos com grande qualidade e precisão. Segundo Carrivick, Smith e Quincey (2016), os avanços da tecnologia dos *microchips*, do sistema GNSS e dos sistemas inerciais na última década, reduziram o custo de

fabricação deste equipamento, elevando sua precisão e possibilitando uma melhor autonomia nos voos com melhores controles de estabilidade e altitude.

Para a realização do levantamento aerofotogramétrico dos dois transectos na estrutura de impacto do Cerro do Jarau foi utilizado o VANT eBee (Figura 25), fabricado pela empresa SenseFly. Este equipamento de asa fixa permite a obtenção de fotografias aéreas com a câmera Sony DSC WX 220, equipada com sensor RGB de 18,2 megapixels, focal nominal de 4 mm e resolução espacial de 4896 x 3672 pixels. Além disso, o VANT eBee possui um sistema integrado com o *software* Emotion 2 que executa a cobertura fotogramétrica da área em estudo com a realização da decolagem e da aterrissagem do equipamento de forma autônoma, gerando maior segurança na obtenção de dados (SANTIAGO & CINTRA, 2018). Segundo Carrivick, Smith e Quincey (2016), os VANTs de asas fixas são os mais eficientes e com capacidade de longo alcance para a realização de levantamentos em grandes áreas, possuindo assim, uma maior estabilidade em sua plataforma de aquisição.

Figura 25 - VANT eBee fabricado pela empresa SenseFly.



Fonte: Autor (2019).

Para o planejamento e execução dos voos aerofotogramétricos com o VANT eBee utiliza-se o *software* Emotion 2 da empresa SenseFly. Este permite configurar os planos de voo para a tomada das fotografias na área de estudo de maneira rápida e fácil para o correto funcionamento do VANT, elevando assim, a qualidade do

levantamento. Além disso, o próprio *software* realiza o voo de forma autônoma com o auxílio do sistema de posicionamento GNSS e inercial, executando a tomada de fotografias com acompanhamento em tempo real através de *link* de rádio.

3.1.2. Receptores GNSS

Para localização dos dois transectos a serem levantados e alocação dos pontos de controles definidos, foram utilizados receptores GNSS de navegação modelo Garmin GPS 72H (Figura 26). Estes equipamentos possuem precisão horizontal de 5 metros.

Figura 26 - Receptor GNSS de navegação modelo Garmin GPS 72H.



Fonte: Autor (2019).

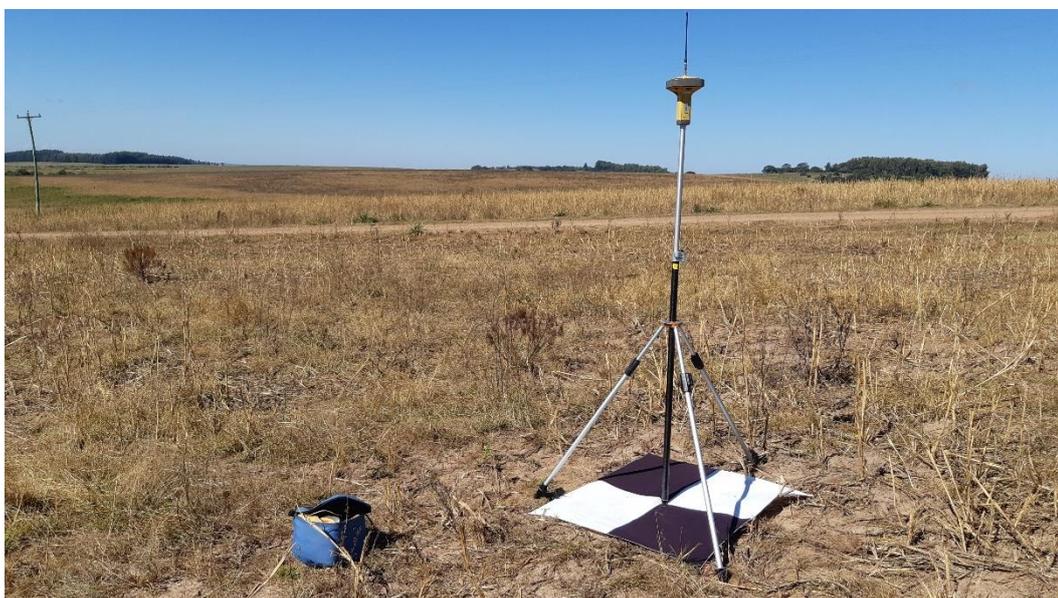
Para o rastreamento dos pontos de controle alocados da área do levantamento aerofotogramétrico e das bases definidas para o transporte de coordenadas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) foram utilizados receptores GNSS *Topcon GR-3*.

Os receptores GNSS *Topcon GR-3* (Figura 27) possuem operação em dupla frequência L1/L2 com capacidade de rastrear as constelações NAVSTAR GPS,

GLONASS e GALILEO. Suas especificações de acordo com o fabricante são (SANTIAGO & CINTRA, 2019):

- Receptor GNSS com 72 canais;
- Sistemas rastreados: GPS, GLONASS e GALILEO;
- Acurácia no posicionamento estático: 3 mm + 0,5 ppm horizontal e 5 mm + 0,5 ppm vertical.

Figura 27 - Receptor GNSS Topcon GR-3 rastreando um ponto de controle.



Fonte: Autor (2019).

Além disso, foram utilizados com os receptores GNSS *Topcon GR-3* os seguintes acessórios: tripé, bastão e maleta de transporte.

3.1.3. Outros Equipamentos

Outros equipamentos utilizados na realização do levantamento aerofotogramétrico na estrutura de impacto do Cerro do Jarau foram: *notebook* para controle e realização dos voos do VANT; inversor para carregar as baterias dos equipamentos; câmera fotográfica para registrar as atividades; e alvos para marcar os pontos de controle.

3.1.4. Softwares

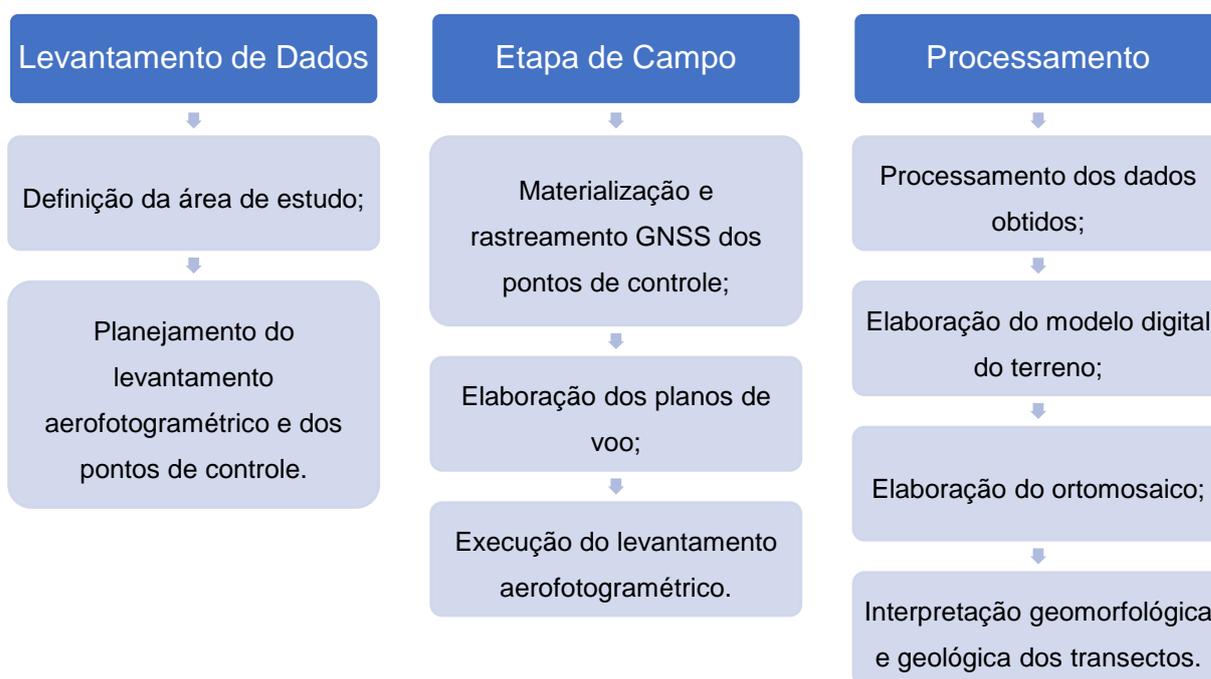
Para a realização dos objetivos descritos neste trabalho foram utilizados os seguintes *softwares* computacionais para as operações descritas abaixo:

- **Google Earth Pro:** visualização da área de estudo para planejamento do trabalho de campo;
- **Emotion 2:** elaboração dos planos de voo a serem realizados com a configuração dos parâmetros de voo e demais funcionalidades para a correta operação e funcionamento do VANT;
- **Agisoft Metashape Pro:** processamento das fotografias aéreas, geração das nuvens de pontos, elaboração do modelo digital de superfície (MDS) e do ortomosaico;
- **Topcon Tools:** Pós-processamento dos dados de rastreamento GNSS para transporte de coordenadas da RBMC para as bases na área de estudo e ajustamento das observações;
- **ArcGIS:** elaboração dos mapas dos transectos com o modelo digital de superfície (MDS) e o ortomosaico; realização de rotinas de geoprocessamento para obtenção dos resultados propostos nos objetivos do trabalho.

3.2. MÉTODOS

Para a realização do levantamento aerofotogramétrico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau com o objetivo de elaborar o modelo digital de superfície e o ortomosaico para a realização das análises geomorfológicas e geológicas foram realizadas as seguintes etapas e processos elencados abaixo em formato de fluxograma (Figura 28), que são divididas em três grandes grupos: levantamento de dados, etapa de campo e processamento.

Figura 28 - Fluxograma das etapas e processos realizados.



Fonte: Autor (2019).

3.2.1. Levantamento de Dados

Na etapa de levantamento de dados foi definida a área a ser executado o levantamento aerofotogramétrico e conseqüentemente planejado a atividade de campo.

Para isto, foram delimitados no *software ArcGIS* e *Google Earth* dois transectos (Figura 29), um no sentido norte-sul e o outro no sentido leste-oeste, abrangendo a dimensão da estrutura de impacto, que possui um diâmetro de 14 km. Os transectos foram delimitados com aproximadamente 12 km de comprimento por 150 m de largura compreendendo áreas importantes da estrutura.

Além disso, foi levado em consideração na escolha dos dois transectos o trabalho de inversão gravimétrica 3D da estrutura do Cerro do Jarau realizado por Giacomini (2015), pois nestes mesmos locais o autor traçou perfis para interpretar as unidades litológicas em superfície e subsuperfície em seu modelo tridimensional de anomalias gravimétricas.

Para elevar a qualidade posicional do levantamento aerofotogramétrico, foram planejados a utilização de pontos de controle e bases para o transporte de coordenadas na RBMC para a área de estudo, sendo que algumas bases funcionaram como ponto de controle. A posição de cada ponto de controle e base foram planejados com auxílio do *software Google Earth* levando em consideração os seguintes quesitos: os pontos ficarão próximo as estradas ou acessos para facilitar a sua materialização e rastreo; as bases ficarão próximas dos locais de decolagem e pouso do VANT; e materializar um ponto de controle nas cristas da borda do núcleo, local de maior altitude do levantamento.

