



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA SEDIMENTAR E LINHA DE PESQUISA:  
SENSORIAMENTO REMOTO E MODELAGEM GEOLÓGICA  
NÍVEL MESTRADO  
MODALIDADE ARTIGO CIENTÍFICO

MARCELO KEHL DE SOUZA

LASER SCANNER TERRESTRE: UMA FERRAMENTA EFICAZ PARA MEDIDAS DE  
ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM AFLORAMENTOS

SÃO LEOPOLDO

2012

MARCELO KEHL DE SOUZA

LASER SCANNER TERRESTRE: UMA FERRAMENTA EFICAZ PARA MEDIDAS DE  
ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM AFLORAMENTOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Área de concentração: Geologia Sedimentar e Linha de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez

São Leopoldo

Agosto/2012

S729L Souza, Marcelo Kehl de  
Laser scanner terrestre: uma ferramenta eficaz para medidas de estruturas geológicas em afloramentos / por Marcelo Kehl de Souza. -- São Leopoldo, 2012.

67 f. : il. color. ; 30 cm.

Com: artigo “Terrestrial laser scanner: a tool for effective measurements of geological structures in outcrops”.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, RS, 2012.

Orientação: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez, Ciências Exatas e Tecnológicas.

1.Geologia. 2.Geologia estrutural. 3.Laser scanner. 4.Mapeamento geológico – Laser scanner. 5.Geologia estrutural. 6.Técnica LIDAR. 7.Modelos digitais de afloramentos. 8.Estrutura geológica planar. I.Veronez, Maurício Roberto. II.Título.

CDU 55  
551.243  
528.5

Catálogo na publicação:  
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

MARCELO KEHL DE SOUZA

LASER SCANNER TERRESTRE: UMA FERRAMENTA EFICAZ PARA MEDIDAS DE  
ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM AFLORAMENTOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração, Geologia Sedimentar e Linha de Pesquisa Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

---

Profa. Dra. Ana Paula Larocca - Escola Politécnica da USP

---

Prof. Dr. Alípio Pereira - PETROBRAS – CENPES - PDGEO/GSE



*Dedicatória*

*Dedico à minha família, Lotar, Celita, Márcia, Marcelo e Liliane, que sempre me apoiaram, e aos colegas do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital (LASERCA).*

***Agradecimentos***

*Ao orientador Prof. Dr. Maurício Veronez.*

*Aos técnicos do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital - LASERCA/UNISINOS pelo suporte nas atividades de campo.*

*À PETROBRAS pelo apoio financeiro aos projetos NEAP (Núcleo de Estratigrafia Aplicada, Convênio 16 – SAP 4600242459) e “Mapeamento 3D Georreferenciado de Afloramentos Utilizando uma Técnica LIDAR (Light Detection And Ranging)”, (Termo de Cooperação 0050 0044869. 08.4 - SAP: 4600285973), ambos financiados pela Rede Tecnológica em Sedimentologia e Estratigrafia.*

*À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), por meio do projeto "Modelos Digitais de Afloramentos como ferramenta na análise e interpretação geológica" (Edital 01/2010 - Processo 10/0477-0).*

*À CAPES, pela concessão da bolsa de Mestrado do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares – PROSUP.*

## RESUMO

Este estudo desenvolveu um método para a obtenção da orientação espacial de estruturas geológicas planares com a utilização da técnica *Light Detection and Ranging* (LIDAR), especificamente com o *Laser Scanner* Terrestre. A área de estudo localiza-se na Incopel-pedreira de basalto, no município de Estância Velha, estado do Rio Grande do Sul. O estudo cobriu levantamento de campo com as determinações das atitudes de planos utilizando bússola e clinômetro e o imageamento digital utilizando a técnica LIDAR. Três métodos foram utilizados para computar os planos selecionados na nuvem de pontos, sendo eles: Três pontos, Regressão Planar e Momento de Inércia. A eficiência dos métodos utilizados foi avaliada pelos métodos tradicionais de medidas (bússola e clinômetro). O método de Três Pontos é simples e fácil para computar a orientação de planos, contudo, não possui ferramentas de análise de qualidade. O método de Regressão Planar é efetivo para medir a orientação de planos e possui ferramenta de análise de grau de ajuste ao plano calculado. O método de Análise de Momento de Inércia, além de apresentar menores diferenças em relação aos métodos tradicionais, apresenta análise de grau de ajuste e análise da confiabilidade com relação aos planos computados, provando ser uma ferramenta eficiente para o processamento da orientação de planos a partir de pontos.

Palavras-chave: LIDAR. Formação Serra Geral. Orientação de fraturas. Três Pontos. Análise de Momento de Inércia. Regressão Planar.

## **ABSTRACT**

This study aimed to build a model to survey geological planar structures geometries by using Light Detection and Ranging (LIDAR) technique, specifically with the Terrestrial Laser Scanner. The area chosen for the survey and application of the proposed method is located at Incopel basalt quarry, in the town of Estância Velha, State of Rio Grande do Sul. The study covered a field survey with the determinations of planes attitude using compass and clinometer and digital images using LIDAR. Three methods were used to compute the selected planes in the point cloud, namely: Three Points, Planar Regression, and Moment of Inertia analysis. The methods were evaluated and compared to traditional methods of measurement (compass and clinometer). The Three Point method is quick and simple to measure planar geological structures orientation; however, it does not have any tool for quality analysis. The Planar Regression method proves to be effective in calculating the orientation of planes and features a tool for analyzing the degree of fit to the calculated plane. The Moment of Inertia presents minor measurement differences compared to traditional methods, and provides degree of fit and reliability analysis to the calculated plane, proving to be an efficient tool for processing the orientation of planes from points.

**Keywords:** LIDAR. Serra Geral Formation. Fracture orientation. Three Points. Planar Regression. Moment of Inertia analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dificuldades nas medições com bússola em plano de difícil acesso .....	17
Figura 2 - Princípio de funcionamento do <i>Laser Scanner</i> .....	18
Figura 3 - Oclusão causada por saliência no afloramento .....	19
Figura 4 - Equipamentos. A) <i>Laser Scanner 3D Terrestre ILRIS</i> . B) Receptor GPS- Topcon Modelo Hiper Lite RTK. ....	21
Figura 5 - Localização da área de estudo. Pedreira de basalto (UTM E=485685 m; UTM N=6722017 m; Zona 22S, SIRGAS2000).....	22
Figura 6 - Etapa de seleção e marcação dos planos. A) Plano 9 marcado em verde. B) Plano 5 marcado em amarelo.....	23
Figura 7 - Identificação de planos na nuvem de pontos. A) O plano fica evidenciado pela maior densidade de pontos formando uma linha. B) O plano fica evidenciado pela regularidade da distância entre os pontos. ....	24
Figura 8 - Seleção dos planos na nuvem de pontos. Os planos marcados em branco são planos medidos com bússola e clinômetro e computadas as orientações com três técnicas: Três Pontos, Regressão Planar e Momento de Inércia. Os planos em preto, planos de difícil acesso, foram computados com as três técnicas. ....	25
Figura 9 - Seleção de pontos no módulo IMInspect do programa Polyworks. As medidas na figura estão em metros e foram realizadas com as ferramentas de medidas do programa.....	26
Figura 10 - Distribuição espacial dos pontos de acordo com as relações entre os autovalores no método de análise de Momento de Inércia. ....	30
Figura 11 - A confiabilidade das medidas de orientação está condicionada à distribuição no espaço dos nós. A) Fornece uma distribuição uniforme com relação ao centro de massa. B) Mesmo tendo os vetores bem distribuídos os vetores maiores influenciam mais do que os curtos produzindo uma distribuição agrupada.....	31
Figura 12 - Nuvem de pontos georreferenciada. Utilizado o módulo IMInspect do programa Polyworks para realizar medidas, em metros, no afloramento.....	33
Figura 13 - Polos dos planos medidos com bússola e plotados em projeção de igual área.....	36
Figura 14 - Gráfico da diferença da média das medidas de direção de mergulho com o grau de experiência dos estudantes.....	36

Figura 15 - Gráfico da diferença da média das medidas do mergulho com o grau de experiência dos estudantes.....	37
Figura 16 - Gráfico da diferença entre as médias das medidas de direção de mergulho dos 10 planos de fratura realizadas com a bússola e as três técnicas calculadas: 3P(Três Pontos), MI (Momento de Inércia) e RP (Regressão Planar). ....	37
Figura 17 - Gráfico da diferença entre as médias das medidas dos ângulos de mergulho dos 10 planos de fratura realizadas com a clinômetro e as medidas calculadas pelas três técnicas: Três Pontos (3P), Momento de Inércia (MI) e Regressão Planar (RP) em graus.....	38
Figura 18 - Gráfico do Coeficiente de correlação (CC) dos planos calculados pelo método de Regressão Planar. ....	38
Figura 19 - Gráfico da distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores. Com os índices de grau de ajuste (M) e confiabilidade das medidas (K) dos planos computados no método Momento de Inércia. ....	39
Figura 20 - Oclusão do plano 8 por causa de obstáculos na visada do LST. A) Plano 8 marcado na nuvem de pontos. B) Plano 8 com marcação em azul na fotografia.....	40
Figura 21 - Plano 6 na fotografia identificando a irregularidade da superfície.....	40
Figura 22 - Polos dos planos calculados pelos três métodos plotados em projeção de igual área.....	42
Figura 23 - Gráfico das direções de mergulho processadas pelos três métodos.....	42
Figura 24 - Gráfico dos ângulos de mergulho calculados pelos três métodos em planos de difícil acesso. ....	43
Figura 25 - Gráfico do Coeficiente de correlação dos planos de difícil acesso calculados pelo método de Regressão Planar.....	43
Figura 26 - Gráfico da distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores. Com os índices de grau de ajuste (M) e confiabilidade das medidas (K) dos planos de difícil acesso computados no método Momento de Inércia. ....	43
Figura 27 - Plano 15. A) Fotografia mostra a curvatura da superfície. B) Plano 15 na nuvem de pontos com medições realizadas no programa Polyworks. ....	45
Figura 28 - Plano 16 na nuvem de pontos. A) Plano16 na nuvem de pontos identificando o aumento na malha dos pontos. B) Plano 16 na nuvem de pontos, mostrando a distância do plano à base do afloramento (D=10,14 m) e o baixo mergulho. ....	45
Figura 29 - Plano 20 na fotografia identificando a irregularidade da superfície.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - A média das direções de mergulho dos planos de fraturas medidos com bússola e calculado pelas três técnicas em graus. ....	34
Tabela 2 - Ângulos de mergulho dos planos de fraturas medidos com clinômetro e calculados com os três métodos em graus. ....	35
Tabela 3 - Direções de mergulho calculadas a partir da nuvem de pontos em planos de fratura de difícil acesso. ....	41
Tabela 4 - Ângulos de mergulho calculados em planos de difícil acesso por meio dos três métodos. ....	41



## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

2D - Bidimensional

3D - Tridimensional

3P - Três Pontos

DA - *Dip Angle*

DD - *Dip Direction*

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

GPS - *Global Positioning Position*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ILRIS - *Intelligent Laser Ranging and Imaging System*

LIDAR - *Light Detection and Ranging*

LST - *Laser Scanner Terrestre*

MDA - Modelo Digital de Afloramento

MI - Momento de Inércia

POAL - Estação GPS Porto Alegre de monitoramento contínuo

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RGB - *Red, Green, Blue*

RP - Regressão Planar

RTK - *Real Time Kinematic*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DA ORIENTAÇÃO DE PLANOS .....	26
<b>4 DISCUSSÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>
APÊNDICE A - MEDIDAS FEITAS COM BÚSSOLA E CLINÔMETRO .....	50
APÊNDICE B - DIAGRAMA DE ROSETAS DA DIREÇÃO DE MERGULHO DOS PLANOS.....	61
APÊNDICE C - HISTOGRAMAS DAS MEDIDAS DA DIREÇÃO DE MERGULHO DOS PLANOS.....	63
APÊNDICE D - HISTOGRAMAS DAS MEDIDAS DE MERGULHO DOS PLANOS .....	66
APÊNDICE E - ARTIGO CIENTÍFICO SUBMETIDO PARA IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS.....	69



## 1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais a geologia utiliza técnicas digitais de coleta de dados espaciais com melhor resolução e conseqüentemente maior exatidão na geração de modelos geológicos 3D, o que possibilita análises quantitativas mais detalhadas (BUCKLEY *et al.*, 2008). Em contrapartida, para o processamento dos dados obtidos por essas técnicas avançadas de mapeamentos digitais exige-se, cada vez mais, o desenvolvimento de novos *hardwares* e *softwares*.

O *Laser Scanner* Terrestre (LST) é uma ferramenta nova que está cada vez mais popular em estudos geomorfológicos (NAGIHARA *et al.*, 2004; SLOB *et al.*, 2005; ABELLÁN *et al.*, 2006; OLARIU *et al.*, 2008; ARMESTO *et al.*, 2009; STURZENEGGER; STEAD, 2009; NAGALLI *et al.*, 2011; PEARCE *et al.*, 2011), contudo, a sua aplicação em estudo paramétrico/geométrico de afloramentos ainda necessita de aprimoramentos. Esses aprimoramentos estão associados, diretamente, à identificação e interpretação de feições geológicas, bem como, na parametrização de estruturas em MDAs (Modelos Digitais de Afloramento) gerados, a partir, de uma densa nuvem de pontos tridimensionais. Assim, novas metodologias de interpretação geológica necessitam ser desenvolvidas aproveitando toda a potencialidade dos modelos gerados a partir do LST.

O LST é um instrumento que adquire uma grande quantidade de pontos georreferenciados por segundo (ABELLÁN *et al.*, 2006; BARCHIK *et al.*, 2007), sendo capaz de adquirir uma nuvem de pontos com espaçamento milimétrico podendo, dessa forma, ser incorporada à análise e interpretação de dados de campo (BUCKLEY *et al.*, 2008). Além disso, modelos 3D de afloramentos podem ser utilizados virtualmente com o apoio de técnicas de visualização, reduzindo custos de pesquisas e planejamento de campo, propiciando a aquisição de medidas de estruturas geológicas em áreas de difícil acesso, de forma segura (BUCKLEY *et al.*, 2010).

Nos afloramentos de difícil acesso, locais onde existe a interferência de campos magnéticos próximos a torres de transmissão e ou em depósitos de minerais magnéticos, *i.e.*, magnetita, ilmenita, pirrotita, etc., os métodos tradicionais podem ocasionar erros, dificultando e distorcendo a geração de modelos geológicos. Assim, torna-se necessário construir uma metodologia para o planejamento, a coleta e o processamento de dados para modelagem de dados geométricos de planos estruturais geológicos com o uso do LST.

Este estudo objetivou construir um modelo de levantamento de estruturas geológicas planares utilizando a técnica LIDAR. Para esse propósito três métodos foram aplicados e comparados com bússola e clinômetro, chamados: Três Pontos (3P), Regressão planar (RP) e Momento de inércia (MI) para a caracterização de feições planares a partir da nuvem de pontos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Novas tecnologias de imageamento digital e processamento de imagens têm aumentado o potencial na coleta de dados e no mapeamento de campo associado à caracterização de estruturas geológicas. Em especial, os levantamentos realizados com o LST, assim como, análises automatizadas têm se mostrado mais rápidas, com menor trabalho e, portanto, mais baratas que os métodos de aquisições tradicionais (SLOB *et al.*, 2005).

A caracterização de superfícies de afloramentos está relacionada a muitas atividades geológicas aplicadas, tais como, a análise de estabilidade de talude (SLOB *et al.*, 2005; NAGALLI *et al.*, 2011), estudos de afloramentos análogos de reservatórios de hidrocarbonetos (PRINGLE *et al.*, 2006; ENGE *et al.*, 2007; PHELPS; KERANS, 2007; KURTZMAN *et al.*, 2009; ROTEVATN *et al.*, 2009; GARCÍA-SELLÉS *et al.*, 2011) interpretações em MDAs (BALTSAVIAS *et al.*, 2001; BELLIAN *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2010; FERRARI *et al.*, 2012), estudos de rochas fraturadas (BELLIAN *et al.*, 2007; OLARIU *et al.*, 2008; JONES *et al.*, 2009; KURTZMAN *et al.*, 2009; NAGALLI *et al.*, 2011).

O LST, por possuir alta resolução na geração de nuvem de pontos tridimensionais, é eficiente na obtenção de medidas que facilitam o processo de interpretação de estruturas geológicas (BALTSAVIAS *et al.*, 2001; FABUEL-PEREZ *et al.*, 2009), assim como, medições de planos para estudos geológicos estruturais (STURZENEGGER; STEAD, 2009; NAGALLI *et al.*, 2011). Nagalli *et al.* (2011) definem uma metodologia na aplicação da técnica *LIDAR* no estudo da estabilidade de taludes e Sturzenegger e Stead (2009) fazem um estudo comparativo entre os métodos tradicionais (bússola e clinômetro), o LST e a Fotogrametria na caracterização de descontinuidades em cortes de rochas.

As desvantagens inerentes aos métodos tradicionais, e.g., bússola e clinômetro, usados nas medidas de campo, possuem grande impacto na quantificação e na qualificação de dados de fraturas e podem afetar o entendimento do comportamento das rochas (FENG, 2001). A face da rocha de interesse pode estar fisicamente inacessível ou colocar o profissional em situação de risco (Figura 1). Os métodos com operações manuais consomem muito tempo, o profissional precisa determinar a melhor posição da bússola, fazer as medidas e tomar notas na caderneta de campo. Portanto, é difícil adquirir uma grande quantidade de medidas em curtos períodos de tempo. As medidas são adquiridas, de modo subjetivo, porque a fratura é, num primeiro momento, observada e interpretada, e em um segundo momento é feita a medida de acordo com o conhecimento geológico do profissional (FENG, 2001). As discrepâncias nas medidas feitas na direção de mergulho de planos com baixos ângulo de mergulho pode exceder aos 20 graus mesmo que o profissional refaça a medida no mesmo local (HERDA, 1999).

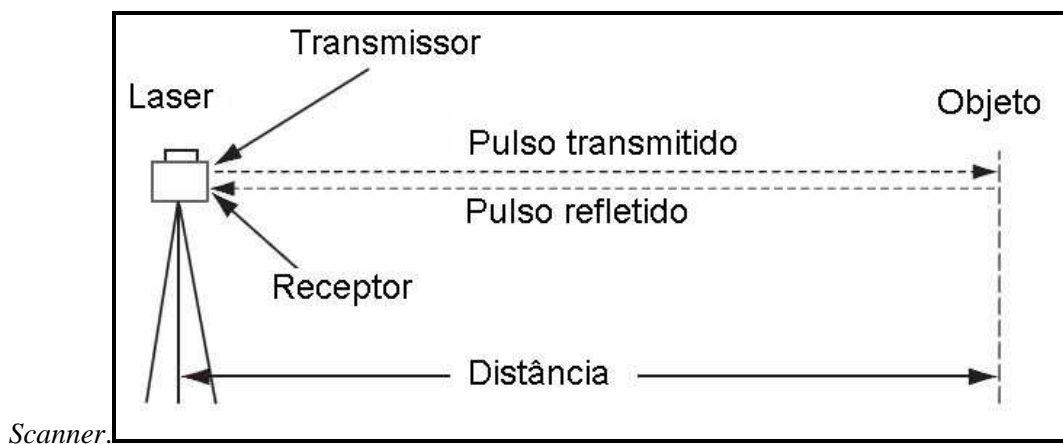
Figura 1- Dificuldades nas medições com bússola em plano de difícil acesso.