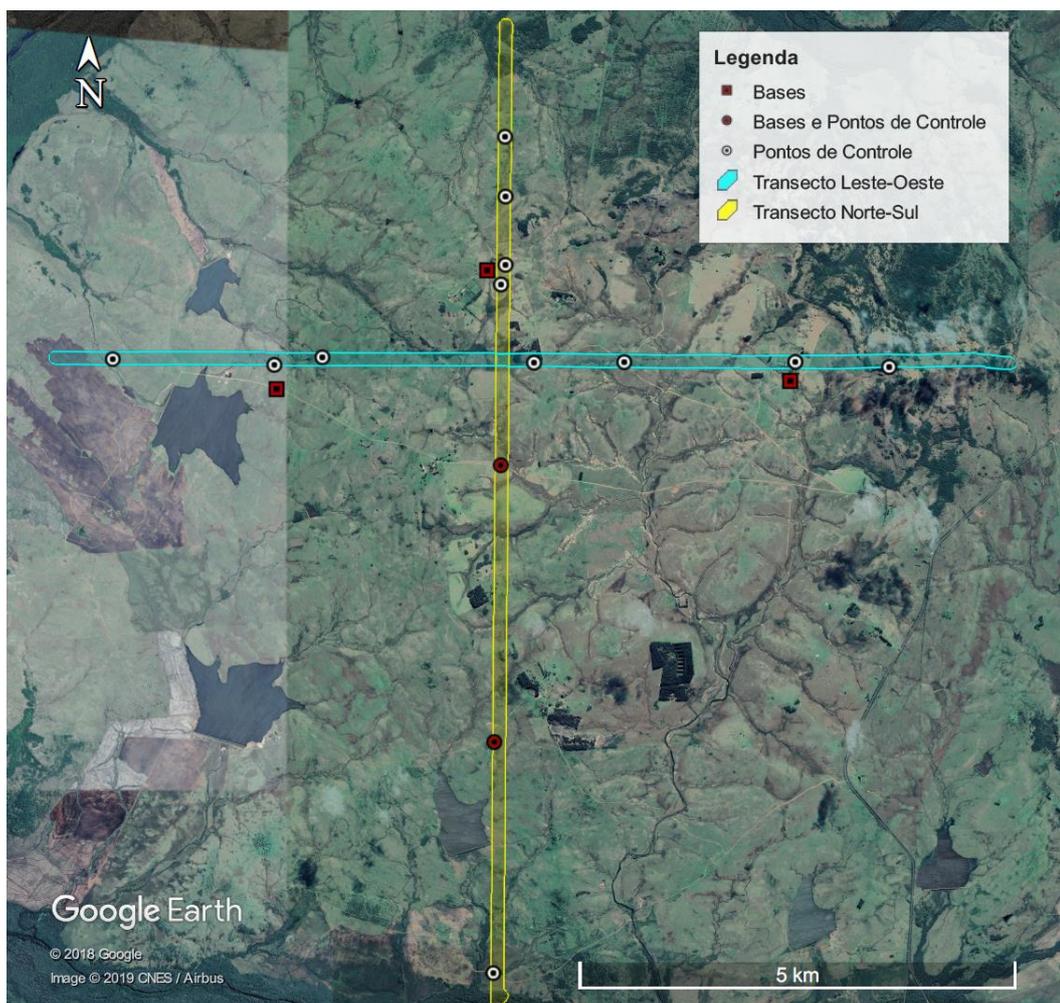
3.2.2. Etapa de Campo

3.2.2.1. Materialização e Rastreo GNSS dos Pontos de Controle

A partir das considerações e parâmetros escritos acima foram planejados a materialização de 14 pontos de controle através de alvos nas cores branco e preto (Figura 27), além de 2 bases na área de voo que serviram como pontos de controle. Ademais, foram determinados mais 3 pontos de base, fora dos transectos, para melhorar a precisão do transporte de coordenadas da RBMC para área de estudo. (Figura 29).

As bases foram escolhidas em locais onde a equipe de levantamento realizou as operações do voo com o VANT, pois nestes locais ocorreu a permanência por mais tempo. O rastreo GNSS das bases e dos pontos de controle foram realizados com os receptores GNSS *Topcon GR-3* com duração superior a 20 minutos para cada ponto.

Figura 29 - Transectos e Pontos de Controle planejados.



Fonte: Elaborado pelo autor no software Google Earth (2019).

O método escolhido para o rastreamento dos pontos de controle e das bases foi o de posicionamento relativo estático, que consiste na ocupação de dois pontos de maneira simultânea, uma base e um ponto de controle. Com isso, torna-se possível a obtenção das coordenadas dos pontos de controle a partir do processamento e ajustamento das linhas de base formadas entre a base e o ponto.

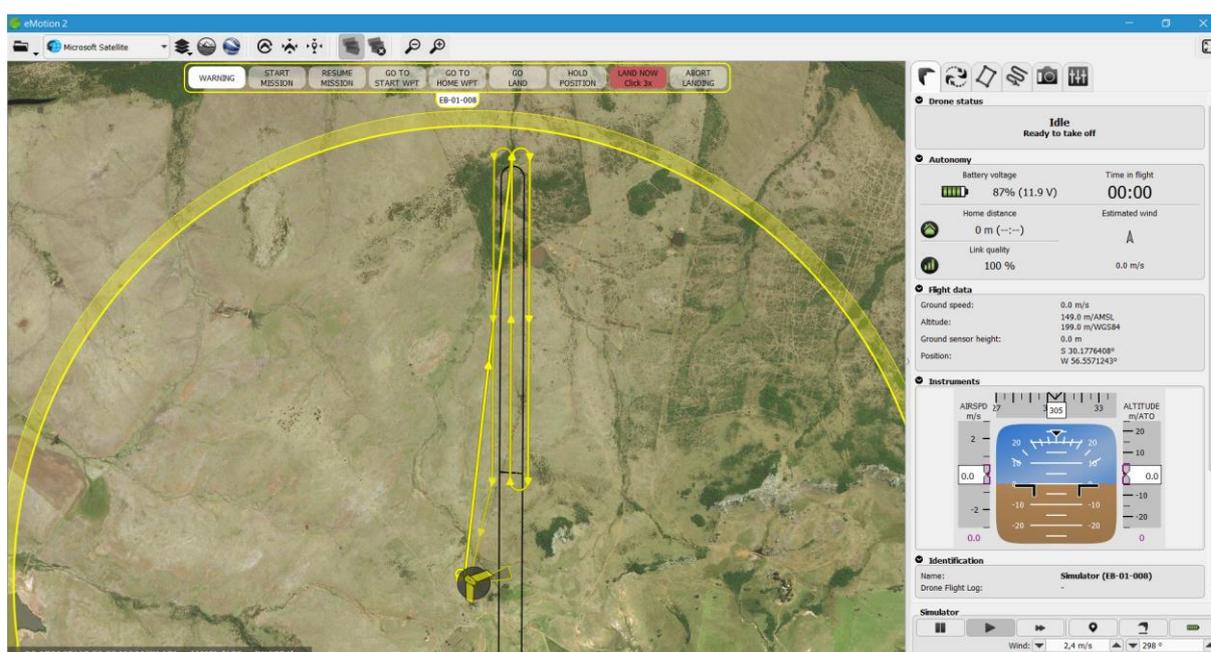
A área a ser levantada nos dois transectos é composta, predominantemente, por campos limpos sem a presença de vegetação arbustiva intensa; assim, a distribuição dos pontos de controle elevaram a qualidade do produto final, fazendo que o mesmo seja referenciado a um sistema de coordenadas conhecido e de maior precisão que o obtido pelo GNSS de navegação do VANT.

3.2.2.2. Elaboração dos Planos de Voo

Os planos de voo a serem realizados na estrutura de impacto foram elaborados em escritório, para que no local de execução fossem realizados pequenos ajustes nos mesmos, levando em consideração as características de cada local. Neste momento, foram definidos alguns parâmetros como a resolução a ser atingida, denominado de GSD (*Ground Control Points*). O GSD equivale ao tamanho em centímetros do pixel na imagem correspondente ao valor do pixel no terreno.

Os transectos foram divididos em 6 setores cada um, como dimensões de 2 km de comprimento por 150 m de largura para a elaboração dos planos de voo, que serão compostos por três linhas de voo longitudinais (Figura 30). Além disso, ficou definida a taxa de sobreposição longitudinal em 85% e sobreposição lateral em 65%. Em relação ao GSD, tamanho do pixel no terreno, e a altitude de voo, os planos de voo apresentaram alguma variação entre eles, pois foi utilizado como parâmetro de altitude a altura contada a partir do solo, ou seja, do local onde decolou o VANT. Desta maneira, como o relevo nos transectos apresenta grande variação altimétrica, as alturas de voo foram diferentes em alguns setores, sendo determinado como o limite de tamanho máximo de GSD 7,5 centímetros.

Figura 30 - Plano de voo elaborado para o setor 1 do transecto norte-sul.



Fonte: Elaborado pelo autor no *software* Emotion 2 (2019).

Outros parâmetros, como as condições meteorológicas nos dias da realização do levantamento aerofotogramétrico devem ser levados em consideração, pois grandes velocidades de vento podem comprometer a sobreposição das imagens, além de oferecer perigo ao equipamento. Além disso, outro fator importante em se considerar na elaboração dos planos de voo é a duração de cada voo, como um conjunto de baterias do VANT tem duração média de 40 minutos, optou-se que cada plano de voo não poderia ultrapassar 30 minutos.

3.2.2.3. Execução do Levantamento Aerofotogramétrico

Os levantamentos aerofotogramétricos foram executados com uma duração média de 20 minutos por voo, sendo registradas no total 1339 fotografias aéreas nos 12 voos executados, que possibilitarão através do seu processamento a obtenção do modelo digital de superfície e do ortomosaico dos transectos.

Além disso, após a finalização de cada voo, foi realizado em campo o procedimento denominado de *geotagging* no *software Emotion 2*, que consiste em associar as coordenadas e orientações obtidas pelos sistemas inerciais e GNSS do VANT às fotografias aéreas registradas.

3.2.3. Processamento

3.2.3.1. Bases e Pontos de Controle

As bases e os pontos de controle levantados em campo através de rastreamento GNSS por posicionamento relativo estático foram processadas para a obtenção de suas coordenadas corrigidas no *software Topcon Tools*. Primeiramente, foi determinado as coordenadas das 5 bases alocadas em campo através do processamento delas com as estações de referência da RMBC de Alegrete (RSAL) e de Santa Maria (SMAR). Os pontos de controle utilizados foram processados e ajustados utilizando como referência as 5 bases alocadas em campo. Todos os pontos foram processados no Datum WGS 84 e projeção UTM fuso 21 sul.