Fonte: elaborado pelo autor.

O LST está baseado na emissão de um pulso de energia que é refletido pelo objeto (Figura 2). O pulso refletido retorna ao equipamento sendo identificado por um sensor. O tempo de viagem do pulso entre a transmissão e a recepção é medido. O produto da metade do tempo e a velocidade do pulso (velocidade da luz) fornece a distância entre o LST e o objeto. Essa distância associada com as componentes angulares, verticais e horizontais do *laser*, possibilita a obtenção das coordenadas 3D de um ponto.

Figura 2 - Princípio de funcionamento do *Laser*



Fonte: adaptado de Petrie e Toth (2009).

As aquisições de nuvens de pontos com o LST são rápidas e alguns sistemas são capazes de adquirir milhares de pontos por segundo. Tornou-se comum nos equipamentos LST o acoplamento de

uma câmera digital que possibilita gerar modelos digitais de imagens de alta resolução com textura (BALTSAVIAS *et al.*, 2001; BELLIAN *et al.*, 2005; BUCKLEY *et al.*, 2008; FABUEL-PEREZ *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2010; GARCÍA-SELLÉS *et al.*, 2011; FERRARI *et al.*, 2012). Assim, o LST possibilita a geração de pontos tridimensionais com medidas de intensidade do pulso de retorno do *laser* e cores RGB (*Red-Green-Blue*). A medida de intensidade é variável de acordo com a superfície do material e o comprimento de onda do *laser* do equipamento utilizado (BUCKLEY *et al.*, 2008).

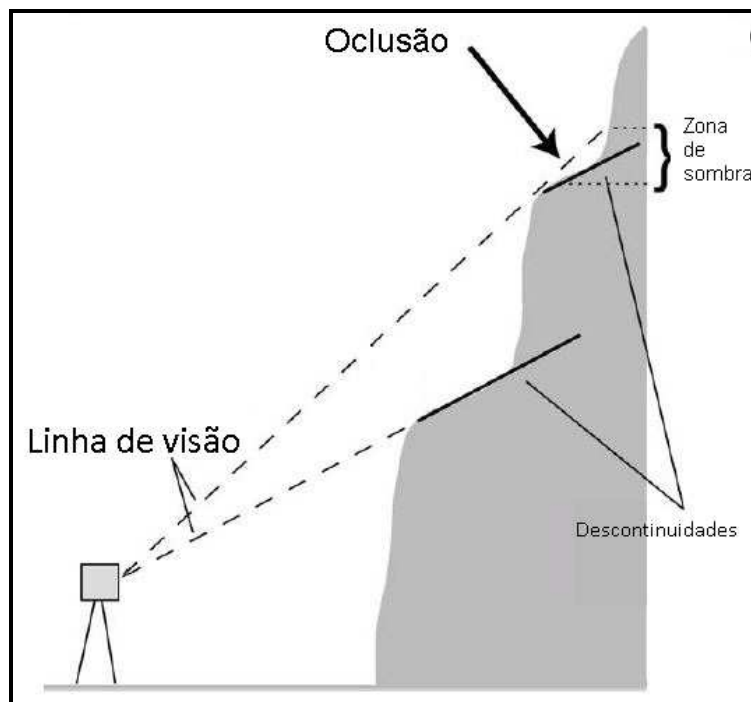
O somatório de diversas medidas individuais fornece uma nuvem de pontos tridimensional. Alguns LST, como o ILRIS – da OPTECH, podem fornecer medidas do primeiro e do segundo pulso de retorno, *i.e.*, parte do feixe emitido atinge e é refletido no objeto mais próximo, enquanto que, parte é refletido nos objetos mais distantes.

O imageamento de uma única estação do LST gera uma nuvem de pontos no sistema de coordenadas cartesianas com a origem no centro geométrico do equipamento. Com o auxílio de uma rede geodésica a nuvem de pontos pode ser georreferenciada utilizando um sistema GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) com receptores GPS - RTK (*Real Time Kinematic*).

A resolução é um elemento de fundamental importância no planejamento de um imageamento com a técnica LIDAR. Levando em conta as restrições de tempo e de capacidade de armazenamento de dados, é melhor adquirir os dados em resoluções maiores do que o estudo necessita (BUCKLEY *et al.*, 2008). Esses dados poderão ser úteis no futuro tanto com o aumento da capacidade de processamento como para utilização em novas aplicações.

Durante o imageamento com o LST, sempre que for necessário mais do que uma estação, existe a necessidade de uma sobreposição entre as diferentes cenas para minimizar problemas de sombreamento e para facilitar a unificação das nuvens de pontos durante o processamento. É sugerido que as cenas sejam sobrepostas em no mínimo 10% para garantir o alinhamento adequado entre as nuvens de pontos (BELLIAN *et al.*, 2005; FERRARI *et al.*, 2012). Outro ponto importante a ser levado em conta em um levantamento LST é o fenômeno de oclusão (STURZENEGGER; STEAD, 2009). A oclusão ocorre quando, por motivos de saliências, a face da rocha não é amostrada (Figura 3). Para dirimir esse problema o levantamento deve ser feito por diferentes perspectivas. Dessa forma, uma atenção especial é necessária, principalmente em estudos geomorfológicos, com a definição da posição e do número de estações LST. Essas decisões evitaram possíveis falhas na nuvem de pontos que possam dificultar ou inviabilizar análises futuras (NAGALLI *et al.*, 2011).

Figura 3 - Oclusão causada por saliência no afloramento.



Fonte: adaptado de Sturzenegger e Stead (2009).

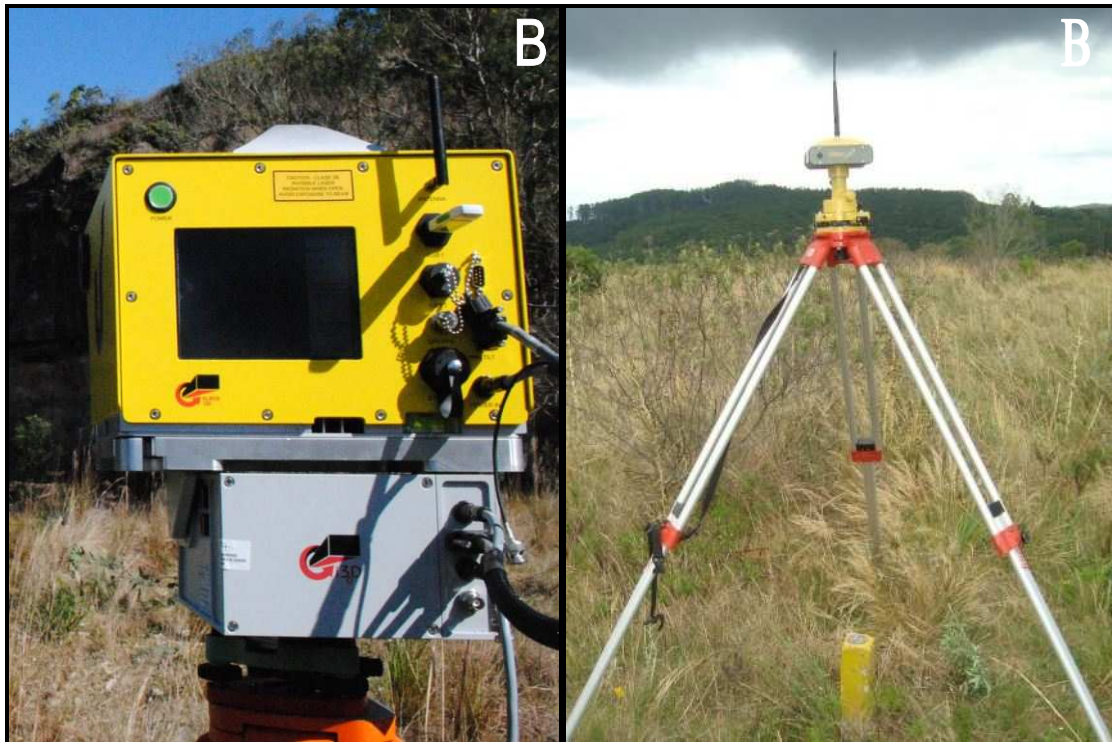
Um grande diferencial do uso da técnica LIDAR é a realização da análise das estruturas geológicas em diversas perspectivas (STURZENEGGER; STEAD, 2009). Operações de aproximação e rotação permitem a identificação de detalhes de estruturas geológicas que, muitas vezes, são imperceptíveis em atividade de campo ou em imagens estáticas, *e.g.*, fotografias. Para isso, programas de manipulação de imagens de informações advindas de um LST são fundamentais (NAGALLI *et al.*, 2011). A nuvem de pontos unificada pode ser utilizada, também, para produzir um MDA. A construção do MDA pode ser por meio de superfícies geradas por triângulos irregulares propiciando uma interpolação espacial (SLOB *et al.*, 2005). Alguns programas foram desenvolvidos especialmente para análise de descontinuidades geológicas como, por exemplo, Cocone, Points2Polys, Split Engineering, Coltop 3D. Esses programas, além de construir malhas triangulares, possuem a funcionalidade de plotar os polos dos planos em estereograma.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados para esse trabalho os equipamentos: *Laser Scanner 3D* terrestre ILRIS – da OPTECH (Figura 4A), Receptor GPS de dupla frequência Topcon Modelo Hiper Lite RTK Plus (Figura 4B) e bússola com clinômetro. Foram utilizados: o programa PARSEER do fabricante do LST, planilha de cálculo EXCEL, programa matemático de código aberto SCILAB, programa para construção de estereogramas de código aberto OPENSTEREO e o programa de manipulação de nuvens de pontos POLYWORKS.

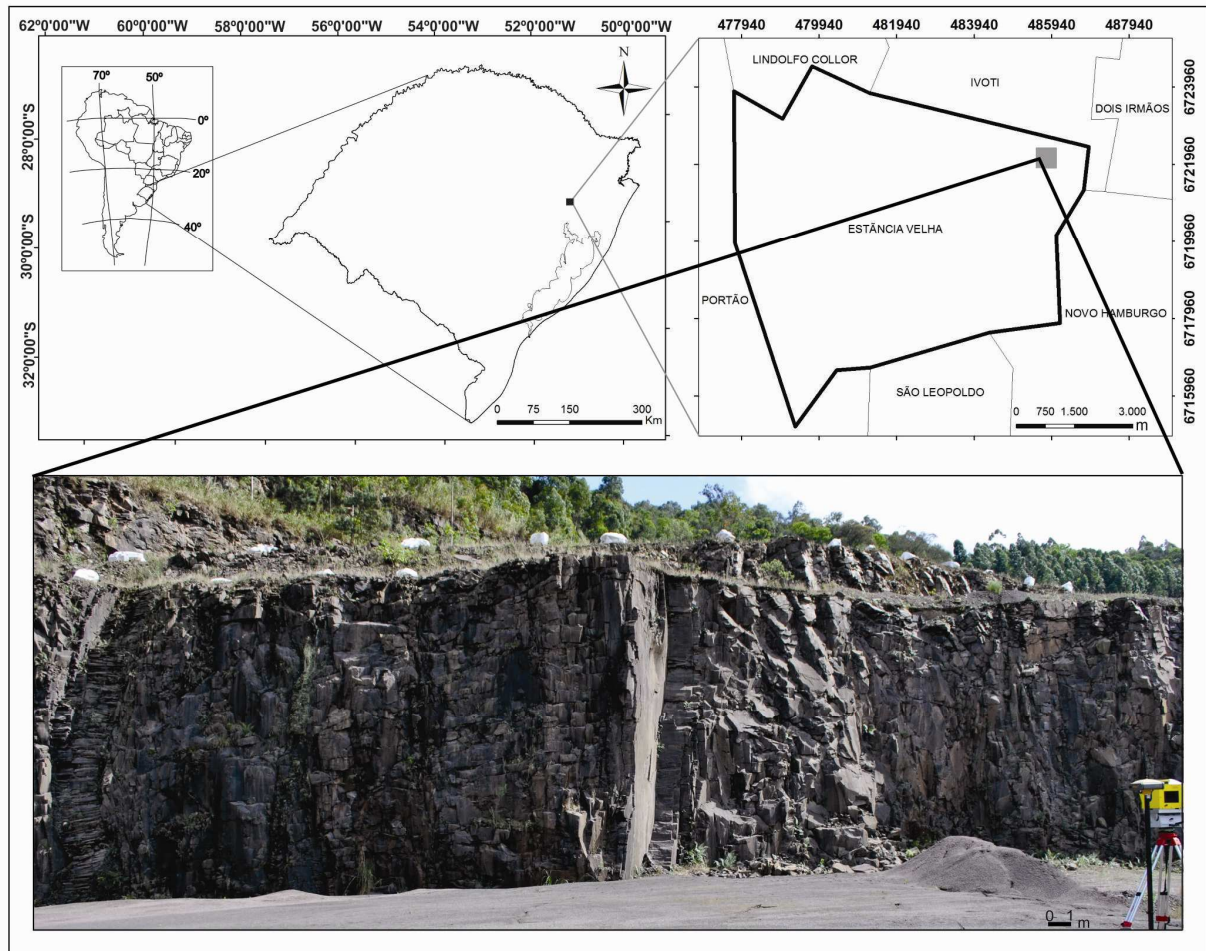
Figura 4 - Equipamentos. A) *Laser Scanner 3D* Terrestre ILRIS. B) Receptor GPS - Topcon Modelo Hiper Lite RTK.



Fonte: elaborado pelo autor.

O estudo foi realizado em uma pedreira de basalto (Incopel – Indústria e Comércio de Pedras Britadas Ltda.), localizada no município de Estância Velha no estado do Rio Grande do Sul (UTM E=485685 m; UTM N=6722017 m; Zona 22S, SIRGAS2000), conforme Figura 5.

Figura 5 - Localização da área de estudo. Pedreira de basalto (UTM E=485685 m; UTM N=6722017 m; Zona 22S, SIRGAS2000).



Fonte: elaborado pelo autor.

A pedreira está posicionada no primeiro derrame basáltico da borda sul da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná. A parede da pedreira é formada por um derrame basáltico de aproximadamente 40 metros de espessura localizado em um vale entre duas dunas eólicas de grande porte da Formação Botucatu (FRANK, 2008). Sobreposta a essas rochas vulcânicas formou-se uma duna interderrames com até 27 metros de espessura, levemente encoberta por pequenos derrames originários do norte (FRANK, 2008).

O método foi dividido em três etapas distintas: medições feitas com bússola e clinômetro, levantamento com LST e processamento dos dados.

Na primeira etapa os planos selecionados receberam um rótulo e foram fotografados, conforme Figura 6. As medidas de orientação dos planos foram feitas com a utilização de bússola tipo Brunton com declinação zero e realizadas por três estudantes com diferentes graus de experiência, classificados como: experiente, média experiência e inexperiente. Realizado, para cada plano, 10 medidas de direção de mergulho e 10 medidas de mergulho para cada estudante, trocando o estudante a cada medida,

totalizando 60 medidas por plano. Para um total de 10 planos, foram feitas 600 medidas e 42 horas/profissional de trabalho de campo.

Figura 6 - Etapa de seleção e marcação dos planos. A) Plano 9 marcado em verde. B) Plano 5 marcado em amarelo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a etapa de coleta de dados, primeiramente, foi necessário definir, para o transporte de coordenadas, um ponto de referência próximo ao afloramento. Nesse local foi realizado um rastreamento durante 2 horas com o GPS Topcon Modelo Hiper Lite RTK Plus. O ponto de referência foi ajustado pelo método dos Mínimos Quadrados com o auxílio dos pontos de controle das estações de monitoramento contínuo da UNISINOS e da cidade de Porto Alegre (POAL), este último faz parte da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). O nível de exatidão das coordenadas obtidas ficou menor do que 0,01 metros.

Com o auxílio do GPS RTK *Rover* posicionou-se duas estações para o levantamento com o LST. Os escaneamentos foram realizados com uma malha de 20 milímetros e distância média de 33 metros do afloramento. O levantamento dos pontos com GPS e o escaneamento da pedra consumiu 8 horas/profissional de trabalho de campo.

Na etapa de processamento dos dados foi necessário corrigir a declinação magnética e a convergência meridiana dos dados de bússola, calculado a média, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para cada plano medido. Os arquivos naturais do *Laser Scanner* ILRIS foram convertidos por meio do programa Parser do próprio fabricante para o formato *PIF* e manipulados no programa Polyworks.

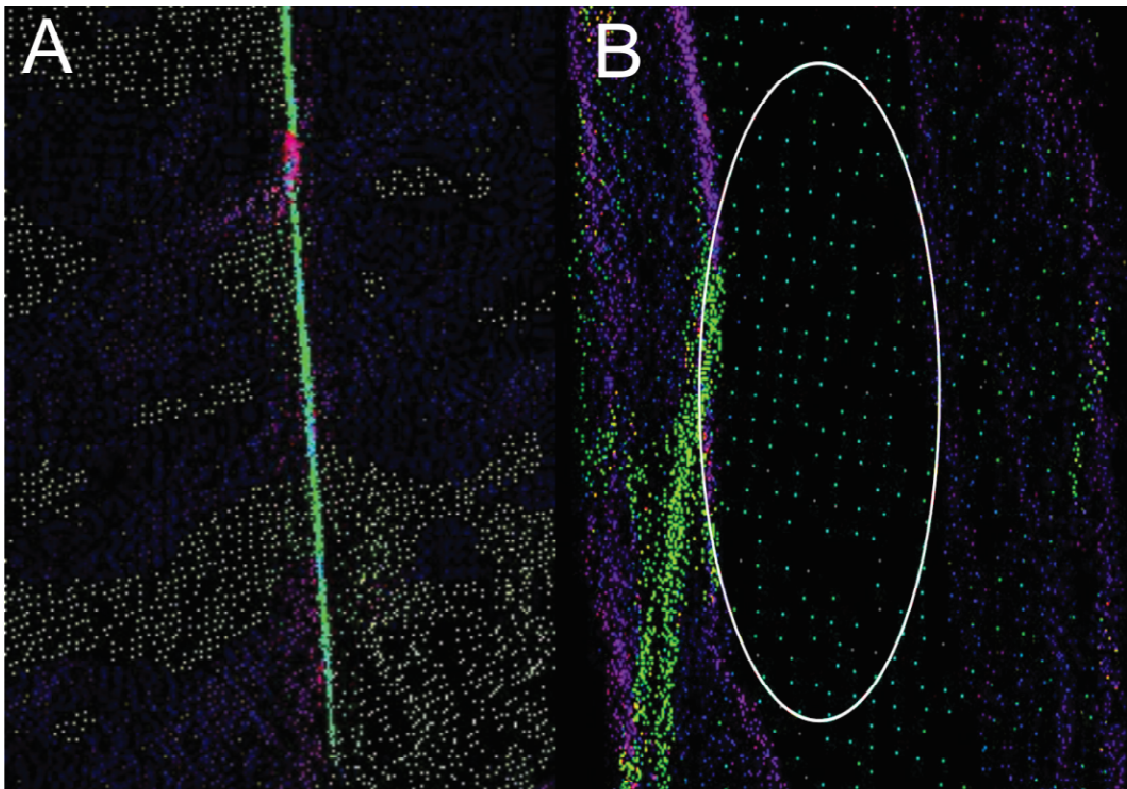
As nuvens de pontos geradas pelo LST precisaram ser unificadas e georreferenciadas. Para isso foi utilizado o IMAAlign - módulo de alinhamento do Polyworks. Com as coordenadas planas na projeção UTM - datum SIRGAS2000 da estação base e das estações de levantamento LST foi criado



um arquivo de texto para a importação no módulo IMAAlign. As nuvens, nesse módulo, foram movidas para suas estações corretas e alinhadas.