Após o processamento e determinação de todas as coordenadas dos pontos de controle e bases alocadas na área de estudo, realizou-se a sua compatibilização com o sistema altimétrico brasileiro. Através do programa online do IBGE MapGeo (disponível em <https://www.ibge.gov.br/mapgeo/mapgeo.htm>) foi realizada a transformação das altitudes elipsoidais obtidas pelos rastreadores GNSS em altitudes ortométricas, que são relacionadas a superfície equipotencial do campo de gravidade. Desta maneira, foram obtidas as coordenadas e altitudes dos pontos de controle materializados e bases alocadas na estrutura de impacto do Cerro do Jarau (Tabela 1), que auxiliarão no processamento das fotografias aéreas.

Tabela 1 - Coordenadas obtidas para as bases e pontos de controle.

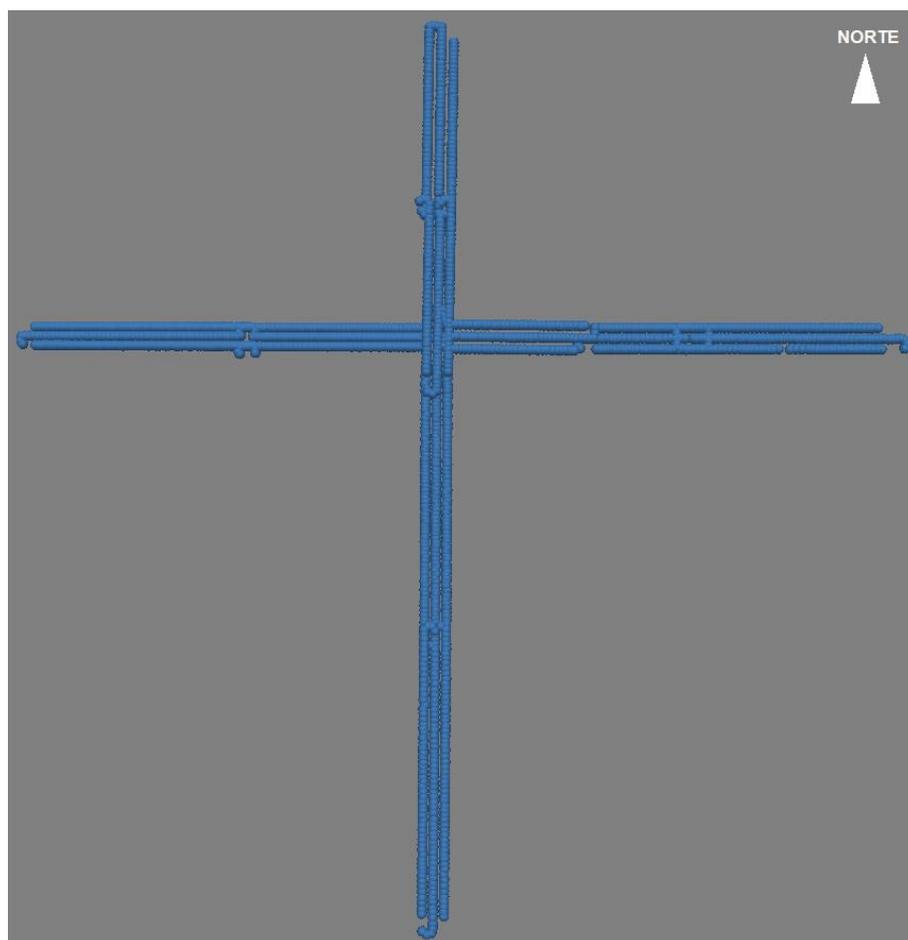
Ponto	Longitude	Latitude	Alt. Ortométrica (m)
Base 01	-56° 33' 23,23"	-30° 10' 45,70"	164,779
Base 04	-56° 34' 52,72"	-30° 11' 29,50"	129,644
Base 05	-56° 31' 11,17"	-30° 11' 19,92"	186,173
Pt. 01	-56° 33' 16,00"	-30° 09' 55,35"	132,730
Pt. 02	-56° 33' 14,81"	-30° 10' 12,68"	163,292
Pt. 03	-56° 33' 21,63"	-30° 10' 45,66"	165,321
Pt. 04	-56° 33' 17,37"	-30° 10' 50,99"	166,033
Pt. 05 / Base 02	-56° 33' 17,23"	-30° 11' 57,44"	139,036
Pt. 06 / Base 03	-56° 33' 20,41"	-30° 13' 40,10"	169,847
Pt. 07	-56° 33' 19,81"	-30° 15' 06,88"	87,741
Pt. 08	-56° 36' 03,47"	-30° 11' 18,27"	100,031
Pt. 09	-56° 34' 53,87"	-30° 11' 20,44"	133,023
Pt. 10	-56° 34' 33,40"	-30° 11' 17,59"	143,815
Pt. 11	-56° 32' 57,98"	-30° 11' 20,25"	169,221
Pt. 12	-56° 32' 25,04"	-30° 11' 19,18"	150,262
Pt. 13	-56° 31' 12,99"	-30° 11' 19,12"	167,350
Pt. 14	-56° 30' 33,37"	-30° 11' 24,84"	298,132

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2.3.2. Fotografias Aéreas

A primeira etapa do processamento consiste no carregamento das 1339 fotografias aéreas georreferenciadas no *software Agisoft Metashape Pro* (Figura 31).

Figura 31 - Fotografias aéreas carregadas no *software Agisoft Metashape Pro*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Após o carregamento das fotografias aéreas, realiza-se o Alinhamento das Câmeras (Figura 32). Etapa na qual o *software* procura pontos homólogos nas imagens para combiná-los, determinando a posição da câmera em cada fotografia. Além disso, nesta etapa ocorre a calibração automática da lente.

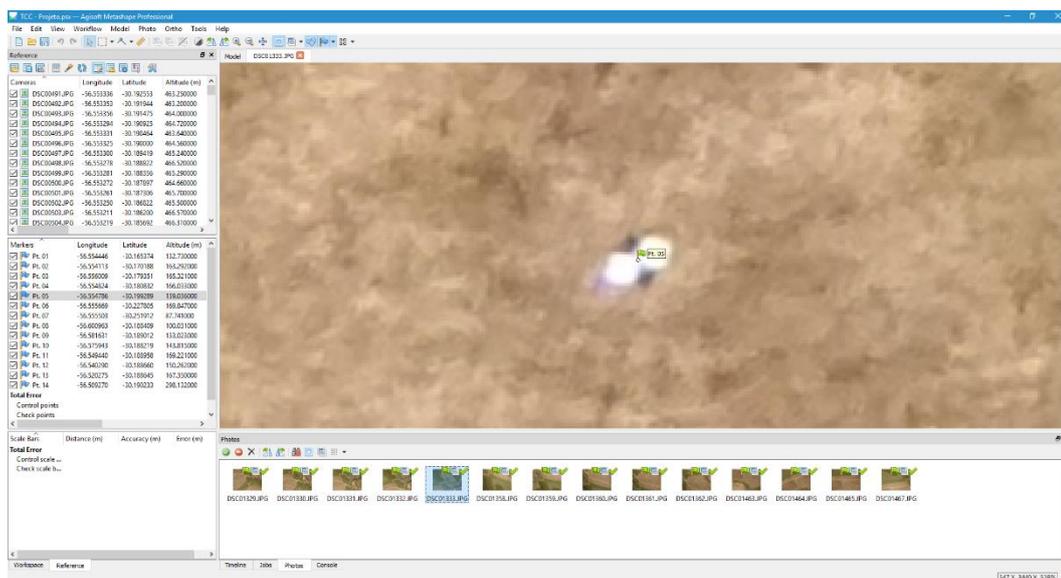
Figura 32 - Alinhamento das fotografias aéreas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com as fotografias alinhadas, são inseridos os pontos de controles no projeto. Neste momento, é realizado a identificação manual destes nos alvos fotografados e presentes nas fotografias aéreas (Figura 33). Para cada ponto de controle selecionado, o *software* mostra todas as fotografias em que ele está presente, devendo marcá-lo na posição correta em todas as fotografias. Este procedimento é importante para que o MDE possa ser georreferenciado.

Figura 33 - Identificação dos pontos de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com os 14 pontos de controle alocados e identificados nas suas corretas posições nas fotografias aéreas, é realizado o procedimento de construção da Nuvem Densa de Pontos (Figura 34). Esta etapa consiste em gerar uma nuvem de pontos a partir das posições calculadas para as câmeras, fotografias e pontos de controle. Este procedimento foi realizado no *software* na qualidade alta, produzindo para a área de estudos um total de 741.049.182 pontos.

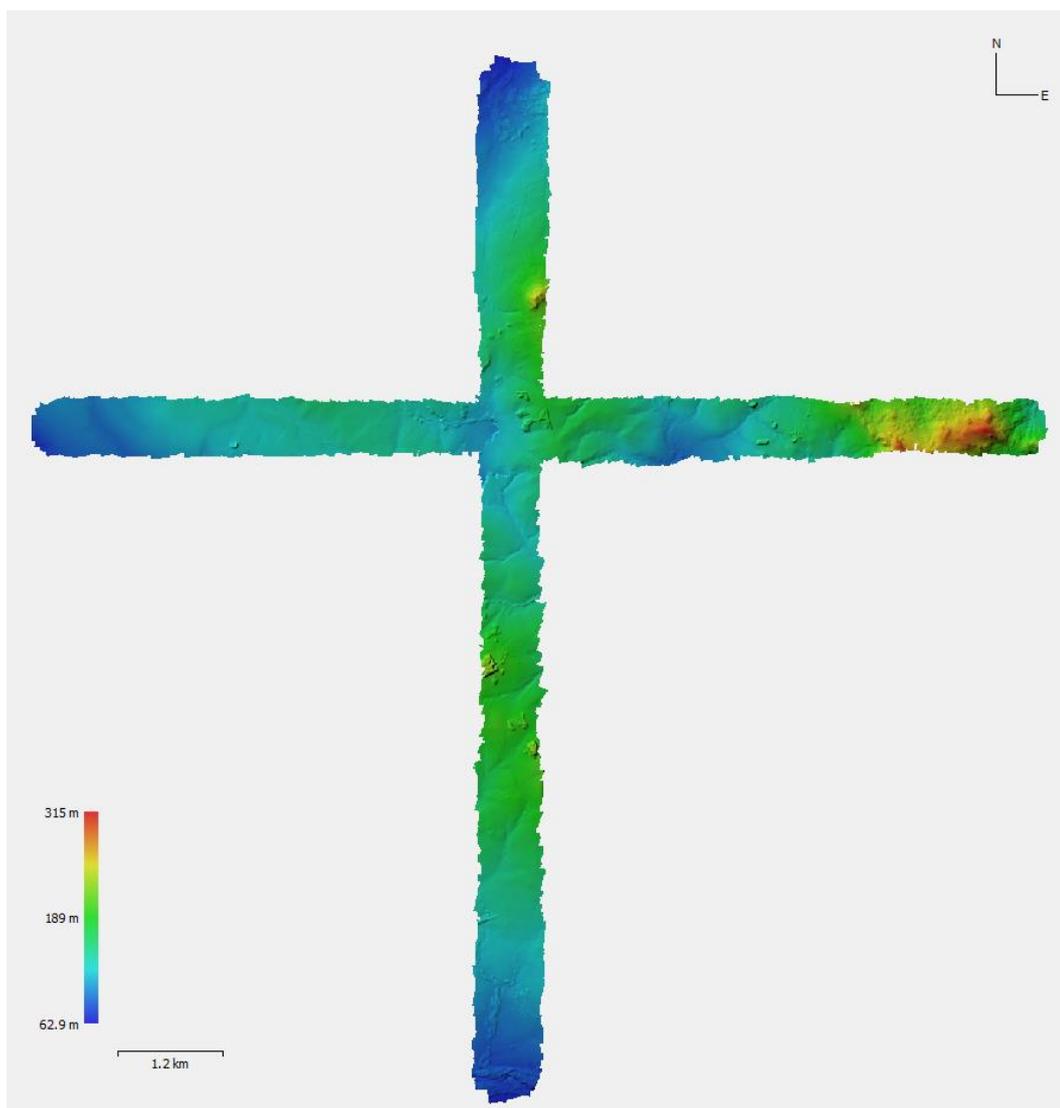
Figura 34 - Nuvem densa de pontos com os pontos de controle em azul.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Através da nuvem densa de pontos, é construído o Modelo Digital de Superfície (MDS) dos transectos levantados (Figura 35). A precisão obtida neste modelo foi de 15,4 cm/pixel. Como na área de estudo escolhida para o levantamento apresenta predominância de campos pastoris com vegetação rasteira e pouca presença de vegetação arbustiva, o modelo digital de superfície aproxima-se do Modelo Digital do Terreno.