Com a nuvem de pontos unificada e georreferenciada é possível identificar os planos de fraturas. Um método para encontrar planos na nuvem de pontos é de rotacionar o modelo 3D (NAGALLI *et al.*, 2011). Um exemplo para evidenciar um plano pode ser ilustrado na Figura 7. Na Figura 7A o plano fica evidenciado pela maior densidade de pontos formando uma linha e em 7B a nuvem é rotacionada e o plano fica evidenciado na regularidade da distância entre os pontos.

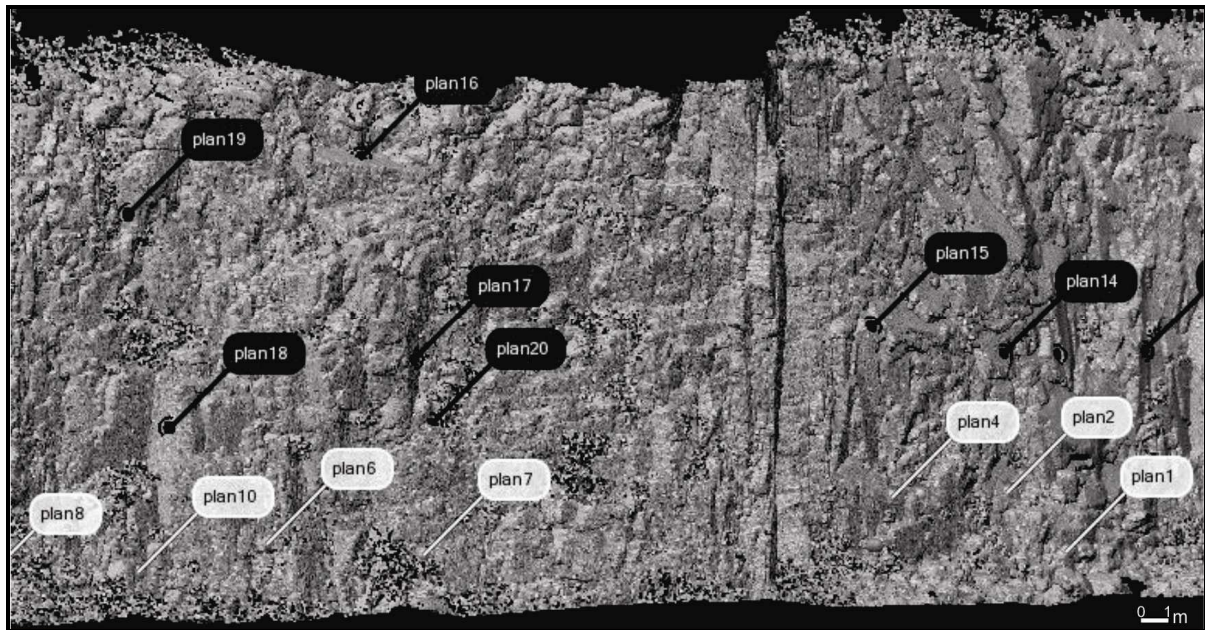
Figura 7 - Identificação de planos na nuvem de pontos. A) O plano fica evidenciado pela maior densidade de pontos formando uma linha. B) O plano fica evidenciado pela regularidade da distância entre os pontos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os planos são identificados e marcados diretamente na nuvem de pontos, conforme Figura 8.

Figura 8 - Seleção dos planos na nuvem de pontos. Os planos marcados em branco são planos medidos com bússola e clinômetro e computadas as orientações com três técnicas: Três Pontos, Regressão Planar e Momento de Inércia. Os planos em preto, planos de difícil acesso, foram computados com as três técnicas.

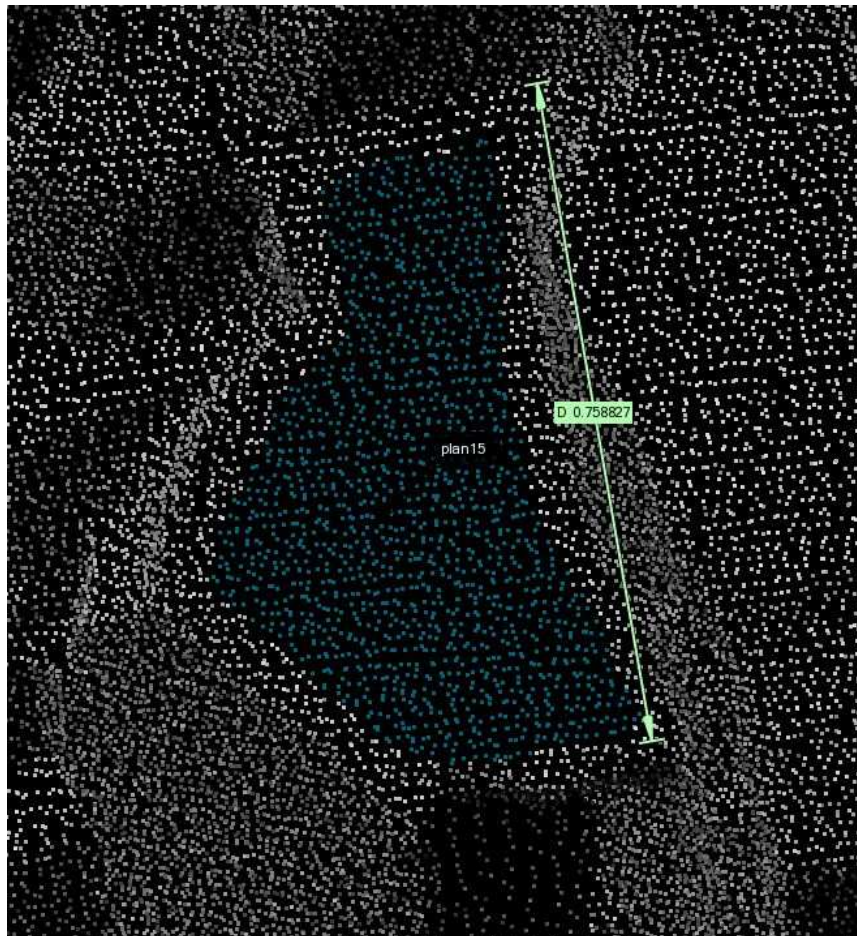


Fonte: elaborado pelo autor.

Realizado na nuvem de pontos duas seleções: a seleção de três pontos visualmente mais representativos de cada plano. Para dirimir possíveis problemas de rugosidade dos planos é indicado selecionar os pontos o mais distante possível (NAGALLI *et al.*, 2011). Para essa metodologia o conhecimento de campo auxilia a seleção dos pontos que são mais representativos do plano de fratura e dirime a subjetividade da seleção. A segunda seleção é a do maior número de pontos visualmente mais representativos de cada plano. As seleções são feitas no módulo INSpect do programa Polyworks, conforme Figura 9. Selecionados, além dos planos medidos com bússola e clinômetro, outros 10 planos de difícil acesso, numerados de 11 à 20, para efetuar os cálculos das orientações.



Figura 9 - Seleção de pontos no módulo IMInspect do programa Polyworks. As medidas na figura estão em metros e foram realizadas com as ferramentas de medidas do programa.



Fonte: elaborado pelo autor.

As seleções foram exportadas para arquivos em formato texto com as coordenadas UTM-SIRGAS2000 dos pontos para cálculo da atitude dos planos com o auxílio da planilha de cálculo Excel e do programa de matemática Scilab.

### 3.1 MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DA ORIENTAÇÃO DE PLANOS

Foram identificados na literatura três métodos diferentes para o processamento da orientação de planos a partir da nuvem de pontos (FENG, 2001; FERNÁNDEZ, 2005; KWONG *et al.*, 2007; NAGALLI *et al.*, 2011). Um desses métodos é selecionar três pontos na nuvem de pontos georreferenciada e calcular a direção de mergulho e o mergulho com o auxílio de ferramentas da geometria analítica (NAGALLI *et al.*, 2011). Nesse método assume-se que a superfície em estudo é

plana e que os três pontos selecionados não são colineares, calcula-se o produto vetorial dos vetores entre os pontos. O vetor resultante é o vetor normal ao plano.

Outro método consiste em encontrar o eixo de máximo momento de inércia, polo do plano de melhor ajuste, estimando o momento de inércia de um conjunto de nós (FERNÁNDEZ, 2005). Assume-se que, para estimar o momento de inércia de um conjunto de pontos, o plano de melhor ajuste passa pelo ponto de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  médios  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , o centro de massa dos nós. A partir do cálculo dos vetores que unem o centro de massa com cada nó é construída a matriz orientação T:

$$T = \begin{bmatrix} \sum l_i^2 & \sum l_i m_i & \sum l_i n_i \\ \sum m_i l_i & \sum m_i^2 & \sum m_i n_i \\ \sum n_i l_i & \sum n_i m_i & \sum n_i^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

São encontrados, a partir da matriz simétrica T, os autovetores  $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3)$  e os correspondentes autovalores  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  (WOODCOCK, 1977). O autovetor  $\mathbf{v}_1$  está associado com a orientação de máxima densidade de vetores. O autovetor  $\mathbf{v}_3$  está associado à mínima densidade de vetores, o maior momento de inércia e, portanto, o polo de melhor ajuste do plano.

Embora as medições dos parâmetros de fraturas possam ser quantificadas em ângulos conforme os conceitos da geometria analítica, alguns cuidados precisam ser tomados para o mapeamento de fraturas nos estudos geológicos. Para esse fim alguns pressupostos precisam ser declarados: adota-se o sistema de coordenadas cartesianas onde o eixo Y positivo indica o norte verdadeiro, o eixo X positivo aponta para o leste, eixos X-Y correspondem ao plano horizontal e eixo Z positivo aponta para cima (KWONG *et al.*, 2007). Feng (2001) e Kwong *et al.* (2007) utilizam o método chamado de Regressão Planar para calcular a orientação de planos por meio de pontos. A equação do plano de melhor ajuste é expressa pela regressão planar:

$$Z = b_0 + b_1 X + b_2 Y \quad (2)$$

Para encontrar os coeficientes  $b_0, b_1, b_2$  de um número  $n$  de pontos capturados é construída a expressão abaixo:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde  $x_i, y_i, z_i$  são as coordenadas dos pontos selecionados do plano de fratura. Os coeficientes  $(b_0, b_1, b_2)$  podem ser encontrados tanto por teorema de Cramer quanto por eliminação gaussiana. De acordo com os coeficientes encontrados são determinados a direção de mergulho e o mergulho.

Se o determinante da matriz for zero ou o plano de fratura é vertical ou os pontos selecionados para o cálculo do plano são colineares. Para o primeiro caso, no qual o plano é vertical, *i.e.*, ângulo de mergulho igual a 90 graus, a equação 2 pode ser declinada para uma equação de uma linha, como expresso abaixo:

$$Y = a + bX \quad (4)$$

Os coeficientes de  $a$  e  $b$  podem ser obtidos pela expressão:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dois casos precisam ser observados nessa solução. Se o determinante da matriz da equação 5 for igual a zero a linha é paralela ao eixo  $Y$  e a direção de mergulho ou será de 90 graus ou de 270 graus. Se o determinando da matriz da equação 5 for diferente de zero e  $b$  maior ou igual a zero a linha de melhor ajuste pode ser determinada e usada para encontrar o ângulo de DM (direção de mergulho) do plano (KWONG *et al.*, 2007), conforme equação abaixo:

$$DM = 180^\circ - \tan^{-1}(b) \left( \frac{180^\circ}{\pi} \right) \text{ ou } DM = 360^\circ - \tan^{-1}(b) \left( \frac{180^\circ}{\pi} \right) \quad (6)$$

Se o determinante da equação 5 for diferente de zero e  $b$  for menor do que zero, *i.e.*, o plano possui mergulho negativo, para encontrar a direção de mergulho a equação 6 precisa ser alterada, conforme equação abaixo:

$$DM = -\tan^{-1}(b) \left( \frac{180^\circ}{\pi} \right) \text{ ou } DM = 180^\circ - \tan^{-1}(b) \left( \frac{180^\circ}{\pi} \right) \quad (7)$$

No entanto, se o determinante da matriz da equação 3 não for zero, o plano da fratura pode ser ou paralelo ao plano horizontal ou pode ser inclinado e a comparação entre as equações 2 e 3 é usada para encontrar a direção de mergulho e o mergulho.

O ângulo entre o plano de fratura e o plano horizontal (plano  $X$ - $Y$ ) é o mergulho. O mergulho  $M$  é determinado pelo produto interno do vetor unitário  $k$  (0,0,1) e o vetor normal ao plano de fratura  $n$  ( $b_1, b_2, -1$ ):

$$K \bullet n = |k||n| \cos \beta \quad (8)$$

$$\frac{K \bullet n}{|k||n|} = \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \quad (9) \quad \text{Onde: } \beta$$

é o mergulho do plano de fratura.

A direção de mergulho ( $DM$ ) é o ângulo entre o norte verdadeiro e o vetor componente horizontal ( $n_h$ ) do vetor normal do plano de fratura, medido no sentido horário e pode ser determinada usando o produto interno do vetor unitário de eixo  $Y$  positivo  $j(0,1,0)$  e  $n_h(b_1, b_2, 0)$ , dado pela equação:



$$j \bullet n_h = |j| |n_h| \cos \alpha \quad (10)$$

$$\frac{j \bullet n_h}{|j| |n_h|} = \cos \alpha = \frac{b_2}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}} \quad (11)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \left( \frac{b_2}{\sqrt{b_1^2 + b_2^2}} \right) \right) * \left( \frac{180}{\pi} \right) \quad (12)$$

A equação 12 retorna um valor entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  podendo ser tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário. No entanto, na definição geológica a direção de mergulho de um plano de fratura varia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  no sentido horário. Além disso, a direção de mergulho de um plano de fratura é determinada pelo vetor normal com direção para cima e o vetor normal calculado nesse método pode estar tanto para cima quanto para baixo e resultar em um erro de medida de 180 graus na direção de mergulho do plano de fratura. Para saber se o vetor normal ao plano de fratura está para cima ou para baixo e qual o quadrante que ele se encontra, são determinados os valores dos cossenos direcionais, conforme expressões abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \phi = \frac{b_1}{\pm \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \\ \cos \varphi = \frac{b_2}{\pm \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \\ \cos \kappa = \frac{-1}{\pm \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + 1}} \end{array} \right. \quad (13)$$

Os ângulos  $\phi$ ,  $\varphi$  e  $\kappa$  são os três ângulos respectivamente referentes ao eixo positivo  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . O coeficiente  $b_0$  vai parametrizar os sinais dos denominadores das equações 13, *i.e.*, o coeficiente  $b_0$  é a distância entre origem e o plano, se  $b_0$  for maior ou igual a zero os denominadores das equações 13 terão sinais negativos, no entanto, se  $b_0$  for menor do que zero os denominadores das equações 13 terão sinais positivos. Para ajustar o ângulo calculado na equação 12 e determinar a direção de mergulho correta do plano de fratura é preciso seguir as seguintes regras:

- se  $\cos \phi \geq 0$ ,  $\cos \varphi \geq 0$  e  $\cos \kappa \geq 0$ ,  $SM = \alpha$ , vetor normal para cima e quadrante: Norte-Leste;
- se  $\cos \phi \geq 0$ ,  $\cos \varphi < 0$  e  $\cos \kappa \geq 0$ ,  $SM = 180^\circ - \alpha$ , vetor normal para cima e quadrante: Sul-Leste;
- se  $\cos \phi < 0$ ,  $\cos \varphi < 0$  e  $\cos \kappa \geq 0$ ,  $SM = 180^\circ + \alpha$ , vetor normal para cima e quadrante: Sul-Oeste;
- se  $\cos \phi < 0$ ,  $\cos \varphi \geq 0$  e  $\cos \kappa \geq 0$ ,  $SM = 360^\circ - \alpha$ , vetor normal para cima e quadrante: Norte-Oeste;
- se  $\cos \phi \geq 0$ ,  $\cos \varphi \geq 0$  e  $\cos \kappa < 0$ ,  $SM = \alpha$ , vetor normal para baixo e quadrante: Norte-Leste;
- se  $\cos \phi \geq 0$ ,  $\cos \varphi < 0$  e  $\cos \kappa < 0$ ,  $SM = 180^\circ - \alpha$ , vetor normal para baixo e quadrante: Sul - Leste;

-se  $\cos\phi < 0$ ,  $\cos\psi < 0$  e  $\cos\kappa < 0$ ,  $SM = 180^\circ + \alpha$ , vetor normal para baixo e quadrante: Sul - Oeste;

-se  $\cos\phi < 0$ ,  $\cos\psi \geq 0$  e  $\cos\kappa < 0$ ,  $SM = 360^\circ - \alpha$ , vetor normal para baixo e quadrante: Norte - Oeste.

Os conceitos grau de ajuste e confiabilidade definem a qualidade das medidas de orientação produzidas a partir de pontos (FERNÁNDEZ, 2005). O grau de ajuste tem relação inversa à distância dos nós. A confiabilidade está associada à estabilidade do método.

No método de Regressão Planar o grau de ajuste do plano é encontrado por meio do coeficiente de correlação  $R^2$  que é a relação entre as variáveis (KWONG *et al.*, 2007). Os valores do coeficiente de correlação estão entre 0 e 1 e o valor 1 representa o melhor ajuste,  $R^2$  é expresso por:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum (z_i - \bar{z})(\hat{z}_i - \bar{\hat{z}}) \right]^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2 \sum (\hat{z}_i - \bar{\hat{z}})^2} \quad (14)$$

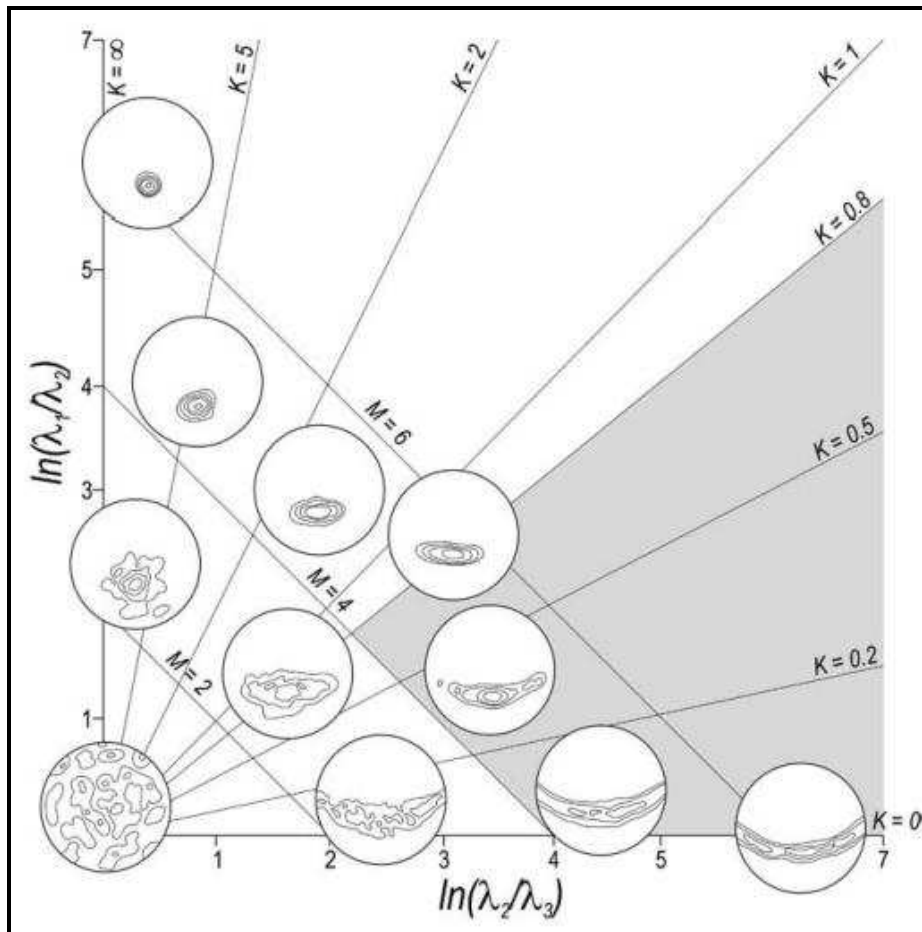
$$\hat{z}_i = b_0 + b_1(x_i - \bar{x}) + b_2(y_i - \bar{y}) \quad (15)$$

Na análise do momento de inércia o grau de ajuste e a confiabilidade podem ser obtidos pela relação entre os autovalores da matriz orientação (WOODCOCK, 1977). O grau de ajuste é definido pela relação entre o autovalor 1 ( $\lambda_1$ ) e o autovalor 3 ( $\lambda_3$ ), conforme a equação:

$$M = \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \quad (16)$$

Quanto maior for o valor de  $M$ , menor a distância entre o plano de melhor ajuste e os nós (Figura 10).

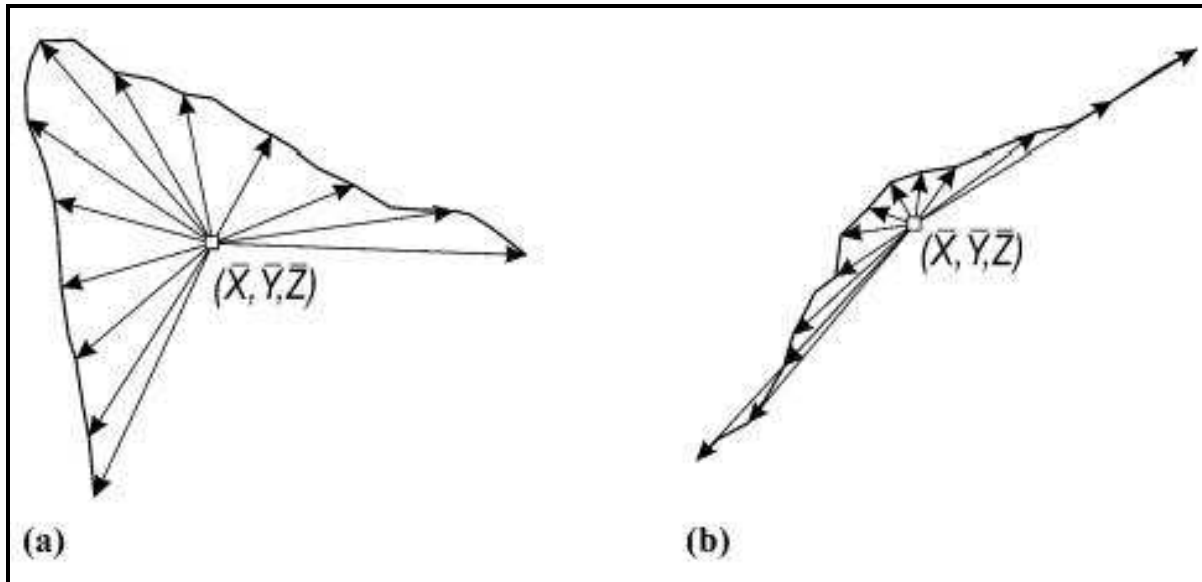
Figura 10 - Distribuição espacial dos pontos de acordo com as relações entre os autovalores no método de análise de Momento de Inércia.



Fonte: Woodcock (1977).

Contudo, não necessariamente uma boa qualidade de ajuste do plano corresponde a uma boa qualidade na orientação. Para uma confiabilidade na medida de orientação os nós precisam estar mais distantes possíveis da colinearidade e mais distantes possíveis do centro de massa. A análise do momento de inércia apresenta a vantagem de fornecer a medida quantitativa da forma do traço do afloramento e assim sua confiabilidade (FERNÁNDEZ, 2005), conforme Figura 11.

Figura 11 - A confiabilidade das medidas de orientação está condicionada à distribuição no espaço dos nós. A) Fornece uma distribuição uniforme com relação ao centro de massa. B) Mesmo tendo os vetores bem distribuídos os vetores maiores influenciam mais do que os curtos produzindo uma distribuição agrupada.



Fonte: Fernández (2005).

Os nós menos colineares que produzem uma distribuição em cinturão são os de maior confiabilidade na medida da orientação, conforme Figura 11A. A relação entre os autovalores da matriz orientação, na análise do momento de inércia, fornece o grau de colinearidade dos pontos e a confiabilidade do plano de melhor ajuste, expresso por:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right)} \quad (17) \quad \text{Bons}$$

planos de melhor ajuste produzem valores maiores do que 4 para  $M$  e valores menores do que 0,8 para  $K$  (FERNÁNDEZ, 2005). Conforme Figura 10, conjuntos de pontos que estão na área acinzentada produzem planos de melhor ajuste com confiabilidade e bom grau de adequação.

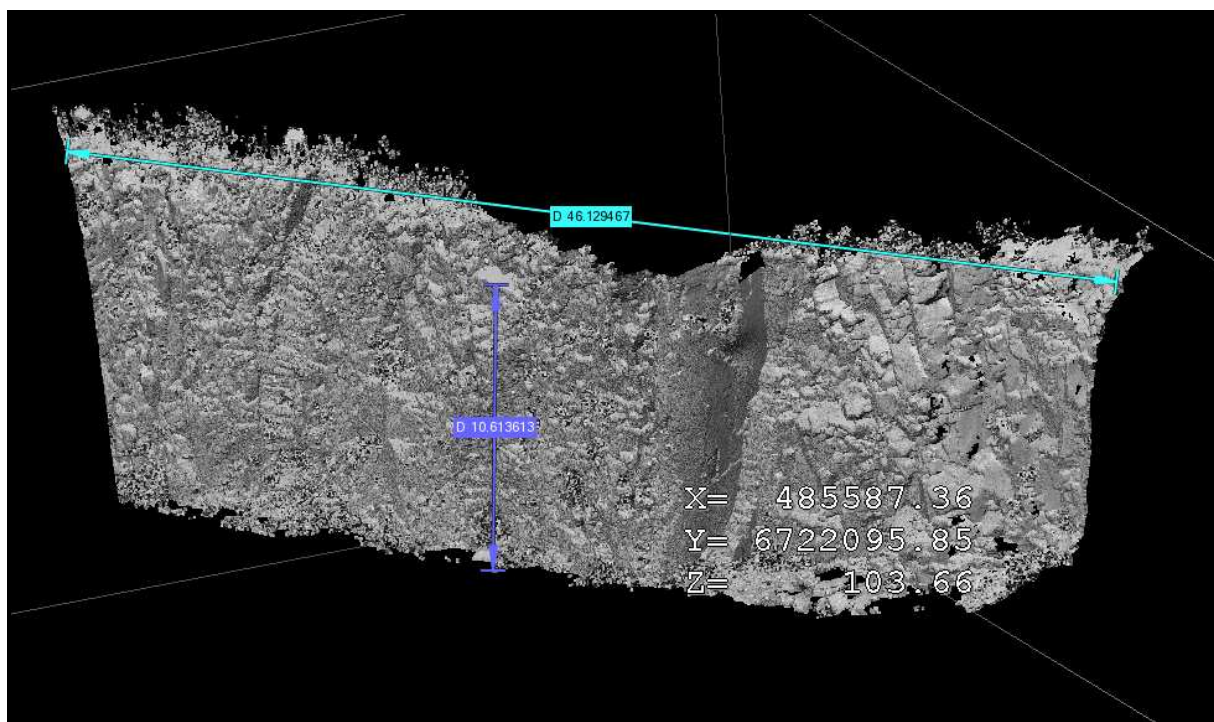
Utilizadas, para o cálculo da orientação dos planos de fratura, os três métodos supracitados: 3P (Três Pontos), MI (Momento de Inércia) e RP (Regressão Planar).

## 4 DISCUSSÃO

A análise do método está dividida em quatro etapas distintas: análise da nuvem de pontos produzida por meio da técnica LIDAR; a análise dos planos medidos com bússola e clinômetro e processados pelos três métodos: 3P (Três Pontos), MI (Momento de Inércia) e RP (Regressão Planar); a análise dos três métodos no processamento de planos de difícil acesso e, por último, a discussão e avaliação geral da metodologia utilizada.

A nuvem de pontos obtida a partir da técnica LIDAR possui um total de 6,1 milhões de pontos georreferenciados no sistema de coordenadas planas UTM-SIRGAS2000, conforme Figura 12, produzindo o primeiro resultado da técnica.

Figura 12 - Nuvem de pontos georreferenciada. Utilizado o módulo IMInspect do programa Polyworks para realizar medidas, em metros, no afloramento.



Fonte: elaborado pelo autor.

A nuvem de pontos pode ser posicionada em pontos de vista que o trabalho de campo não permite, ou por causa das dimensões do afloramento ou por motivos de segurança. Por meio das ferramentas de medidas do módulo IMInspect do programa Polyworks podem ser feitas medições precisas diretamente na nuvem de pontos.

As tabelas com todas as medidas feitas nos 10 planos com bússola e clinômetro estão no Apêndice A. Os diagramas de rosetas com a média das medidas de direção de mergulho e intervalo de confiança de 95% estão no Apêndice B. Os histogramas da direção de mergulho e mergulho dos planos medidos com bússola e clinômetro estão respectivamente nos Apêndices C e D.

A seleção dos planos foi auxiliada pelo uso das fotos dos planos etiquetados e pelo método de rotacionar a nuvem de pontos. Na tabela 1 as direções de mergulho dos planos de fratura medidos pela bússola e calculados pelas três técnicas.

Tabela 1 - A média das direções de mergulho dos planos de fraturas medidos com bússola e calculado pelas três técnicas em graus.

Planos	Bússola	Três Pontos	Momento de Inércia	Regressão Planar
1	205,44°	208,44°	207,67°	207,68°
2	131,67°	129,45°	131,23°	131,23°
3	131,64°	125,77°	129,58°	129,43°
4	136,25°	133,29°	133,88°	133,66°
5	88,05°	85,04°	85,97°	84,98°
6	122,64°	118,90°	118,60°	117,64°
7	173,20°	172,47°	174,41°	172,94°
8	172,22°	138,44°	162,59°	158,13°
9	172,90°	171,12°	175,30°	175,32°
10	133,10°	130,13°	133,01°	134,92°

Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela 2 mostra os ângulos de mergulho medidos com o clinômetro e calculadas com os três métodos.

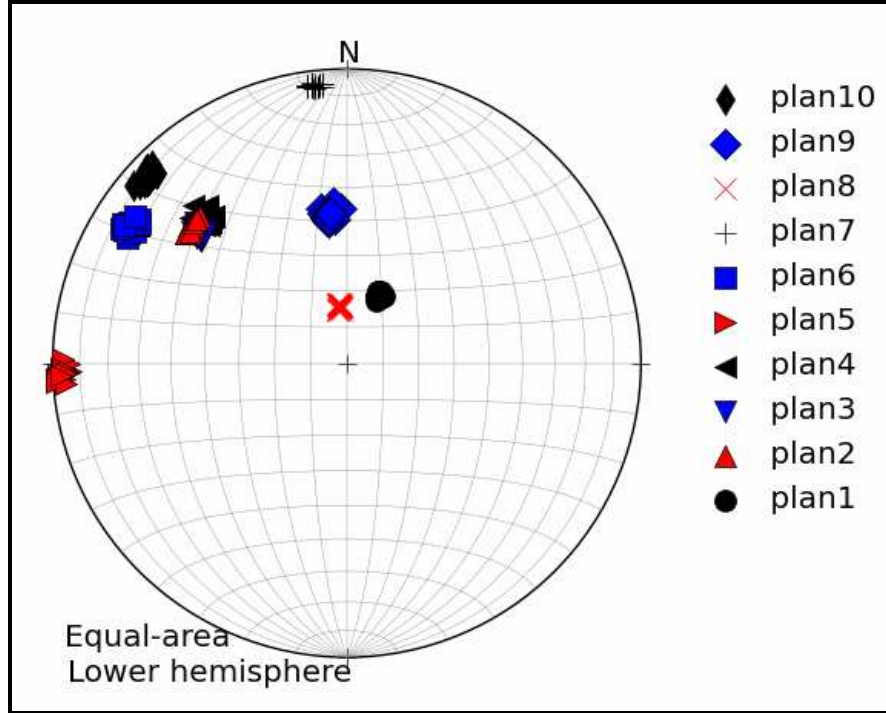
Tabela 2 - Ângulos de mergulho dos planos de fraturas medidos com clinômetro e calculados com os três métodos em graus.

Planos	Bússola	Três Pontos	Momento de Inércia	Regressão Planar
1	20,98°	23,81°	23,02°	22,93°
2	59,70°	61,76°	59,25°	58,86°
3	56,80°	53,86°	54,51°	54,37°
4	58,87°	60,51°	59,97°	59,34°
5	86,23°	86,11°	86,85°	85,58°
6	75,85°	74,16°	78,81°	69,13°
7	84,30°	89,74°	85,96°	83,82°
8	15,77°	34,24°	21,14°	16,78°
9	42,20°	47,43°	40,96°	39,58°
10	82,37°	82,82°	82,82°	78,37°

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 13 mostra os polos dos planos medidos, 30 medidas realizadas em cada plano com bússola e clinômetro, plotados na projeção estereográfica de igual área.

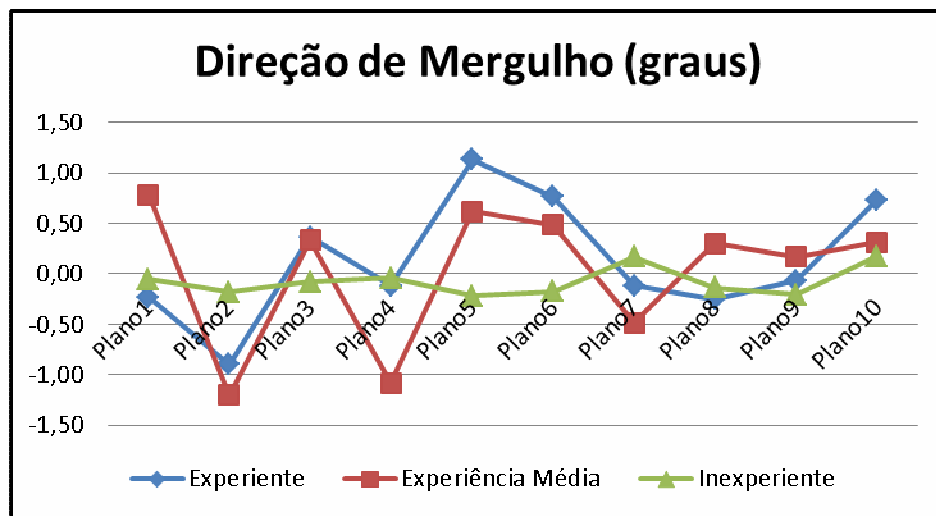
Figura 13 - Polos dos planos medidos com bússola e plotados em projeção de igual área.



Fonte: elaborado pelo autor.

Comparadas, no gráfico da Figura 14, as médias das medidas de direção de mergulho e, no gráfico da Figura 15, comparadas as médias das medidas do mergulho, com o grau de experiência dos estudantes. Verifica-se que não houve influência do grau de experiência no resultado das medidas.

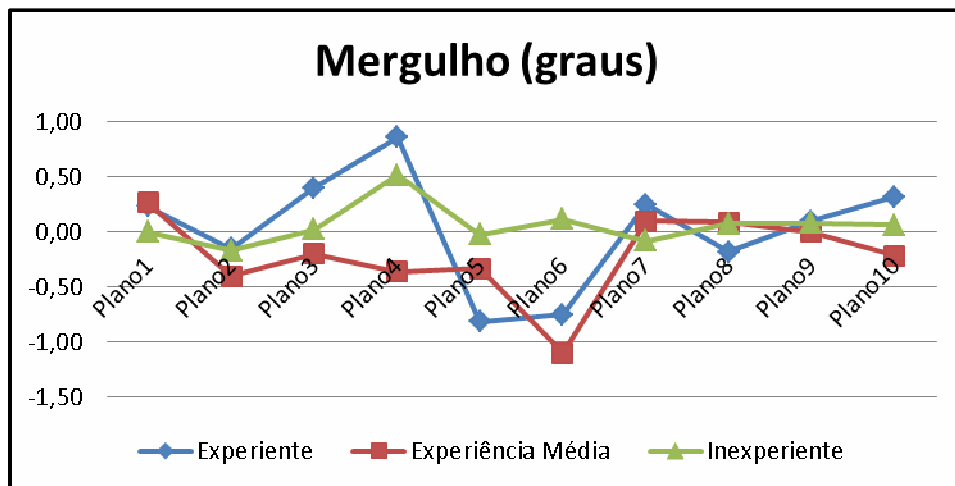
Figura 14 - Gráfico da diferença da média das medidas de direção de mergulho com o grau de experiência dos estudantes.