Figura 35 - Construção do MDS dos transectos na estrutura de impacto do Cerro do Jarau.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A última etapa do processamento das fotografias aéreas é a realização da construção do ortomosaico (Figura 36), que é obtido a partir da ortorretificação das fotografias originais. Este produto apresentou precisão de 7,7 cm/pixel.

Figura 36 - Construção do ortomosaico dos transectos na estrutura de impacto do Cerro do Jarau.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Com o processamento das fotografias aéreas realizado, obtém-se o Modelo Digital de Superfície e o ortomosaico dos transectos norte-sul e leste-oeste levantados na estrutura de impacto do Cerro do Jarau que foram utilizados para as análises morfológicas e geológicas na área de estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

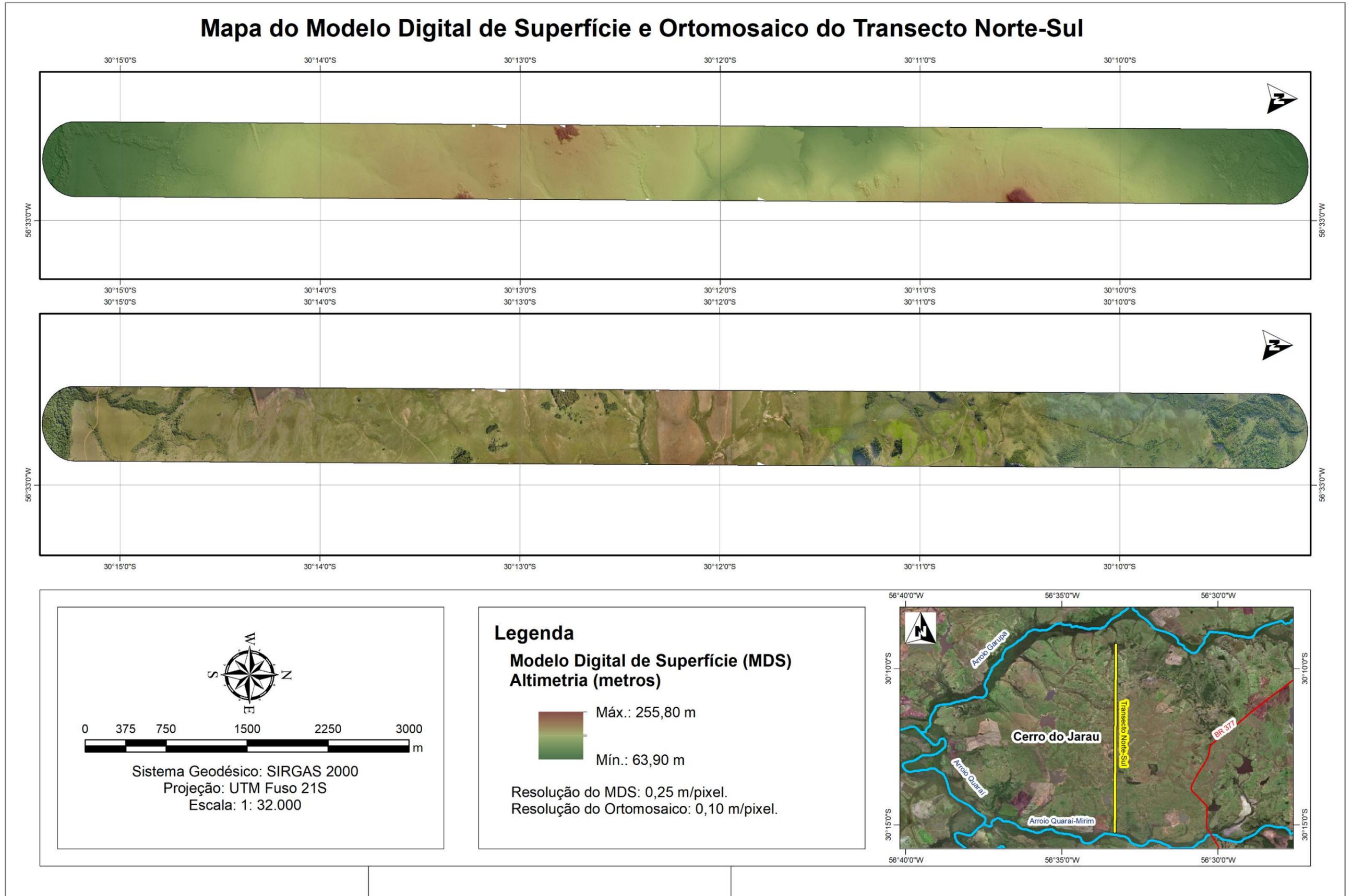
4.1. MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE E ORTOMOSAICO

O MDS e ortomosaico do transecto norte-sul (Figura 37) e leste-oeste (Figura 38) foram elaborados no formato de mapas através do *software ArcGIS*. Estes possuem aproximadamente 12 km de comprimento por 300 m de largura.

Os MDS's apresentam resolução de 0,25 m/pixel com formato de relevo sombreado para melhor interpretação da altimetria dos transectos. Além disso, foram realizados procedimentos de filtragem e classificação da nuvem densa de pontos no *software Agisoft Metashape Pro* para preenchimento de falhas e remoção de parte da vegetação.

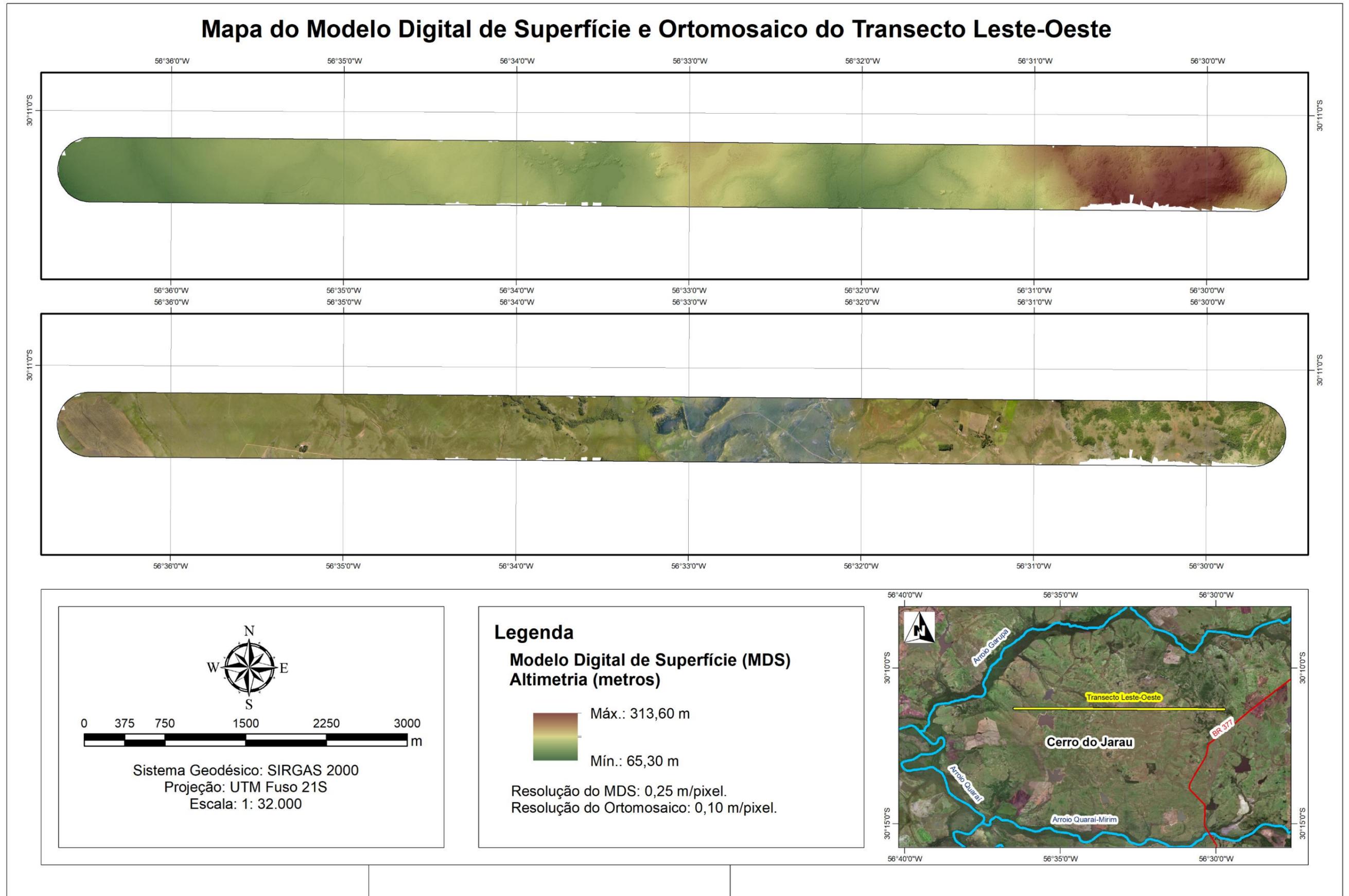
Os ortomosaicos apresentam GSD de 0,1 m/pixel onde é possível fotointerpretar as feições geomorfológicas/geológicas existentes na área com precisão através deste produto de alta resolução espacial.

Figura 37 - Modelo digital de superfície e ortomosaico do transecto norte-sul.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 38 - Modelo digital de superfície e ortomosaico do transecto leste-oeste.

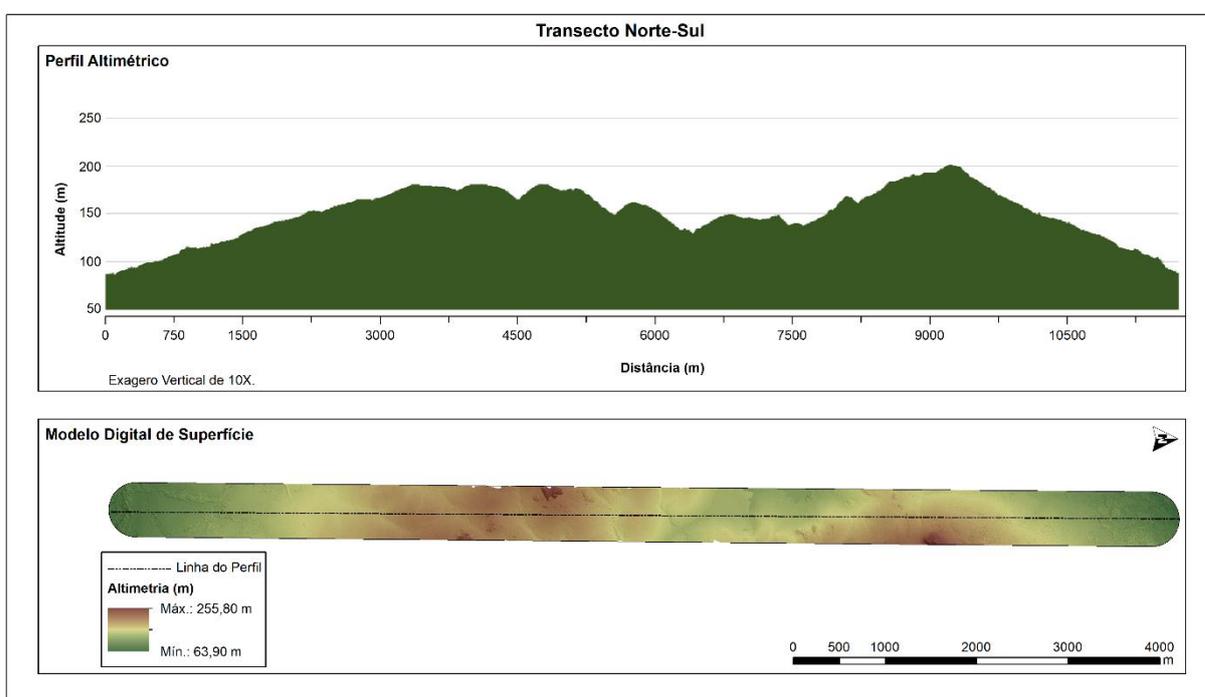


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.2. FOTOINTERPRETAÇÃO DOS ASPECTOS MORFOLÓGICOS

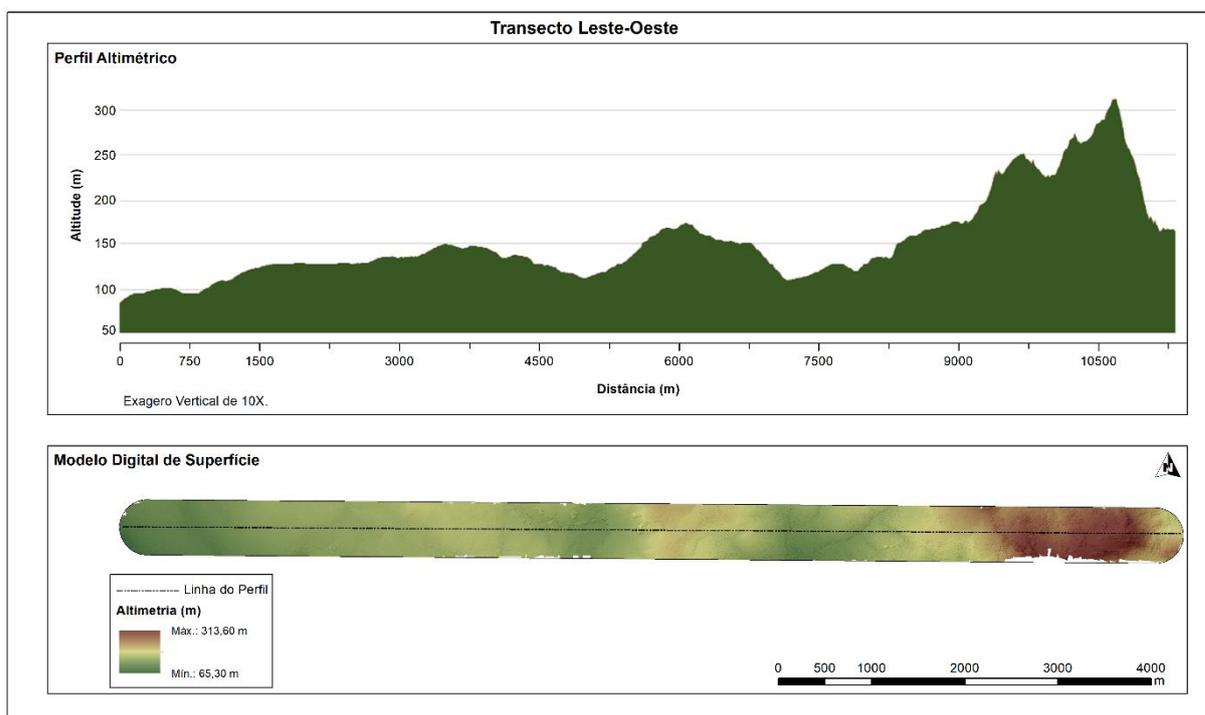
A altitude do transecto norte-sul apresenta variação entre 63,9 m e 255,8 m (Figura 39). Já no transecto leste-oeste (Figura 40) a variação ocorre entre 65,3 m e 313,6 m. No norte e ao nordeste da estrutura são verificadas as maiores altitudes pelo afloramento das cristas originadas no impacto do corpo celeste, sendo no transecto leste-oeste verificada uma altitude superior a 300 m.

Figura 39 - MDS e perfil altimétrico com exagero vertical de 10 vezes do transecto norte-sul.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 40 - MDS e perfil altimétrico com exagero vertical de 10 vezes do transecto leste-oeste.



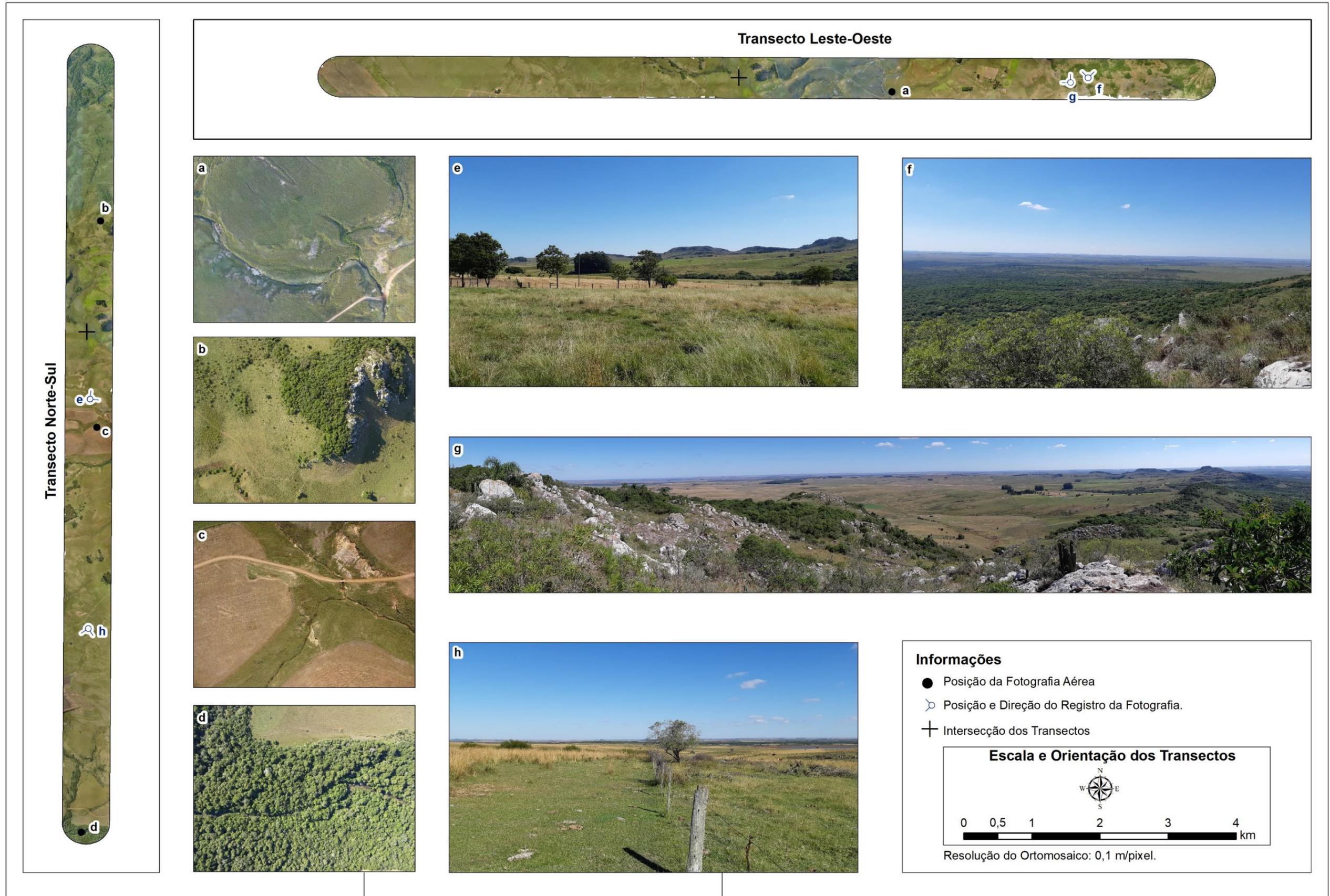
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As formas de relevo mais comuns na área de estudo são as colinas, conhecidas na região por coxilhas. Elas apresentam altitudes baixas com declives suaves e vales pouco profundos, atribuindo a paisagem um aspecto ondulado a plano. As cristas de arenito preservadas ao nordeste e ao norte do núcleo da estrutura de impacto em formato de meia lua são classificadas como morros ou morrotes de acordo com a sua amplitude altimétrica. Os morros ocorrem quando a amplitude ultrapassa a 100 m e são encontrados na porção nordeste da borda do núcleo (Figura 41e). Já os morrotes, com amplitude entre 20 m e 100 m, estão presentes em direção ao norte da meia lua (Figura 41b).

A estrutura de impacto apresenta seu núcleo soerguido com cristas preservadas ao nordeste e ao norte da estrutura em formato de meia lua (Figura 41g). Na parte sul (Figura 41h) e norte (Figura 41f) da estrutura, são identificadas características típicas da região geomorfológica da *Cuesta do Haedo*, relevo aplainado, com a presença de coxilhas pluriconvexas. Este aspecto, evidencia que as feições presentes no Cerro do Jarau contradizem com a geomorfologia do entorno, indicando que sua formação provavelmente é resultante do impacto por um corpo celeste.

Em relação aos recursos hídricos presentes na estrutura, foram identificados, cursos d'água de primeira e segunda ordem (Figura 41a e 41c). Estes possuem um padrão radial centrípeto, que reforça a evidência da área representar um astroblema. Os córregos existentes no interior da estrutura formam a bacia do Arroio Nhanduvaí (Figura 41a) que segue o seu curso em direção ao sul, sendo tributário do Arroio Quaraí-Mirim (Figura 41d).