Fonte: elaborado pelo autor.



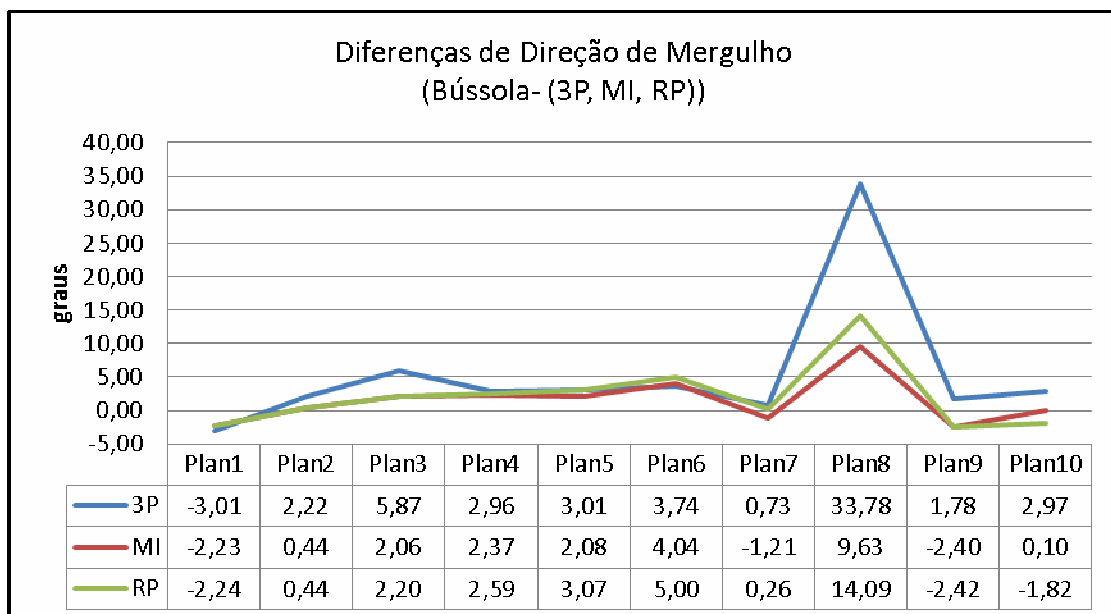
Figura 15 - Gráfico da diferença da média das medidas do mergulho com o grau de experiência dos estudantes.



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 16 compara as médias das medidas de direção de mergulho dos planos feitos com a bússola e as medidas calculadas com os três métodos: 3P (Três Pontos), MI (Momento de Inércia) e RP (Regressão Planar).

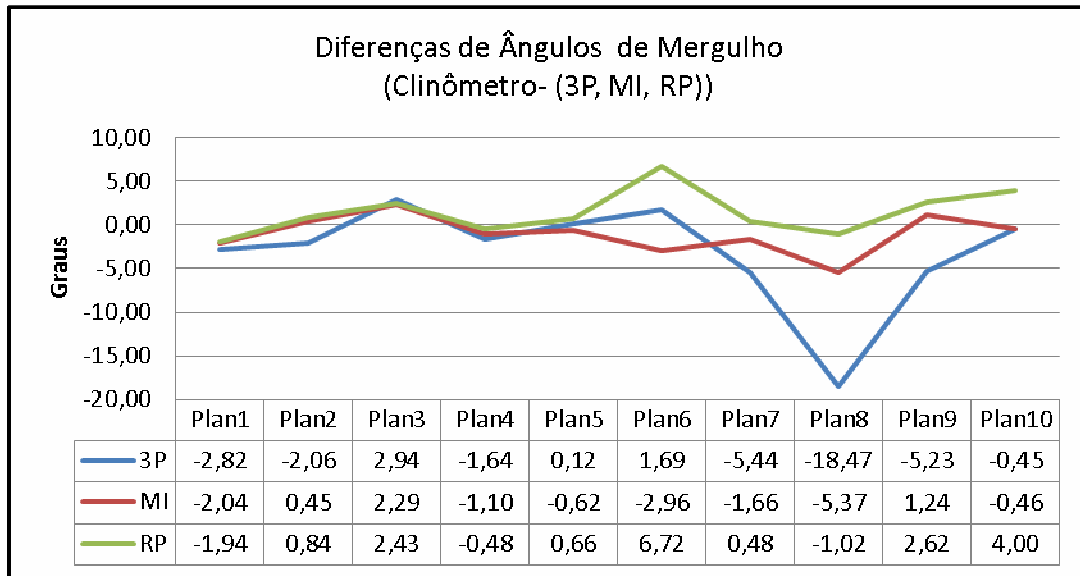
Figura 16 - Gráfico da diferença entre as médias das medidas de direção de mergulho dos 10 planos de fratura realizadas com a bússola e as três técnicas calculadas: 3P(Três Pontos), MI (Momento de Inércia) e RP (Regressão Planar).



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 17 compara as médias das medidas dos ângulos de mergulho dos planos feitos com o clinômetro e o mergulho calculado com os três métodos.

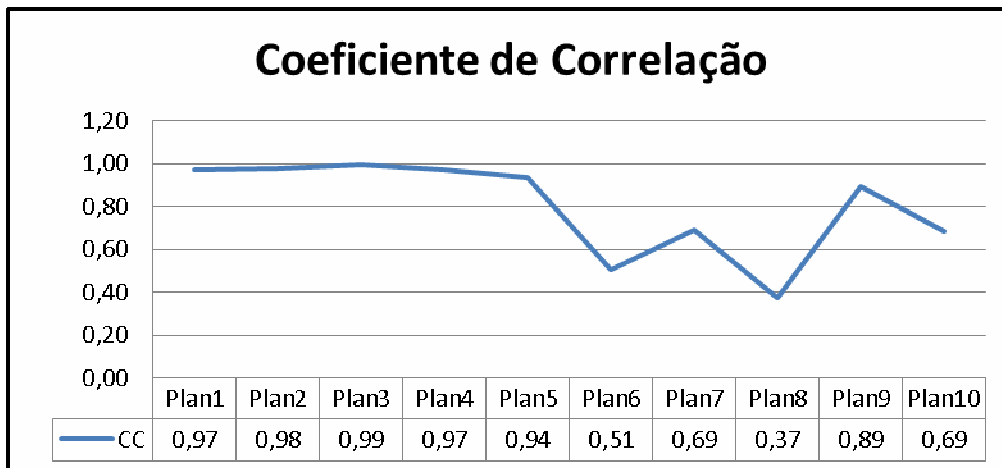
Figura 17 - Gráfico da diferença entre as médias das medidas dos ângulos de mergulho dos 10 planos de fratura realizadas com a clinômetro e as medidas calculadas pelas três técnicas: Três Pontos (3P), Momento de Inércia (MI) e Regressão Planar (RP) em graus.



Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 18 o coeficiente de correlação (grau de ajuste do plano calculado aos pontos) para os 10 planos calculados pelo método de Regressão Planar.

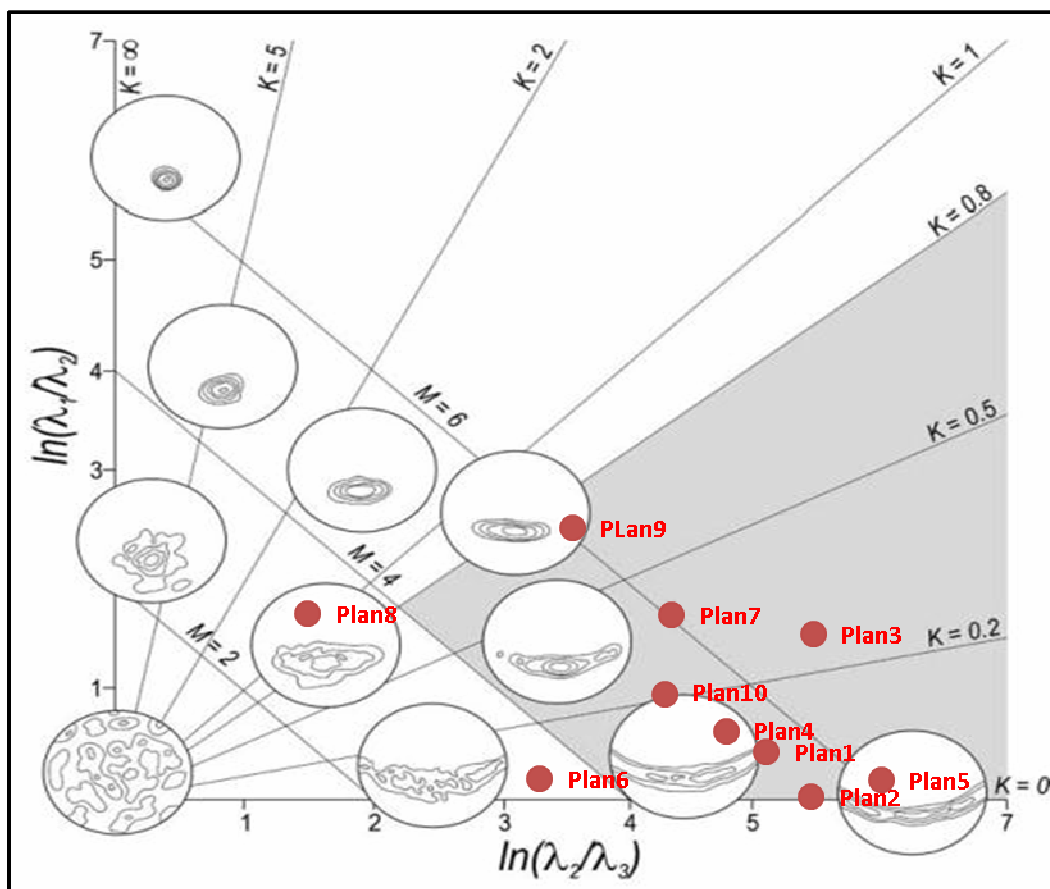
Figura 18 - Gráfico do Coeficiente de correlação (CC) dos planos calculados pelo método de Regressão Planar.



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 19 mostra a distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores dos 10 planos computados com o método de Momento de Inércia. Bons planos possuem grau de ajuste  $M > 4$  e confiabilidade  $K < 0,8$  ficando na zona sombreada do gráfico.

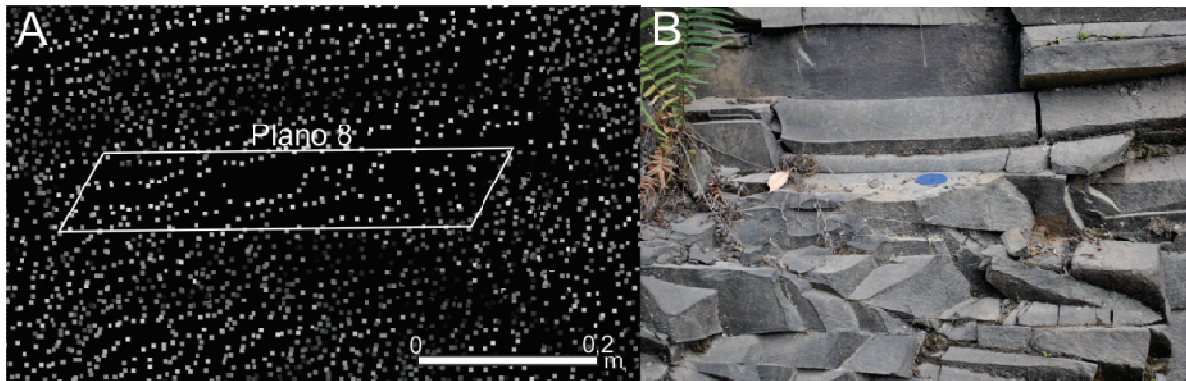
Figura 19 - Gráfico da distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores. Com os índices de grau de ajuste ( $M$ ) e confiabilidade das medidas ( $K$ ) dos planos computados no método Momento de Inércia.



Fonte: Adaptado de Woodcock (1977).

Alguns planos se destacaram nos gráficos de distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores. O plano 8, em especial, possui índices ruins em  $M$  e  $K$  no método de Momento de Inércia e  $R^2$  no método de Regressão Planar. A Figura 20A mostra o plano 8 com mais evidência na nuvem de pontos e na Figura 20B na fotografia. Verifica-se que o plano 8 está ocluído, por causa de obstáculos, para o LST resultando numa seleção de pontos que não são representativas do plano a ser medido.

Figura 20 - Oclusão do plano 8 por causa de obstáculos na visada do LST. A) Plano 8 marcado na nuvem de pontos. B) Plano 8 com marcação em azul na fotografia.



Fonte: elaborado pelo autor.

O plano 6 mostrou baixo grau de ajuste tanto no método de Regressão Planar (coeficiente de correlação) quanto no Método de Momento de Inércia (índice M). A fotografia do plano na Figura 21 evidencia a irregularidade da superfície.

Figura 21 - Plano 6 na fotografia identificando a irregularidade da superfície.



Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela 3 mostra as direções de mergulho e na tabela 4 os mergulhos dos 10 planos de difícil acesso, numerados de 11 a 20, calculados com os três métodos: Três Pontos, Momento de Inércia e Regressão Planar.

Tabela 3 - Direções de mergulho calculadas a partir da nuvem de pontos em planos de fratura de difícil acesso.

Planos	Três Pontos	Momento de Inércia	Regressão Planar
11	184,04°	183,74°	183,35°
12	116,30°	118,07°	118,00°
13	114,03°	111,79°	113,55°
14	123,54°	126,41	126,24°
15	135,37°	130,18°	133,95°
16	147,77°	142,02°	151,13°
17	114,03°	111,55°	113,35°
18	193,68°	198,20°	192,66°
19	187,38°	184,94°	187,60°
20	140,06°	138,93°	142,78°

Fonte: elaborado pelo autor.

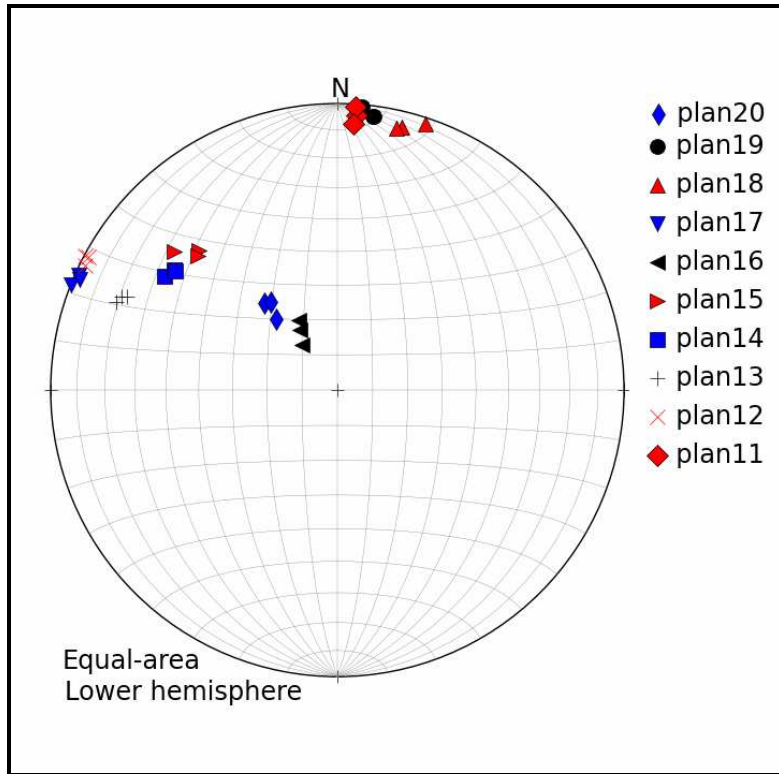
Tabela 4 - Ângulos de mergulho calculados em planos de difícil acesso por meio dos três métodos.

Planos	Três Pontos	Momento de Inércia	Regressão Planar
11	85,61°	88,90°	82,45°
12	87,81°	88,15°	89,75°
13	69,43°	72,06°	70,98°
14	61,37°	59,89°	59,50°
15	58,08°	63,76°	56,96°
16	20,19°	16,31°	22,59°
17	88,56°	89,86°	87,57°
18	83,87°	87,60°	83,10°
19	85,66°	89,29°	85,98°
20	32,53°	26,75°	31,70°

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 22 mostra os polos dos planos de difícil acesso, calculados pelos três métodos medidos: Três Pontos (3P), Momento de Inércia (MI) e Regressão Planar (RP), plotados na projeção estereográfica de igual área.

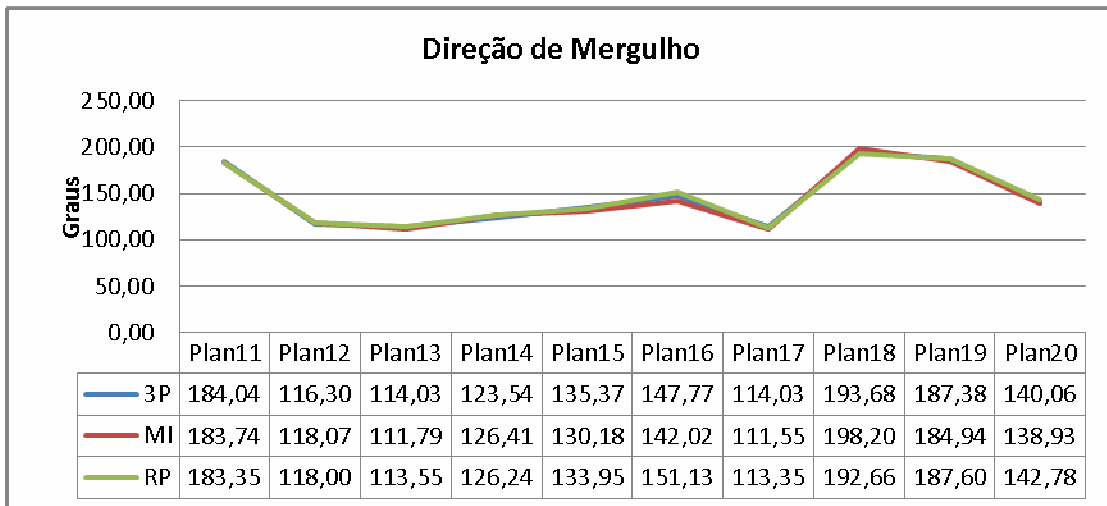
Figura 22 - Polos dos planos calculados pelos três métodos plotados em projeção de igual área.