Figura 41 - Aspectos geomorfológicos da estrutura de impacto do Cerro do Jarau.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.3. FOTOINTERPRETAÇÃO DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Trabalhos anteriores realizados na estrutura de impacto do Cerro do Jarau identificaram três unidades litoestratigráficas na área de estudo, em um padrão de anéis concêntricos. A Formação Guará, composta por arenitos, aflora na região central e sul do núcleo da estrutura, seguindo a drenagem do arroio Nhanduvaí. Os arenitos da Formação Botucatu afloram em torno da Formação Guará, em formato anelar. E a Formação Serra Geral, composta de basaltos, circunda a Formação Botucatu ultrapassando os limites da estrutura de impacto (Figura 18).

Com a sobreposição do mapa geológico proposto por Lourenço (2007) nos ortomosaicos dos transectos norte-sul e leste-oeste da estrutura de impacto, constata-se a presença dos arenitos da Formação Botucatu e dos basaltos da Formação Serra Geral na área dos transectos (Figura 42).

Através da interpretação visual dos ortomosaicos e do trabalho de campo, foram identificados afloramentos de arenito da Formação Botucatu nas cristas elevadas ao norte e nordeste da estrutura (Figura 42e e 42f). Nas cristas elevadas da região nordeste do núcleo, local onde ocorrem as maiores altitudes, foi verificada uma maior presença de afloramentos (Figura 42d e 42g). Nas bordas sul e oeste (Figura 42c) do núcleo soerguido da estrutura de impacto, também tem a presença de afloramentos, porém estão em menor número e quantidade em relação aos presentes nas cristas elevadas ao norte e nordeste.

Os arenitos da Formação Botucatu existentes da área dos transectos apresentam elevado grau de fraturamento, com disposição irregular. Além disso, foi possível verificar através do trabalho de campo outras características como a estratificação cruzada, com os afloramentos sendo compostos por blocos de diversos tamanhos.

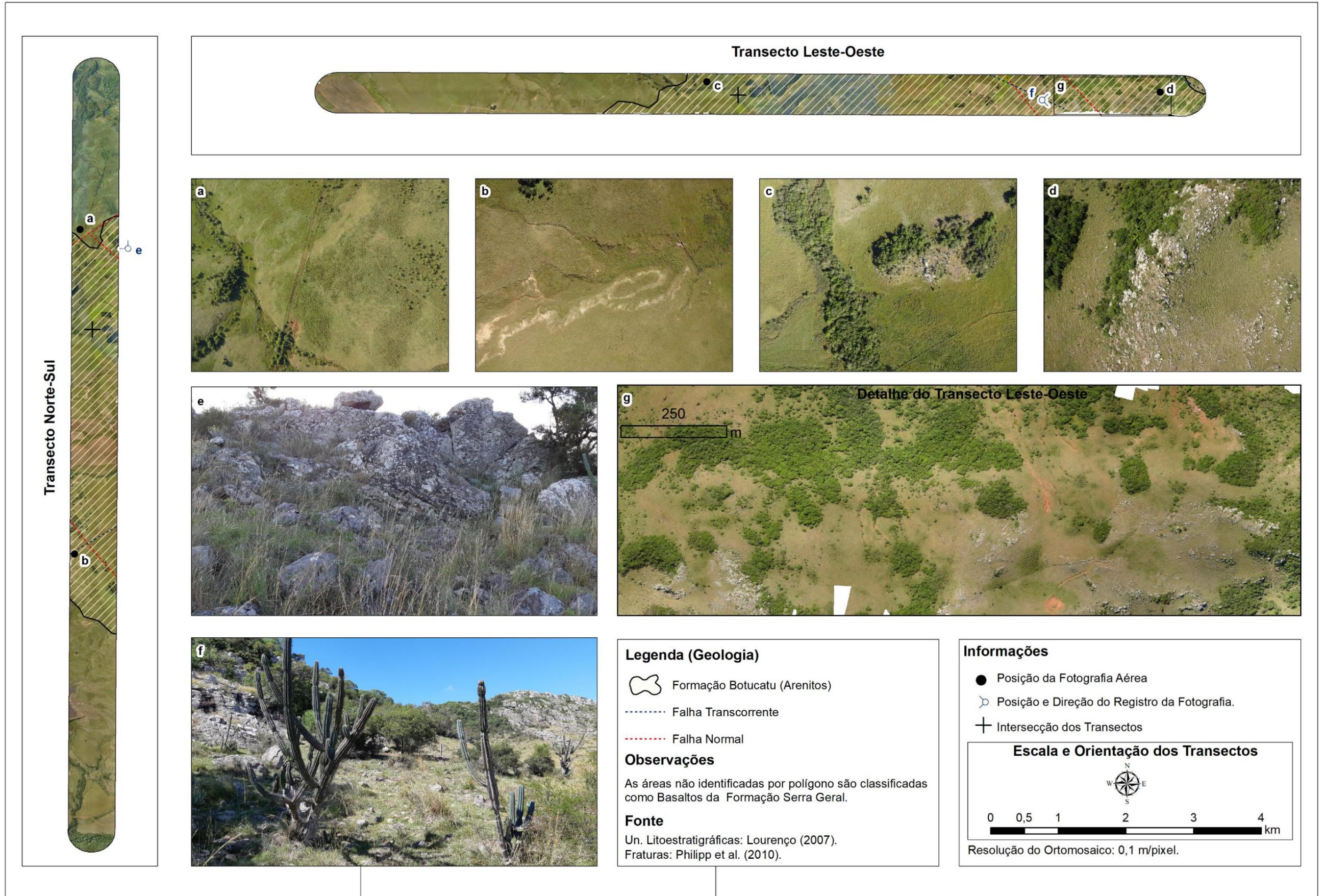
As falhas e fraturas identificadas por Phillip *et al.* (2010) na estrutura de impacto do Cerro do Jarau e presentes na área dos transectos, foram visualizadas nos ortomosaicos e MDS's através de lineamentos. Segundo Etchebehere, Saad & Fulfaró (2007), os lineamentos são feições topográficas lineares observáveis em fotografias que podem representar descontinuidades estruturais. Com isso, no local de

delimitação de uma falha transcorrente e uma falha normal por Phillip *et al.* (2010) no transecto norte-sul (Figura 42b), pode-se visualizar a quebra de revelo em padrões retilíneos que caracterizam um lineamento negativo. No setor norte (Figura 42a), onde são identificadas duas falhas normais, também é possível visualizar lineamentos negativos que auxiliam na identificação destas falhas.

Em relação à estratigrafia das camadas na estrutura de impacto do Cerro do Jarau, o estudo de Inversão Gravimétrica 3D proposto por Giacomini (2015) teve como objetivo a construção de um modelo geológico 3D da estrutura através da realização de levantamentos gravimétrico e topográfico com receptor GNSS. Além disso, a partir destes dados coletados em campo foi elaborado o mapa de anomalia Bouguer residual da estrutura de impacto.

Uma anomalia gravitacional é definida como a diferença entre o valor da aceleração gravitacional em um ponto da superfície e a sua aceleração gravitacional teórica, obtida através de modelos que utilizam parâmetros de massa, dimensão e rotação do planeta. Já a anomalia Bouguer é determinada pela variação entre a aceleração da gravidade da superfície e a teórica, levando em consideração as massas presentes entre a superfície física e a superfície de referência dada pelo geoide (HOFMANN-WELLENHOF & MORITZ, 2005).

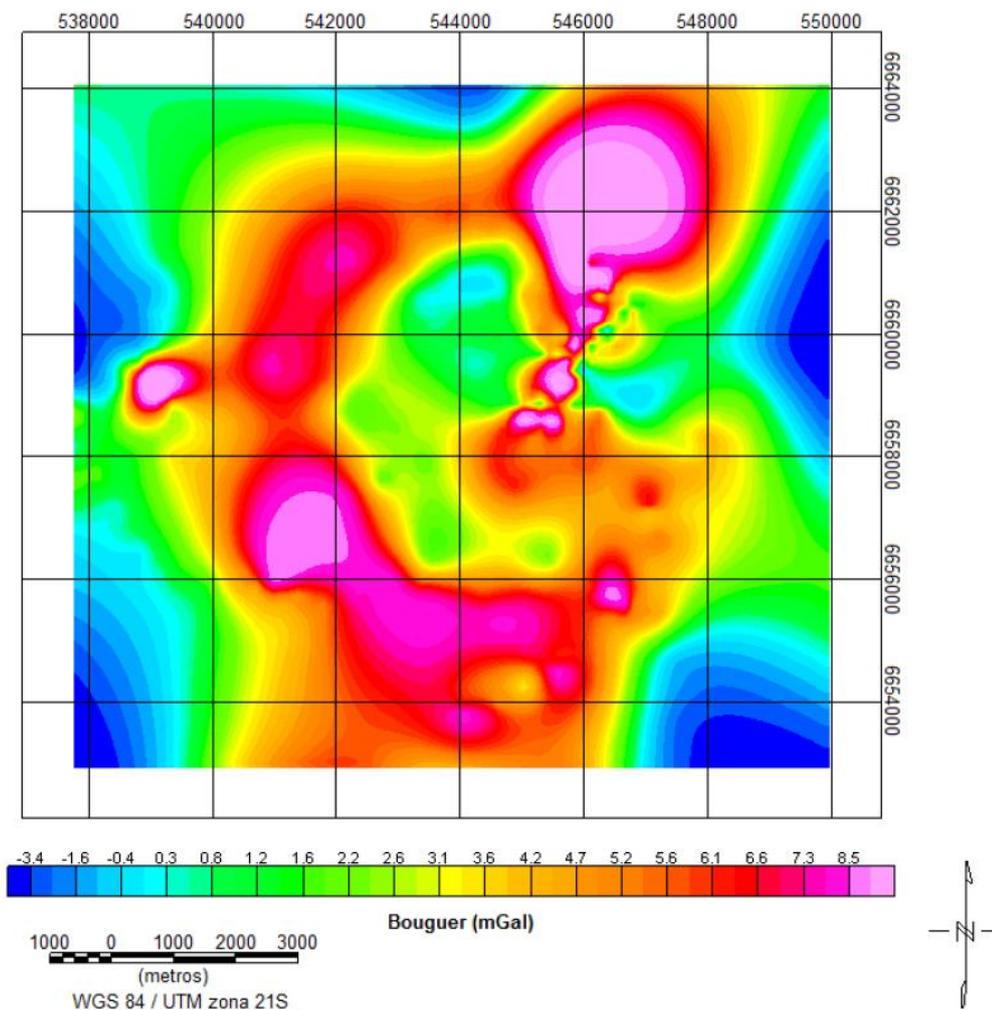
Figura 42 - Interpretação geológica da estrutura de impacto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Desta maneira, segundo Giacomini (2015), o mapa de anomalia Bouguer residual da estrutura de impacto do Cerro do Jarau (Figura 43) mostra uma forte anomalia positiva com tendência NE-SW, localizada na porção nordeste da estrutura e um padrão circular positivo em torno do núcleo.

Figura 43 - Mapa de anomalia Bouguer residual da estrutura de impacto.