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 23 mostra as medidas das direções de mergulho dos planos calculadas com os três métodos, em graus.

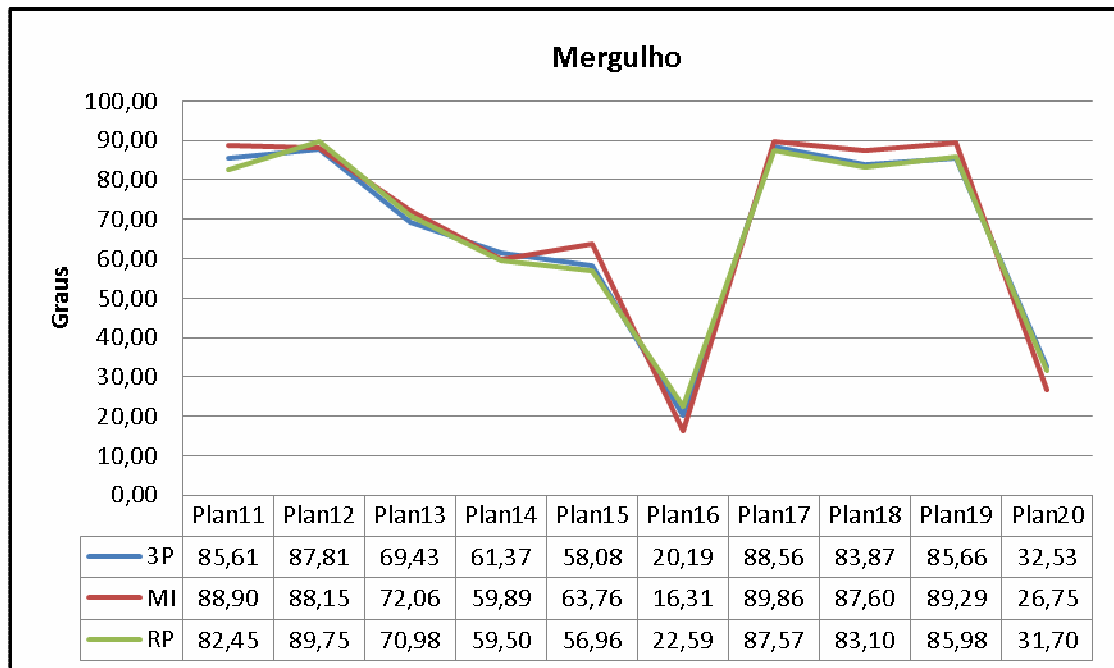
Figura 23 - Gráfico das direções de mergulho processadas pelos três métodos.



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 24 mostra os ângulos de mergulho dos planos de difícil acesso calculados com os três métodos.

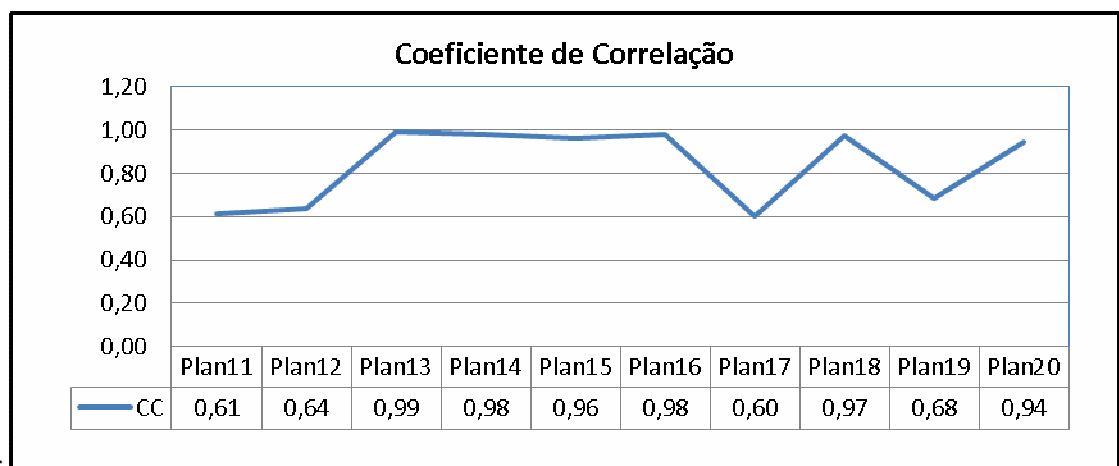
Figura 24 - Gráfico dos ângulos de mergulho calculados pelos três métodos em planos de difícil acesso.



Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 25 o coeficiente de correlação para os 10 planos de difícil acesso calculados pelo método de Regressão Planar.

Figura 25 - Gráfico do Coeficiente de correlação dos planos de difícil acesso calculados pelo método de

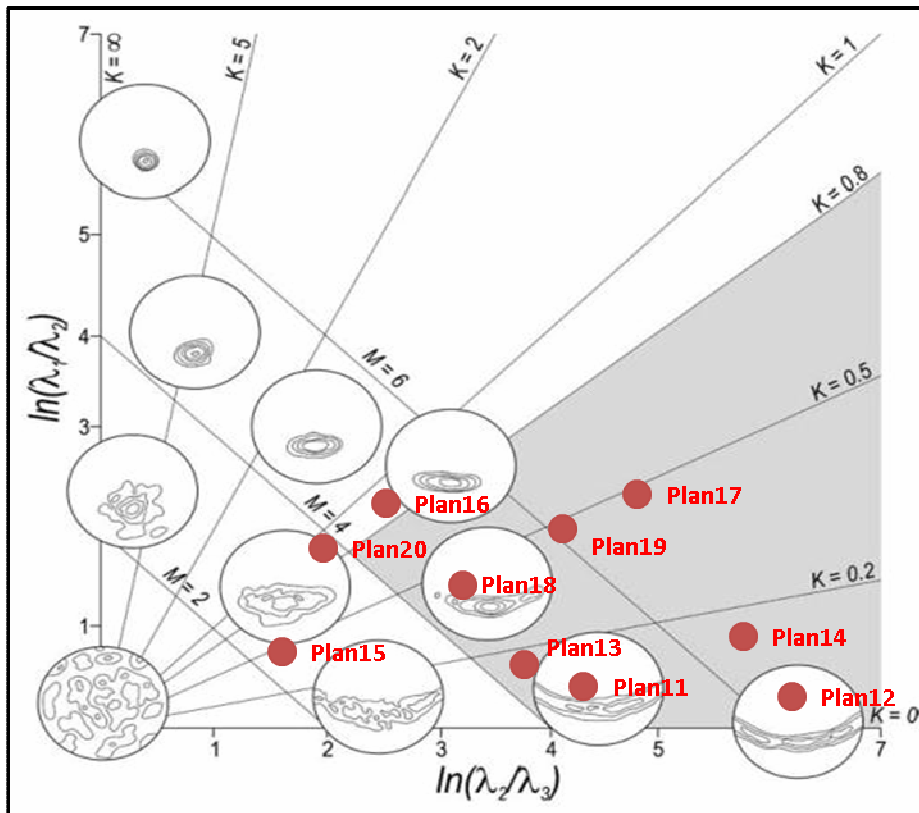


Regressão Planar.

Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 26 mostra a distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores dos 10 planos de difícil acesso computados com o método de Momento de Inércia.

Figura 26. Gráfico da distribuição espacial dos pontos de acordo com a relação entre os autovalores. Com os índices de grau de ajuste (M) e confiabilidade das medidas (K) dos planos de difícil acesso computados no método Momento de Inércia.



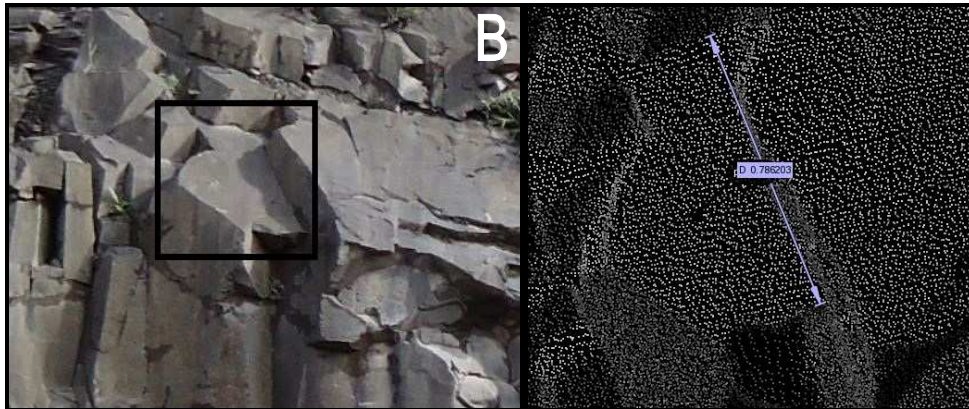
Fonte: Adaptado de Woodcock (1977).

Alguns planos de difícil acesso têm especial destaque no gráfico da Figura 26: plano 15 ( $M < 4$ ), plano 16 ( $K > 0,8$ ) e plano 20 ( $M < 4$  e  $K > 0,8$ ).

O plano 15 apresenta boa confiabilidade das medidas, no entanto, baixo grau de ajuste ( $M = 2,3$ ) dos pontos ao plano processado. A Figura 27A evidência a curvatura da superfície.



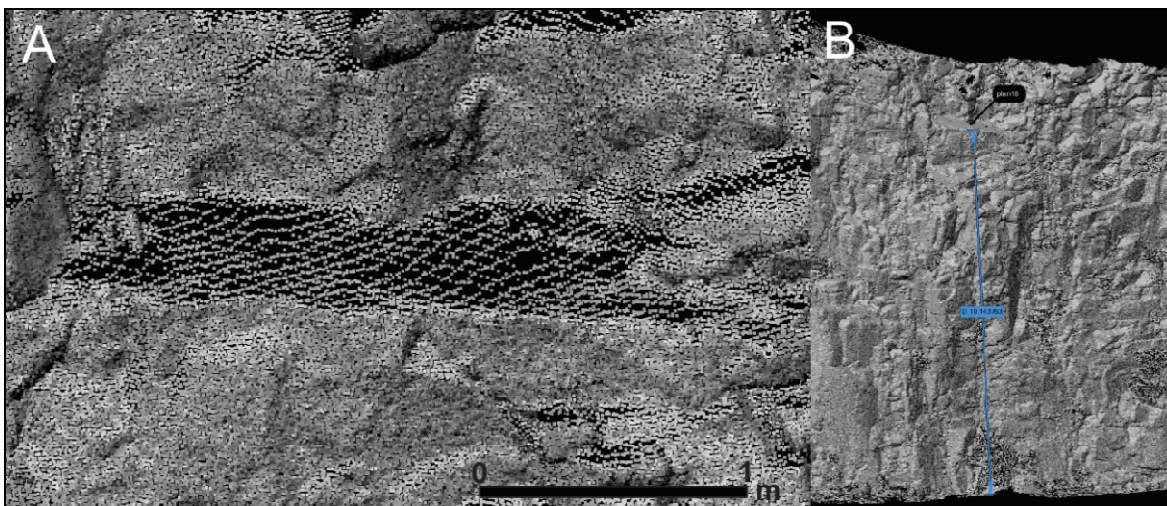
Figura 27 - Plano 15. A) Fotografia mostra a curvatura da superfície. B) Plano 15 na nuvem de pontos com medições realizadas no programa Polyworks.



Fonte: elaborado pelo autor.

O plano 16 apresentou bom grau de ajuste, no entanto, baixo grau de confiabilidade das medidas ( $k=0,89$ ). O plano 16 é um plano de baixo ângulo de mergulho e fica a 10,14 metros da base do afloramento. Verifica-se que os pontos amostrados pelo LST apresentaram malha maior do que a configurada, Figura 28A. Aconselha-se para levantamento com LST nessas situações, se possível, um afastamento maior do equipamento com relação ao afloramento.

Figura 28 - Plano 16 na nuvem de pontos. A) Plano 16 na nuvem de pontos identificando o aumento na malha dos pontos. B) Plano 16 na nuvem de pontos, mostrando a distância do plano à base do afloramento ( $D=10,14$  m) e o baixo mergulho.



Fonte: elaborado pelo autor.

O plano 20 apresentou baixo grau de ajuste e baixa confiabilidade da solução ( $M=3,67$ ,  $K=0,92$ ). Verifica-se que, conforme Figura 29, o plano 20 possui superfície irregular.

Figura 29 - Plano 20 na fotografia identificando a irregularidade da superfície.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na comparação feita entre as orientações de planos de fratura com bússola e clinômetro e os métodos: Três Pontos, Momento de Inércia e Regressão Planar, realizadas nesse estudo indicam diferenças na direção de mergulho de no máximo, 5,9 graus, 2,4 graus e 3,1 graus, respectivamente. Na comparação feita com o ângulo de mergulho as diferenças máximas encontradas foram: 5,4 graus, 2,3 graus e 4,0 graus, respectivamente.

Para comparação excluíram-se os planos que os métodos de Regressão Planar e de Momento de Inércia reconheceram como de baixo grau de ajustamento e ou baixa confiabilidade para com o plano calculado. Medidas de 8 graus e 4 graus de, respectivamente, direção de mergulho e mergulho são adequadas para a finalidade de estudos geotécnicos (STURZENEGGER; STEAD, 2009).

Neste estudo diferenças altas nas medições feitas por meio de bússola e clinômetro e as metodologias de cálculos de direção de mergulho e de mergulho refletem ou irregularidades na superfície selecionada, superfícies curvas ou falta de pontos representativos do plano por problemas de oclusão. Os métodos de Regressão Planar e Momento de Inércia mostraram-se eficientes em reconhecer o grau de ajustamento dos pontos aos planos calculados.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi estabelecer procedimentos e métodos para o cálculo da orientação de estruturas geológicas planares a partir da utilização da técnica LIDAR com três métodos de cálculos distintos: Três Pontos, Momento de Inércia e Regressão Planar. O processo abrange a aquisição de dados, seu processamento e a análise da qualidade das medidas dos planos selecionados.

O trabalho evidencia que a técnica LIDAR é uma ferramenta importante para levantamento das estruturas geológicas à distância e manutenção de registros de afloramentos. Os afloramentos podem ser consultados e analisados a *posteriori* na forma virtual. É necessário ter atenção especial com oclusões, ou por objetos antepostos às feições alvo, ou por motivo de saliências que escondem a face da rocha. Uma alternativa nesses casos é fazer o levantamento com mais de uma estação de escaneamento e ou com o LST, se possível, mais afastado do afloramento.

A técnica LIDAR permite levantamentos de estruturas geológicas planares de forma segura e precisa. Além disso, a aquisição de grandes quantidades de dados possibilita um aumento na confiabilidade das análises estruturais. De posse de dados de campo é possível identificar a compatibilidade das medições feitas por meio de bússola e clinômetro com os planos digitais calculados. Contudo, estabelecer uma técnica adequada de levantamento e georreferenciamento permite a confiabilidade da consulta dos dados.

O processamento da nuvem de pontos gerada pela técnica LIDAR realizou-se por meio de três metodologias distintas: Três Pontos, Momento de Inércia e Regressão Planar. O método de Três Pontos é rápido e simples para a medição de orientação de estruturas geológicas planares; no entanto, não possui ferramenta de análise de qualidade. Os dois métodos, Momento de Inércia e Regressão Planar, demonstram-se efetivos no cálculo da orientação de planos a partir de pontos selecionados de uma nuvem de pontos. Ambos possuem ferramenta de análise do grau de ajuste dos pontos selecionados ao plano calculado. Contudo, a análise do Momento de Inércia, além de apresentar diferenças menores nas medidas relacionadas aos métodos tradicionais, fornece a medida quantitativa da distribuição espacial dos pontos, provando ser uma ferramenta eficiente para o processamento da orientação de planos a partir de pontos. Esse trabalho mostra que adequadas metodologias de levantamento LIDAR e processamento da nuvem de pontos podem fornecer realísticas caracterizações da orientação de feições geológicas planares com grau de ajuste e confiabilidade.

## REFERÊNCIAS

- ABELLÁN, A.; VILAPLANA, J. M.; MARTÍNEZ, J. Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). **Engineering Geology**, Maryland Heights, v. 88, n. 3-4, p. 136-148, 2006. ISSN 0013-7952. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379520600247X>>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- ARMESTO, J. et al. Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes. **Geomorphology**, v. 106, n. 3-4, p. 271-277, May 15 2009. ISSN 0169-555X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000265343700011 >. Acesso em: 21 abr. 2012.
- BALTSAVIAS, E. P. et al. Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring. **Photogrammetric Record**, v. 17, n. 98, p. 243-270, Oct 2001. ISSN 0031-868X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000175775200003>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- BARCHIK, E. et al. Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS - 3D no Ramo da Mineração. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007. Florianópolis, Brasil. INPE, 21-26 abril. p. 3631-3635.
- BELLIAN, J. A.; BECK, R.; KERANS, C. Analysis of hyperspectral and lidar data: Remote optical mineralogy and fracture identification. **Geosphere**, v. 3, n. 6, p. 491-500, Dec 2007. ISSN 1553-040X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000251577200007>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- BELLIAN, J. A.; KERANS, C.; JENNETTE, D. C. Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. **Journal of Sedimentary Research**, Austin, v. 75, n. 2, p. 166-176, Mar 2005. ISSN 1527-1404. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000227097000002>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- BUCKLEY, S. J. et al. Terrestrial laser scanning for use in virtual outcrop geology. **Photogrammetric Record**, Issue, v. 25, n. 131, p. 225-239, Sep 2010. ISSN 0031-868X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000281796700002>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- \_\_\_\_\_. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. **Journal of the Geological Society**, Londres, v. 165, p. 625-638, May 2008. ISSN 0016-7649. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000256094300003>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- ENGE, H. D. et al. From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures. **Geosphere**, v. 3, n. 6, p. 469-490, Dec 2007. ISSN 1553-040X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000251577200006>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- FABUEL-PEREZ, I.; HODGETTS, D.; REDFERN, J. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of a low-sinuosity fluvial-dominated succession using digital outcrop models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, central High Atlas, Morocco. **Aapg Bulletin**, v. 93, n. 6, p. 795-827, Jun 2009. ISSN 0149-1423. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000267717400004>. Acesso em: 21 abr. 2012.
- FENG, Q. **Novel methods for 3-D semi-automatic mapping of fracture geometry at exposed rock faces**. 2001. 69 (Doctoral). Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

FERNÁNDEZ, O. Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data. **Journal of Structural Geology**, v. 27, n. 5, p. 855-858, 2005. ISSN 0191-8141. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814105000143>>. Acesso em: 21 abr. 2012.

FERRARI, F. et al. Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando Scanner a Laser terrestre. **Geociências**, São Paulo, v. 31, n. UNESP, p. 79-91, 2012.

FRANK, H. T. **Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na formação Serra Geral (Bacia do Paraná)**. 2008. 322 f (Doutorado em Geociências) -- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

GARCÍA-SELLÉS, D. et al. Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning. **Computers & Geosciences**, Barcelona, v. 37, n. 10, p. 1584-1594, 2011. ISSN 0098-3004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300411001099>>. Acesso em: 21 abr. 2012.

HERDA, H. H. W. Strike standard deviation for shallow-dipping rock fracture sets. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Boston, v. 32, n. 4, p. 241-255, Oct-Dec 1999. ISSN 0723-2632. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000083245400001>. Acesso em: 21 abr. 2012.

JONES, R. R.; KOKKALAS, S.; MCCAFFREY, K. J. W. Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR)-The Arkitsa fault, central Greece, as a case study. **Geosphere**, v. 5, n. 6, p. 465-482, Dec 2009. ISSN 1553-040X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000272418700001>. Acesso em: 21 abr. 2012.

KURTZMAN, D. et al. Improving fractured carbonate-reservoir characterization with remote sensing of beds, fractures, and vugs. **Geosphere**, v. 5, n. 2, p. 126-139, Apr 2009. ISSN 1553-040X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000266823800004>. Acesso em: 21 abr. 2012.

KWONG, A. K. L.; KWOK, H.; WONG, A. **Use of 3D Laser Scanner for Rock Fractures Mapping**. FIG Working Week 2007. Hong Kong SAR, China: 14 p. 2007.

NAGALLI, A.; PIO FIORI, A.; NAGALLI, B. Método para aplicação de escâner a laser terrestre ao estudo da estabilidade de taludes em rocha. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 41(1), p. 56-67, 2011.

NAGIHARA, S.; MULLIGAN, K. R.; XIONG, W. Use of a three-dimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, Maynooth, v. 29, n. 3, p. 391-398, Mar 2004. ISSN 0197-9337. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000220454800008 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

OLARIU, M. I. et al. Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas. **Geosphere**, v. 4, n. 1, p. 247-259, Jan 2008. ISSN 1553-040X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000252765700012 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

PEARCE, M. A. et al. Quantification of fold curvature and fracturing using terrestrial laser scanning. **Aapg Bulletin**, v. 95, n. 5, p. 771-794, May 2011. ISSN 0149-1423. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000290136000004 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. In: SHAN, J. e TOTH, C. K. (Ed.). **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. Nw: Topographic laser ranging and scanning : principles and processing, 2009. cap. 19, p.593.

PHELPS, R. M.; KERANS, C. Architectural characterization and three-dimensional modeling of a carbonate channel-levee complex: Permian San-Andres Formation, Last Chance Canyon, New Mexico, USA. **Journal of Sedimentary Research**, Austin, v. 77, n. 11-12, p. 939-964, Nov-Dec 2007. ISSN 1527-1404. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000250884900006 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

PRINGLE, J. K. et al. **Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art**. First Break. n. 24, p. 33-42. 2006.

ROTEVATN, A. et al. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study. **Aapg Bulletin**, v. 93, n. 3, p. 407-427, Mar 2009. ISSN 0149-1423. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000263982500006 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

SILVA, R. M. D. et al. **Uso da Técnica LIDAR para Geração de Modelos Digitais de Afloramentos**. XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia. Aracaju - SE. 1: 926-932 p. 2010.

SLOB, S. et al. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. **Geology and Properties of Earth Materials 2005**, Washington, n. 1913, p. 187-194, 2005 2005. ISSN 0361-1981. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000235515900018 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

STURZENEGGER, M.; STEAD, D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. **Engineering Geology**, Maryland Heights, v. 106, n. 3-4, p. 163-182, Jun 12 2009. ISSN 0013-7952. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000267587400006 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

WOODCOCK, N. H. Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. **Geological Society of America Bulletin**, v. 88, n. 9, p. 1231-1236, 1977 1977. ISSN 0016-7606. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:A1977DR90300002 >. Acesso em: 21 abr. 2012.

#### APÊNDICE A – Medidas feitas com Bússola e Clinômetro

Plano:	1	Declinação= 0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	221,00	21,00	Experiente
2	225,00	21,00	Média experiência
3	223,00	21,00	Inexperiente
4	222,00	21,00	Experiente
5	221,00	19,00	Média experiência
6	221,00	21,00	Inexperiente
7	223,00	21,00	Experiente
8	223,00	20,50	Média experiência
9	221,00	21,00	Inexperiente
10	221,00	21,00	Experiente



11	220,50	21,00	Média experiência
12	220,00	21,50	Inexperiente
13	222,00	22,00	Experiente
14	221,00	20,50	Média experiência
15	219,00	21,50	Inexperiente
16	223,00	21,50	Experiente
17	222,00	21,00	Média experiência
18	220,50	20,50	Inexperiente
19	223,00	21,00	Experiente
20	220,00	21,00	Média experiência
21	221,00	21,00	Inexperiente
22	223,00	21,50	Experiente
23	221,00	21,50	Média experiência
24	220,00	20,50	Inexperiente
25	223,00	21,50	Experiente
26	222,00	21,00	Média experiência
27	220,00	20,50	Inexperiente
28	222,50	21,00	Experiente
29	222,50	21,00	Média experiência
30	220,00	21,00	Inexperiente
Média	221,57	20,98	
Desv. Pad.	1,34	0,52	

Plano:	2	declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	146	58	Experiente
2	149	59,5	Média experiência
3	147	60,5	Inexperiente
4	148	60,5	Experiente
5	149	60,5	Média experiência
6	151	60	Inexperiente
7	146	59	Experiente
8	148	60	Média experiência
9	146	60	Inexperiente
10	145	59,5	Experiente
11	150	60	Média experiência
12	147	59,5	Inexperiente
13	146,5	60	Experiente
14	149	60	Média experiência
15	149	59,5	Inexperiente
16	148,5	59,5	Experiente
17	149	59,5	Média experiência
18	149	60	Inexperiente
19	146	59	Experiente
20	148	59,5	Média experiência
21	148,5	60	Inexperiente
22	146	59	Experiente
23	148	59,5	Média experiência
24	148,5	60	Inexperiente
25	148	59,5	Experiente
26	148,5	60	Média experiência
27	145	60	Inexperiente
28	146	59	Experiente
29	148,5	60	Média experiência
30	150	60	Inexperiente
Média	147,8	59,7	
Desv. Pad.	1,55	0,53	



Plano:	3	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	147,00	57,00	Experiente
2	146,00	56,00	Média Experiência
3	147,00	57,50	Inexperiente
4	150,00	56,00	Experiente
5	146,00	54,50	Média Experiência
6	147,00	56,00	Inexperiente
7	147,00	57,00	Experiente
8	147,00	56,50	Média Experiência
9	146,50	58,50	Inexperiente
10	148,00	56,50	Experiente
11	149,00	56,00	Média Experiência
12	148,00	55,50	Inexperiente
13	149,00	56,00	Experiente
14	148,00	57,00	Média Experiência
15	148,50	58,00	Inexperiente
16	148,00	56,50	Experiente
17	146,00	55,00	Média Experiência
18	149,00	55,50	Inexperiente
19	147,00	55,00	Experiente
20	148,00	55,00	Média Experiência
21	147,00	57,00	Inexperiente
22	149,00	57,00	Experiente
23	147,00	57,00	Média Experiência
24	148,00	59,00	Inexperiente
25	148,00	58,00	Experiente
26	149,00	60,00	Média Experiência
27	149,00	59,00	Inexperiente
28	148,00	57,00	Experiente
29	148,00	57,00	Média Experiência
30	148,00	58,00	Inexperiente
Média	147,77	56,80	
Desv.Pad.	1,03	1,31	

Plano:	4	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	152	64	Experiente
2	149	62	Média experiência
3	151	59	Inexperiente
4	150	59	Experiente
5	151	57	Média experiência
6	154	60	Inexperiente
7	152	56,5	Experiente
8	152	56,5	Média experiência
9	154	60,5	Inexperiente
10	151	56	Experiente
11	154	57	Média experiência
12	153	59,5	Inexperiente
13	151	58	Experiente
14	154	57	Média experiência
15	154	60	Inexperiente
16	152	59	Experiente
17	152	57,5	Média experiência
18	153	60	Inexperiente
19	152	59	Experiente
20	153,5	57	Média experiência
21	154,5	61	Inexperiente
22	151	59,5	Experiente
23	152,5	59	Média experiência
24	152,5	60,5	Inexperiente
25	152	57	Experiente
26	153	60	Média experiência
27	154	60	Inexperiente
28	150	57	Experiente
29	154	57	Média experiência
30	153,5	60,5	Inexperiente
Média	152,38	58,87	
Desv.Pad.	1,44	1,88	

Plano:	5	declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	102	86	Experiente
2	103	86	Média experiência
3	104	88	Inexperiente
4	105	86	Experiente
5	103	88	Média experiência
6	104	87	Inexperiente
7	106	86	Experiente
8	103	88	Média experiência
9	105	85,5	Inexperiente
10	105	86,5	Experiente
11	103	88,5	Média experiência
12	104,5	83,5	Inexperiente
13	104	85,5	Experiente
14	103	88,5	Média experiência
15	106	86	Inexperiente
16	104,5	85,5	Experiente
17	103	88	Média experiência
18	105,5	86	Inexperiente
19	105	85,5	Experiente
20	102,5	88,5	Média experiência
21	106	84	Inexperiente
22	104,5	86	Experiente
23	104	84,5	Média experiência
24	104	85,5	Inexperiente
25	107	86	Experiente
26	102	85,5	Média experiência
27	104,5	85	Inexperiente
28	105	86	Experiente
29	104	85	Média experiência
30	103,5	87	Inexperiente
Média	104,18	86,23	
Desv. Pad.	1,24	1,33	

Plano:	6	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	137	77	Experiente
2	136	75	Média experiência
3	137	77	Inexperiente
4	138,5	75,5	Experiente
5	137	75,5	Média experiência
6	140	75	Inexperiente
7	140	74,5	Experiente
8	138	75,5	Média experiência
9	137	78	Inexperiente
10	138	74	Experiente
11	139	75,5	Média experiência
12	139,5	76	Inexperiente
13	139,5	74	Experiente
14	140	75	Média experiência
15	139	76	Inexperiente
16	139	75	Experiente
17	138	78	Média experiência
18	139	77	Inexperiente
19	139,5	74	Experiente
20	139	76,5	Média experiência
21	139	75	Inexperiente
22	140	75	Experiente
23	137	78,5	Média experiência
24	140	75,5	Inexperiente
25	140	74	Experiente
26	138	78,5	Média experiência
27	139	76	Inexperiente
28	141	74,5	Experiente
29	138	78	Média experiência
30	141	76,5	Inexperiente
Média	138,77	75,85	
Desv.Pad.	1,28	1,38	

Plano:	7	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	191	83,5	Experiente
2	189	83,5	Média experiência
3	190	83,5	Inexperiente
4	188	84,5	Experiente
5	191	84,5	Média experiência
6	191	84,5	Inexperiente
7	189	84,5	Experiente
8	188	84,5	Média experiência
9	189	84,5	Inexperiente
10	189	84	Experiente
11	190	83,5	Média experiência
12	189	85	Inexperiente
13	188	85	Experiente
14	188	84	Média experiência
15	190	84	Inexperiente
16	188	84,5	Experiente
17	189	84,5	Média experiência
18	190,5	84,5	Inexperiente
19	189,5	85	Experiente
20	190,5	84,5	Média experiência
21	188	84,5	Inexperiente
22	188	84	Experiente
23	189	84,5	Média experiência
24	189,5	84	Inexperiente
25	189	85	Experiente
26	189,5	83,5	Média experiência
27	189	85,5	Inexperiente
28	189	84	Experiente
29	190,5	83,5	Média experiência
30	191	84,5	Inexperiente
Média	189,33	84,30	
Desv.Pad.	1,02	0,53	

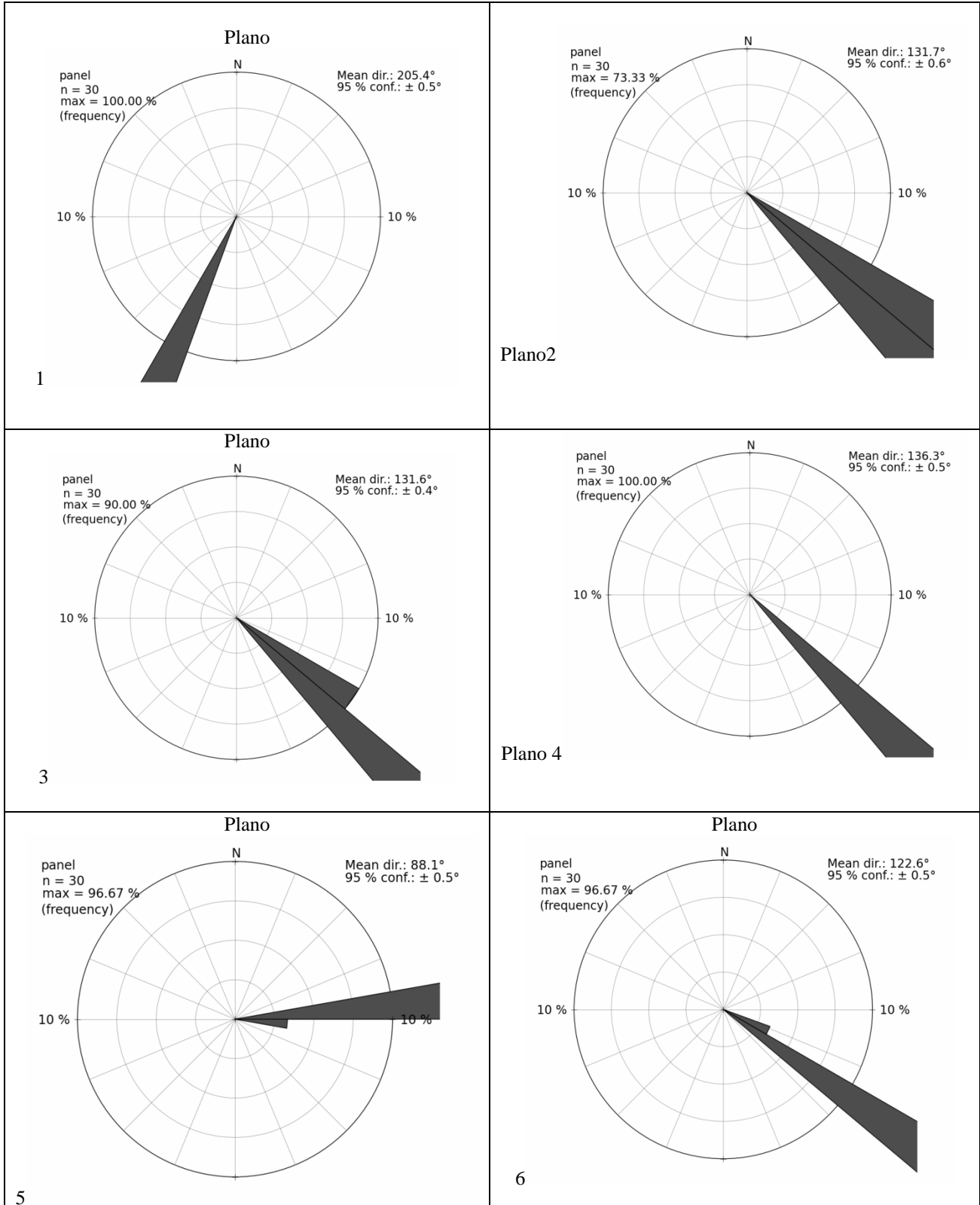
Plano:	8	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	187	16,5	Experiente
2	192	15,5	Média experiência
3	187,5	16,5	Inexperiente
4	189	16	Experiente
5	189	16,5	Média experiência
6	190	15,5	Inexperiente
7	189,5	16	Experiente
8	187,5	16	Média experiência
9	189	16	Inexperiente
10	188,5	15,5	Experiente
11	188	16	Média experiência
12	186	15	Inexperiente
13	189	15,5	Experiente
14	190	16,5	Média experiência
15	187	15,5	Inexperiente
16	188	16,5	Experiente
17	188	15,5	Média experiência
18	187	15	Inexperiente
19	189	15,5	Experiente
20	187,5	16	Média experiência
21	186	15	Inexperiente
22	188,5	15,5	Experiente
23	188	15,5	Média experiência
24	189	15	Inexperiente
25	190	15,5	Experiente
26	188	16,5	Média experiência
27	188	16	Inexperiente
28	188	16	Experiente
29	188	15,5	Média experiência
30	188,5	15,5	Inexperiente
Média	188,35	15,77	
Desv.Pad.	1,25	0,49	