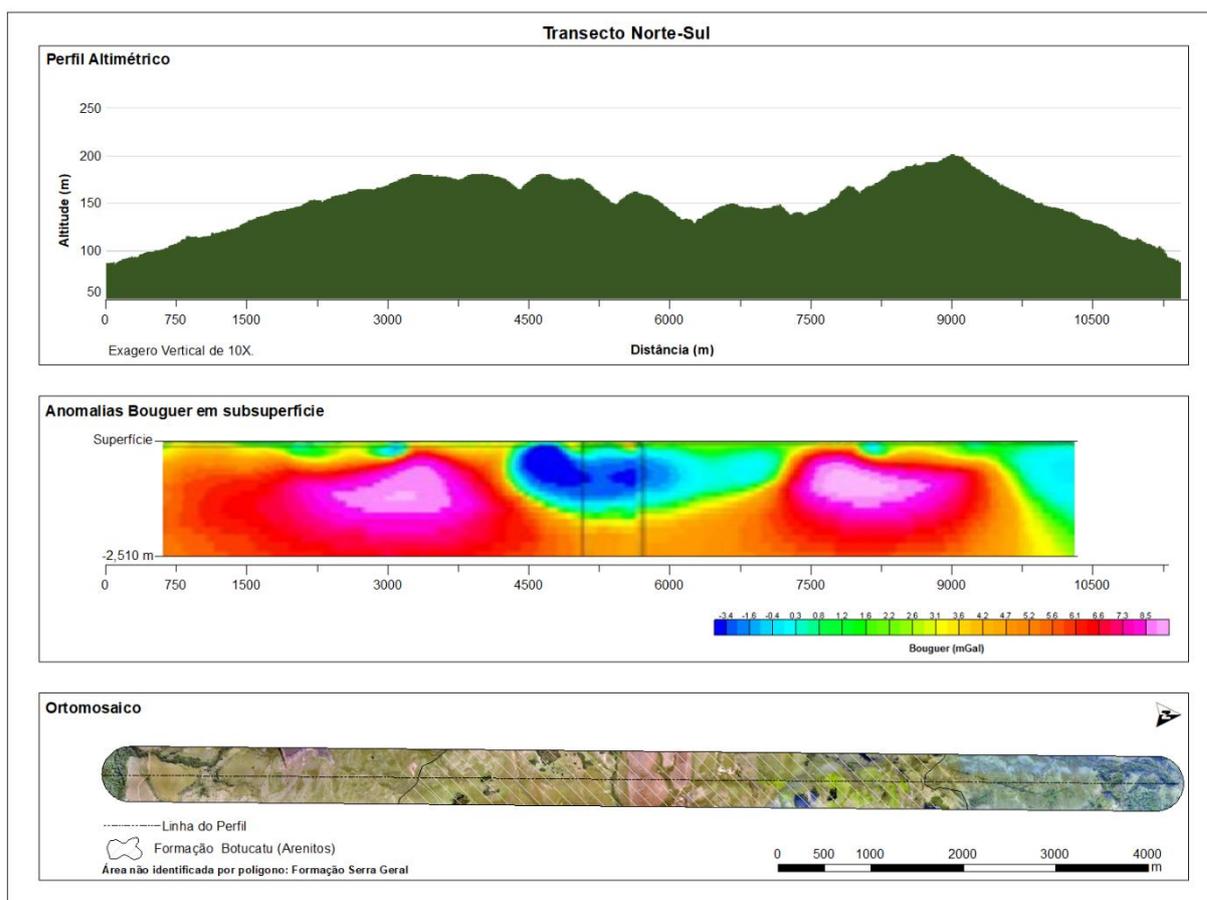


Fonte: Elaborado por Giacomini (2015).

Comparando a anomalia Bouguer com o perfil altimétrico e ortomosaico obtidos no levantamento aerofotogramétrico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau, juntamente com o mapa geológico proposto por Lourenço (2007), nota-se que no transecto norte-sul (Figura 44) há uma tendência de anomalia positiva entre 0,8 e 2,6 mGal na área do arenito da Formação Botucatu (brechas de impacto), caracterizada pelas bordas no núcleo soerguido no perfil altimétrico da estrutura de impacto. No

núcleo da estrutura, as anomalias são menores que 0,8 mGal. Nos limites sul e norte do perfil, verifica-se um aumento da anomalia Bouguer, sendo presente nestes locais em superfície os basaltos da Formação Serra Geral. Fazendo uma analogia com as cristas de arenito do setor norte, interpretasse estas anomalias como sendo brechas de impacto que estão em superfície no norte e possivelmente soterradas ao sul.

Figura 44 - Perfil altimétrico, anomalias Bouguer e ortomosaico do transecto norte-sul.

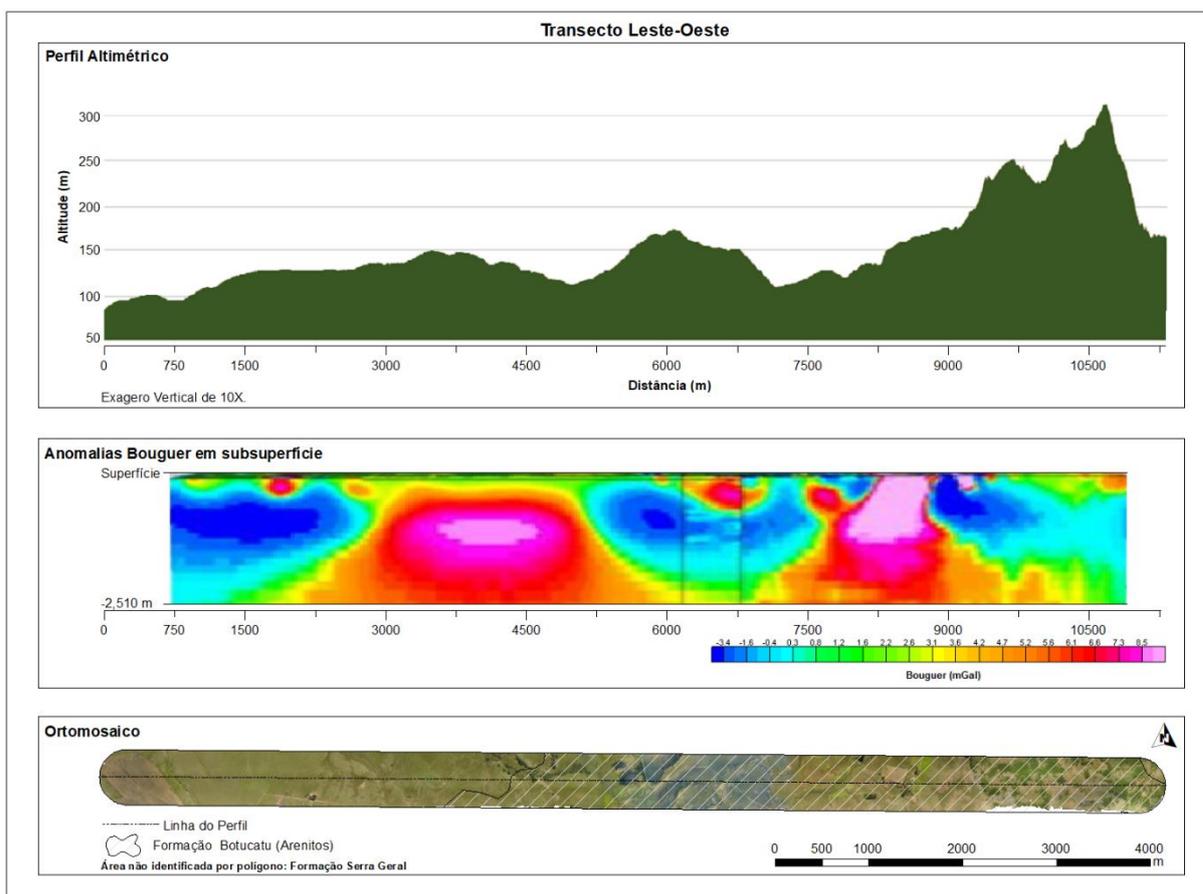


Fonte: Perfil altimétrico e ortomosaico elaborado pelo autor (2019); anomalias Bouguer adaptado de Giacomini (2015).

No transecto leste-oeste (Figura 45), verifica-se anomalias positivas entre 0,8 e 2,6 mGal nas bordas do núcleo soerguido. Entretanto, uma alta anomalia, com valores superiores a 8,5 mGal é percebida no início da elevação das cristas localizadas no nordeste da estrutura, local onde há grande presença de afloramentos de arenitos. Nas altitudes maiores, a anomalia Bouguer retorna aos valores encontrados nas bordas do núcleo. Além disso, no setor oeste do transecto também

ocorre uma alta anomalia na borda da Formação Botucatu com a Formação Serra Geral.

Figura 45 - Perfil altimétrico, anomalias Bouguer e ortomosaico do transecto leste-oeste.



Fonte: Perfil altimétrico e ortomosaico elaborado pelo autor (2019); anomalias Bouguer adaptado de Giacomini (2015).

Analisando os dados dos MDS's do transecto norte-sul e leste-oeste da estrutura de impacto verifica-se que as bordas do núcleo soerguido apresentam maiores altitudes ao norte e nordeste em relação ao sul e oeste da estrutura. Entretanto, os dados de anomalia Bouguer mostram valores positivos entorno do núcleo soerguido. Com isso, a hipótese é que o conjunto de falhas favoreceu o soerguimento dos blocos de arenito ao norte/nordeste da estrutura. Já no sul ocorreu o rebaixamento de outro bloco, que ainda estaria preservado, não visível em superfície. Desta maneira, a anomalia Bouguer é positiva e semelhante nas bordas do núcleo soerguido por provavelmente existir a mesma composição litológica, os arenitos com os basaltos comprimidos ao seu lado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos geomorfológicos e geológicos de interpretação das feições e formas de relevo presentes na estrutura de impacto do Cerro do Jarau foram possíveis de serem realizados através do MDS e ortomosaico elaborados para os transectos norte-sul e leste-oeste. Com estes produtos, foi possível identificar a presença de morros, morrotes e corpos d'água com padrão radial centrípeto, que a distinguem do seu entorno. Além disso, através na interpretação dos MDS`s foi possível verificar que o núcleo soerguido da estrutura de impacto se assemelha a morfologia de cratera de impacto complexa.

Em relação à geologia, a análise dos ortomosaicos com resolução de 0,1 m/pixel permitiu a identificação de diversos afloramentos de arenitos da Formação Botucatu que auxiliaram em uma melhor delimitação dos limites entre as unidades litológicas.

Além disso, foi identificado nas bordas do núcleo soerguido ao norte e nordeste, altitudes maiores em relação a oeste e sul, sendo esta evidência uma contribuição para a hipótese de que através do conjunto de falhas existentes houve o soerguimento do setor norte/nordeste e um rebaixamento ao sul/oeste. Os dados de anomalia Bouguer reforçam esta hipótese, pois os valores positivos em torno do núcleo indicam a continuidade da estrutura, sendo que ao sul e oeste os arenitos não estão visíveis em superfície.

Desta maneira, levantamentos aerofotogramétricos com VANTs são alternativas práticas para estudos geomorfológicos e geológicos, pois através da execução de voos para a tomada de fotografias aéreas com sobreposição é possível produzir MDS, ortomosaicos e perfis que auxiliam nos estudos da paisagem, onde a interpretação de feições e formas de relevo pode ser realizada nestes produtos com alta resolução espacial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. N. Domínios morfoclimáticos e províncias fitogeográficas do Brasil. **Revista Orientação, Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo (IGEOG/USP)**, n. 3, p. 45-48. 1967.

AB'SABER, A. N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Rio Grande do Sul. In: **A obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**, São Paulo: Beca. 2010.

AB'SABER, A. N. Faixas de transição e contacto: a transição entre domínios de vegetação é marcada por feições híbridas. **Scientific American Brasil**, São Paulo, n. 54. 2006.

AB'SÁBER, A. N. Transectos: Sua Importância Didática, Científica e Cultural. In: **A obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**. São Paulo: Beca. 2010.

ALVAREZ, W.; ALVAREZ, L. W.; ASARO, F.; MICHEL, H. V. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous - Tertiary Extinction. **Science**, v. 208, p. 1095-1108. 1980.

ALVES, F. da S. **Fitogeografia da Região do Jarau – Quaraí/RS**. 2012. 103 f. Tese de Doutorado – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria. 2012.

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil. **Drones**. Disponível em <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE. 1998.

ANJOS-COELHO, M.G. dos. **Caracterização Morfodinâmica e Morfoestrutural do Astroblema de Vista Alegre – Coronel Vivida - Paraná**. 2015. 135 f. Dissertação de Mestrado – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2015.

ASPRS, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **What is ASPRS**. Disponível em <<https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

BERGMANN, M. Distribuição e potencial de aproveitamento econômico dos basaltos amigdalóides a zeolitas do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, Brasil. **Metalogenia e exploração mineral no Grupo Serra Geral. IGEO/UFRGS**, Porto Alegre, 2014. P. 261-275.

BRITO, J. N.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: UERJ. 2007.

CARRIVICK J.L.; SMITH M.W.; QUINCEY D.J.; **Structure from motion in the geosciences**. 1. Chichester (UK): Wiley Blackwell, 2016. 206 p.

COELHO, I. A. **Avaliação da qualidade posicional de dados oriundos de VANT para mapeamento fotogramétrico aplicado em projetos rodoviários**. 2015. 392 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

CRÓSTA, A. P. **Glossário Geológico Ilustrado: Crateras Meteoríticas no Brasil**. 2006. Disponível em > <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/> <. Acessado em 25 de maio de 2019.

CRÓSTA, A. P.; LOURENÇO, F. S.; PRIEBE, G. H. Cerro Jarau, Rio Grande do Sul: a Possible New Impact Structure in Southern Brazil. In: Roger L. Gibson & Wolf U. Reimold (Org.). Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV. **The Geological Society of America Special Paper**, v. 465, p. 173-90. 2010.

CRÓSTA, A. P.; FURUIE, R. A.; SCHRANK, A.; KAZZUO-VIEIRA, C. Astroblema de Vista Alegre, PR: Impacto meteorítico em derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E. T.; Souza, C. R. G; Fernandes, A. C. S.; Filho, W. S. (Editores). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, v. 3. Publicação online, 2011. Disponível em <http://sigep.cprm.gov.br/sitio044/sitio044.pdf>. Acesso em 09/06/2019.

CRÓSTA, A. P. Estruturas de impacto e astroblemas brasileiros. In: HASUI, Y; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (Org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 673-708.

DIETZ, R.S. Astroblemes. **Scientific American**, v. 205, p. 141-148. 1961.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; FULFARO, V. J. Análise de bacia aplicada à prospecção de água subterrânea no planalto acidental paulista, SP. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 26, n. 3, p. 229-247, 2007.

FACCINI, U. F. **O Permo-triássico do Rio Grande do Sul. Uma análise sob o ponto de vista das sequências deposicionais**. 1989. 121 f. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. 1989.

FLORENZANO, T. G. Introdução à Geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 1, p. 11-30.

FRENCH, B.M. **Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures**. LPI Contribution n° 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1998. 120 p.

GAULT D. E.; QUAIDE W. L.; OBERBECK V. R. Impact cratering mechanics and structures. In: **Shock Metamorphism of Natural Materials** (B. M. French and N. M. Short, eds.). Baltimore: Mono Book Corp, 1968. p. 87-99.

GARCIA, D. D. **Caracterização Gamaespectrométrica de Cerro do Jarau/RS**. 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas. 2015.

GIACOMINI, B. B. **Inversão Gravimétrica 3D da Estrutura do Cerro do Jarau (RS)**. 2015. 66 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas. 2015.

GRANELL-PÉREZ, M. D. C. **Trabalhando geografia com as cartas topográficas**. Ijuí: Editora Unijuí. 2001.

GREHS, S.A. Aspectos Geológicos e Geomorfológicos do Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**, n. 23, Anais, p. 265-272. 1969.

GRIEVE, R. A. F.; ROBERTSON, P. B.; DENCE, M. R. Constraints on the formation of ring impact structures, based on terrestrial data. In: **Multi-Rings Basins: Formation and Evolution, Proc. Lunar Planet. Science** (P.H. Schultz and R. B. Merrill eds.). New York: Pergamon, 1981. p. 37-57.

HAUSMAN, A. Comportamento do freático nas áreas basálticas do Rio Grande do Sul. **Boletim Paranaense de Geografia**, Curitiba, v. 18-20, p. 187-205. 1966.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. 2. ed. New York: Springer, 2005. 411p.

HORBACH, R.; KUCK, L.; MARIMON, R.G.; MOREIRA, H.L.; FUCK, G.F.; MOREIRA, M.L.D.; MARIMON, M.P.C.; PIRES, J.L.; VIVIAN D.; MARINHO D.; TEIXEIRA, W. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Geologia, IBGE, Levantamento de Recursos Naturais, v. 33, p. 29-312. 1986.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de Recursos Naturais**. v. 33. Folha SH. 22 Porto Alegre e parte das Folhas SH. 21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796 p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **MapGeo On-Line**. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/mapgeo/mapgeo.htm>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Noções Básicas de Cartografia**. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. v. 8, 130 p.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**. Brasília: INCRA, 2013. v. 1. 37 p.

JENSEN, JOHN R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 598 p. Tradução José Carlos Neves Epifanio.

KAZZUO-VIEIRA, C.; CROSTA, A. P.; GAMBOA, F. e TYGEL, M. Caracterização geofísica da estrutura de impacto do domo de Vargeão, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 375-388, 2009.

KOEBERL, C. Craters on the Moon from Galileo to Wegener: a Short History of the Impact Hypothesis, and Implications for the Study of Terrestrial Impact Craters. **Earth, Moon and Planets**, v. 85-86, p. 209-224. 2001.

LISBOA, N. A.; OLIVEIRA, M. T. G.; SCHUCK, M. T. G. O.; EICK, N. C.; CARRARO, C. C. Identificação de uma estrutura tectônica elíptica na Formação Serra Geral, RS, através de imagens Landsat, Radar e Aerofotos. In: **SBG, Simpósio Sul Brasileiro de Geologia**, n. 2, Anais, v. 1, p. 131-145. 1985.

LISBOA N. A. & SCHUCK M. T. G. O. Caracterização de formas e padrões estruturais no Grupo São Bento da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul em imagens orbitais e suborbitais. In: **SBG, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Anais, v. 2, p. 323-333. 1988.

LOURENÇO, F. S. **Caracterização Geológica da Possível Estrutura de Impacto do Cerro do Jarau - Região oeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2007. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2007.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Curitiba: UFPR, 1987.

MELOSH, H. J. **Impact Cratering - A Geologic Process**. New York: Oxford University Press, 1989. 234 p.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 1997. 255 f. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1997.

MILANI, E. J. "Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná". **In: Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 266-279.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. E FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. In: Cartas Estratigráficas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MONICO, J. F. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamento e aplicações** 2. ed. São Paulo: Unesp. 2008.

MOREIRA, H. L.; FREITAS, P. R. S.; NUNES, A. B. Geologia da estrutura de colapso do Jarau. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**, n. 31, Anais, v. 5, p. 2684-2690. 1980.

MÜLLER FILHO, I. L. **Notas para o estudo da geomorfologia do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 1970.

NASA. **Asteroid Day and Impact Craters**. Disponível em <<https://www.nasa.gov/feature/asteroid-day-and-impact-craters>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

PALERMO, R. D.; LEITE, T. C. **Integração de Levantamento Fotogramétrico Aéreo com o uso de VANT e Levantamento Fotogramétrico Terrestre para Mapeamento Tridimensional das Ruínas de São Miguel das Missões**. 2013. 173 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

PLANETARY AND SPACE SCIENCE CENTRE. **Earth Impact Database**. Disponível em <<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

PEATE, D. W., HAWKESWORTH, C. J., MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America); Classification of magma types and their spatial distribution. **In Bulletin of Vulcanology**. v. 55, p. 119-139, 1992.

PEATE D. W., HAWKESWORTH C. J. Lithospheric to asthenospheric transition in Low-Ti flood basalts from southern Parana, Brazil. **Chemical Geology**, v. 127, p. 1-24, 1996.

PHILIPP, R. P.; ROLIM, S. B. A.; SOMMER, C. A.; SOUZA FILHO, C. R.; LISBOA, N. A. A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, Quaraí, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 40 (4), p. 468-483, 2010.

RIO GRANDE DO SUL. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. **Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2019. Disponível em <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

SÁNCHEZ, J. P. **Mapeamento geológico – estrutural do astroblema de Cerro do Jarau – RS/Brasil**. 2014. 178 f. Tese de doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro, 2014.

SANTIAGO & CINTRA. **Topcon GR-3**. Disponível em <<https://www.santiagoocintra.com.br/produtos/usados/gps-rtk/gr-3>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

SANTIAGO & CINTRA. **VANT eBee S.O.D.A.** Disponível em <<https://www.santiagoecintra.com.br/produtos/sensefly/vant-ebree-soda>>. Acessado em 02 de junho de 2019.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. Laurelville: Terra Science, 1999.

SCHERER, C. M. S.; FACCINI U. F.; LAVINA, E. L. Arcabouço Estratigráfico do Mesozoico da Bacia do Paraná. In: HOLZ, M.; DE ROSS, L. F. (Edit). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000. 444 p.

SCHERER, C. M. S. Preservation of Aeolian genetic units by lava flow in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentology**, v. 49, p. 97-116, 2002.

SCHERER, C. M. S.; LAVINA, E. L. C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian-fluvial strata of the upper Jurassic Guar´a Formation, southern Brazil. **Sedimentology**, v. 52, p. 1323-1341, 2005.

SCHERER, C. M. S., LAVINA, E. L. C. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the upper Jurassic – lower cretaceous Guar´a and Botucatu formations, Paran´a Basin, southernmost Brazil. **Gondwana Research**, v. 9, p. 475-484, 2006.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Deserto Grande do Sul: Controv´rsias**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 109 p.

VALERIANO, M. M. Dados Topogr´ficos. In: FLORENZANO, T. G. (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. S˜o Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 3, p. 72-103.

VIEIRA, C. K. **Caracteriza¸˜o geol´gica e geof´sica da estrutura de impacto Domo de Varg˜o, SC**. 2009. 153 f. Disserta¸˜o de Mestrado - Instituto de Geociˆncias, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas. 2009.