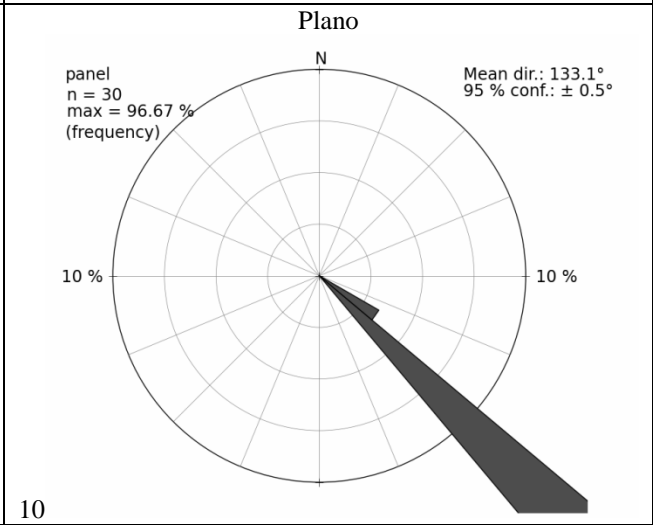
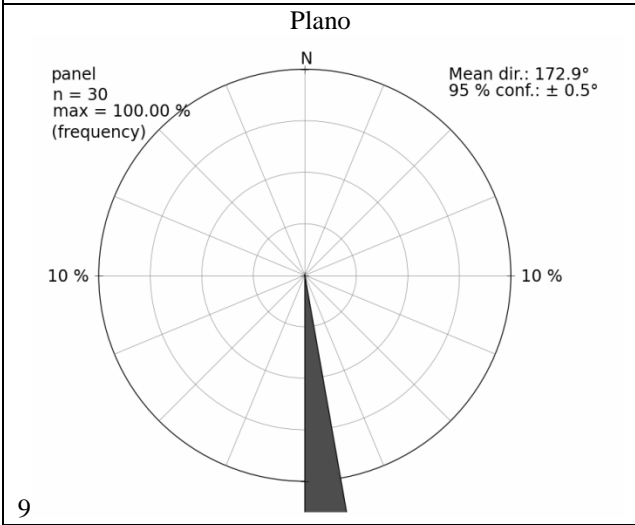
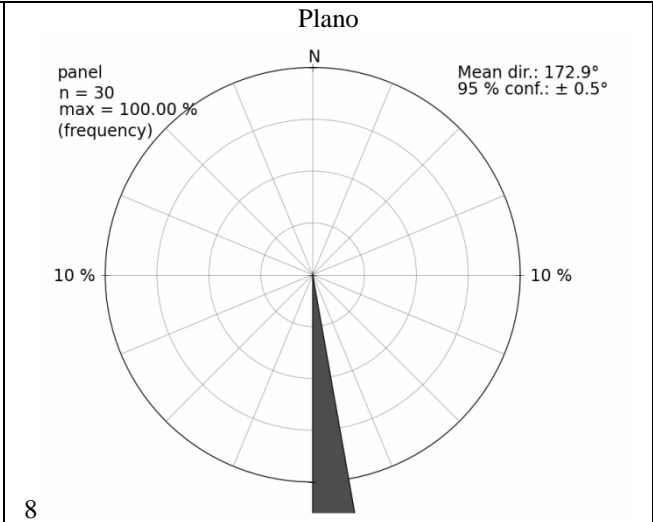
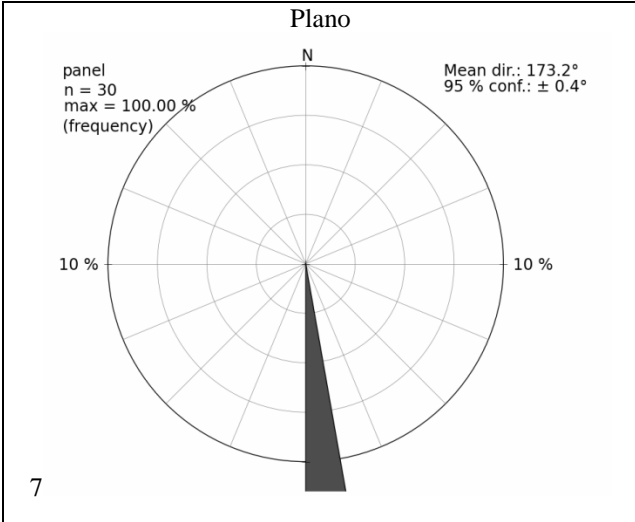
Plano:	9	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	187	43	Experiente
2	194	43,5	Média Experiência
3	190	43,5	Inexperiente
4	190	41	Experiente
5	190	43,5	Média Experiência
6	186,5	44,5	Inexperiente
7	191	45,5	Experiente
8	188	41,5	Média Experiência
9	191	40,5	Inexperiente
10	189	41,5	Experiente
11	188	42	Média Experiência
12	189,5	42,5	Inexperiente
13	189,5	42	Experiente
14	188	41,5	Média Experiência
15	188,5	43	Inexperiente
16	189	42,5	Experiente
17	188,5	41	Média Experiência
18	188,5	40	Inexperiente
19	190	41,5	Experiente
20	188	40,5	Média Experiência
21	187	43	Inexperiente
22	189	43	Experiente
23	189	42,5	Média Experiência
24	188	42	Inexperiente
25	188,5	41	Experiente
26	188,5	42,5	Média Experiência
27	189	41,5	Inexperiente
28	189	41	Experiente
29	189	42,5	Média Experiência
30	190	42,5	Inexperiente
Média	189,03	42,20	
Desv.Pad.	1,43	1,22	

Plano:	10	Declinação=0	
Medidas	Direção de Mergulho (graus)	Mergulho (graus)	Experiência
1	151	83	Experiente
2	146	84	Média experiência
3	148,5	81	Inexperiente
4	151	80,5	Experiente
5	148,5	81,5	Média experiência
6	151,5	83,5	Inexperiente
7	149	83	Experiente
8	150,5	82	Média experiência
9	150	82,5	Inexperiente
10	148,5	83	Experiente
11	148	83	Média experiência
12	150,5	84	Inexperiente
13	149	81,5	Experiente
14	148,5	82	Média experiência
15	150	83,5	Inexperiente
16	150	82	Experiente
17	148	83	Média experiência
18	149	82,5	Inexperiente
19	149	83	Experiente
20	149	81	Média experiência
21	150	84	Inexperiente
22	150,5	81,5	Experiente
23	151	80,5	Média experiência
24	150	82,5	Inexperiente
25	148	81,5	Experiente
26	148,5	81	Média experiência
27	149	82,5	Inexperiente
28	149,5	82,5	Experiente
29	147	82,5	Média experiência
30	148	83	Inexperiente
Média	149,23	82,37	
Desv.Pad.	1,27	1,01	

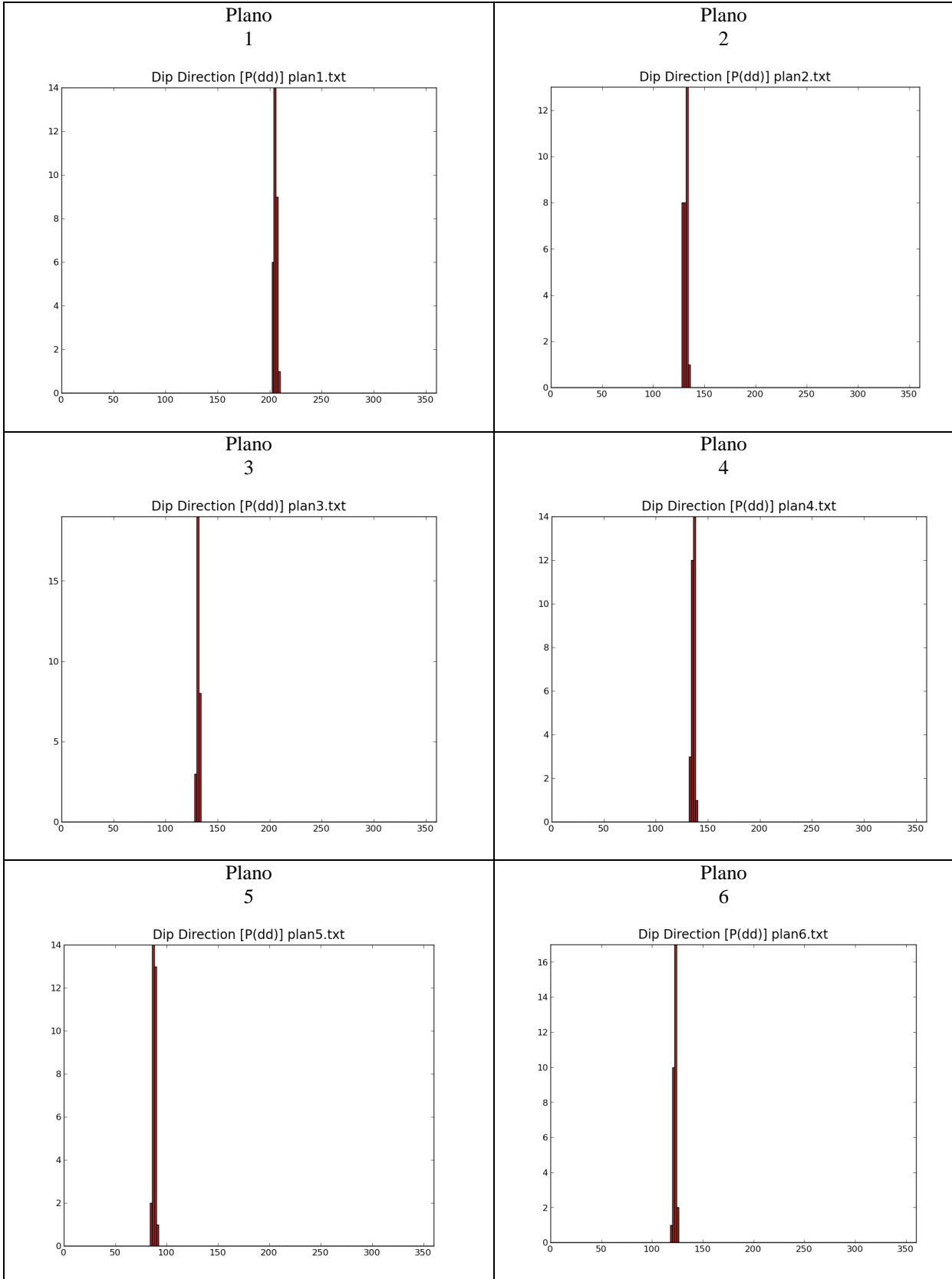


APÊNDICE B - Diagrama de Rosetas da direção de mergulho dos planos

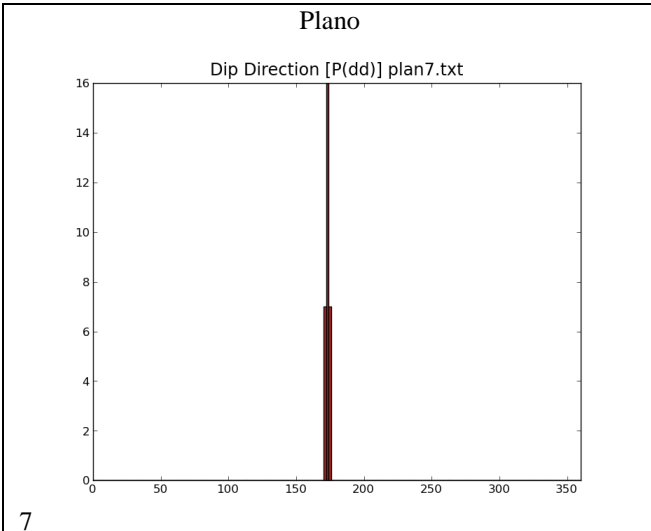




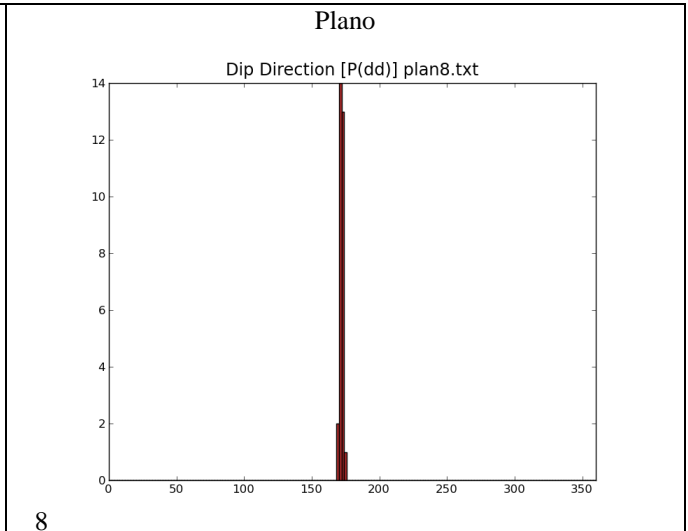
## APÊNDICE C – Histogramas das medidas da direção de mergulho dos planos



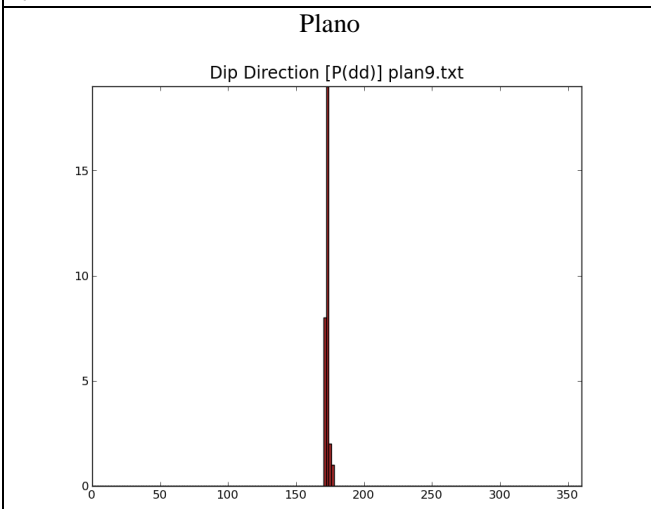




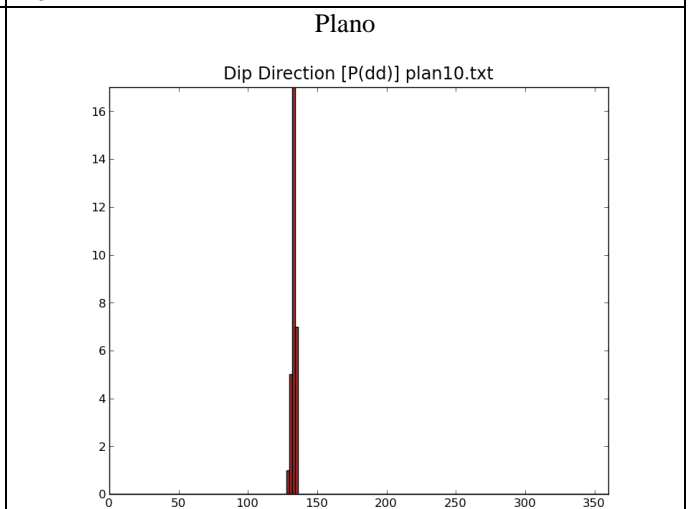
7



8

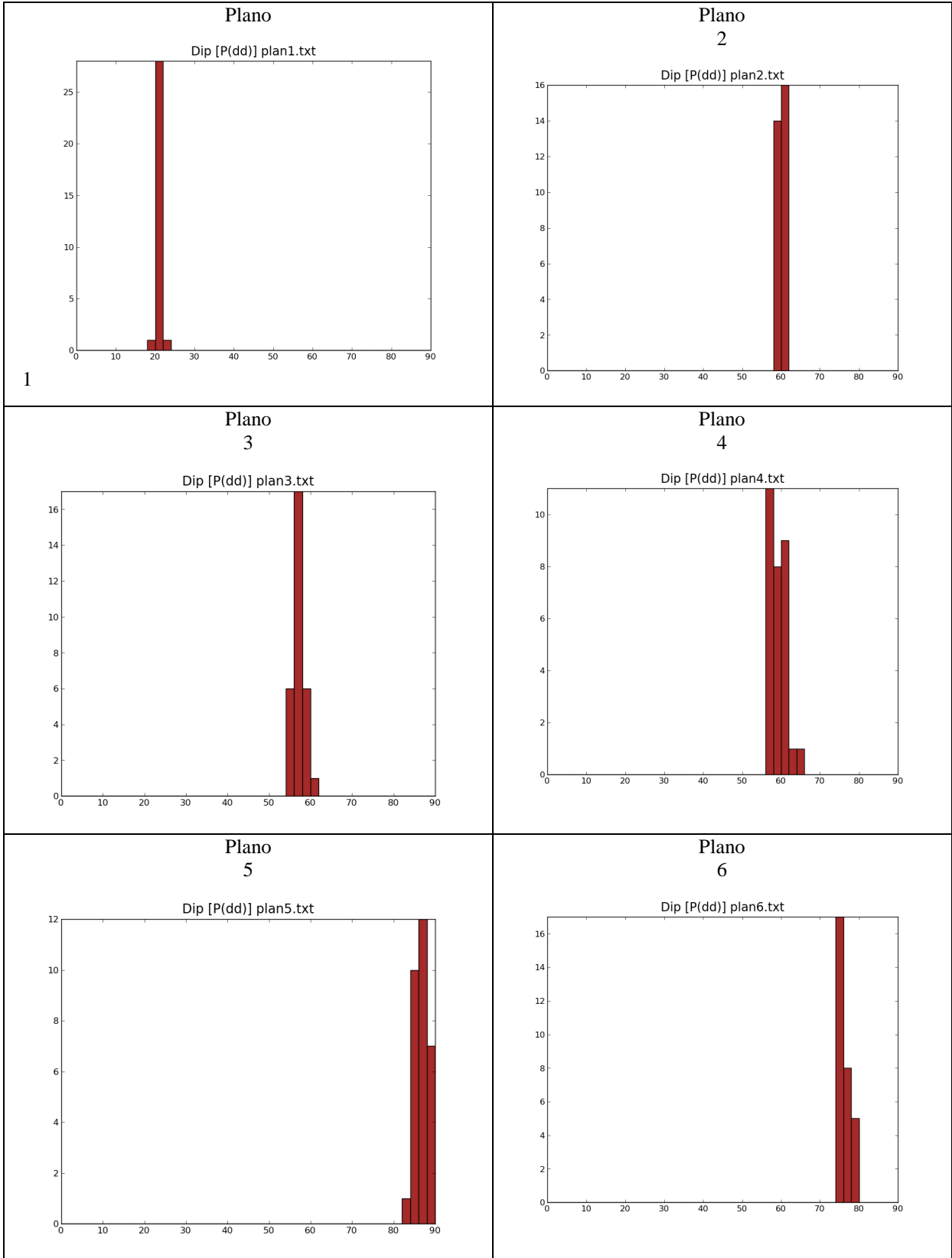


9



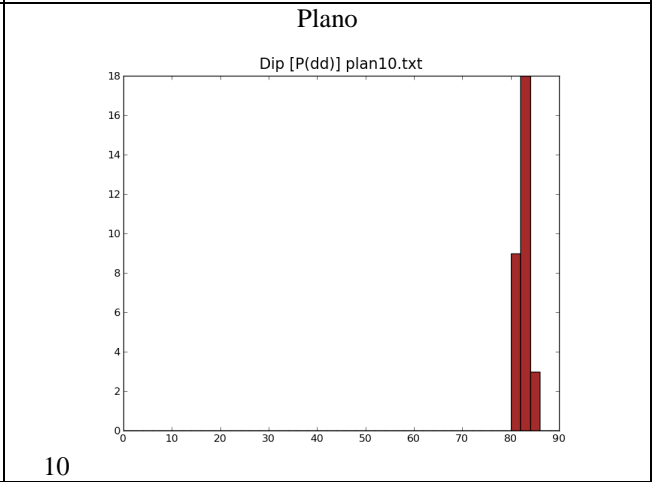
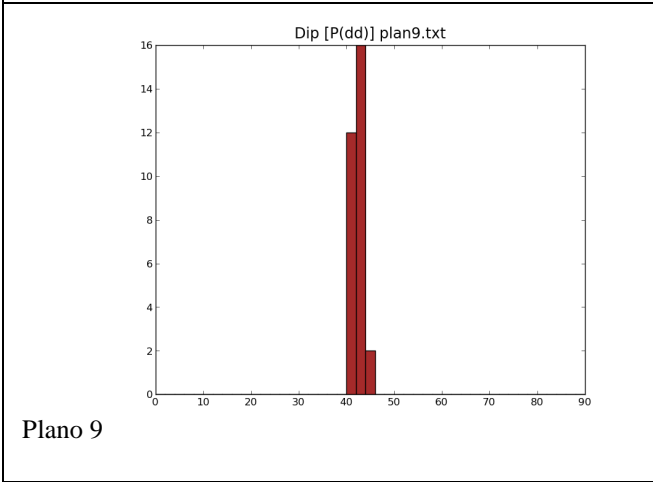
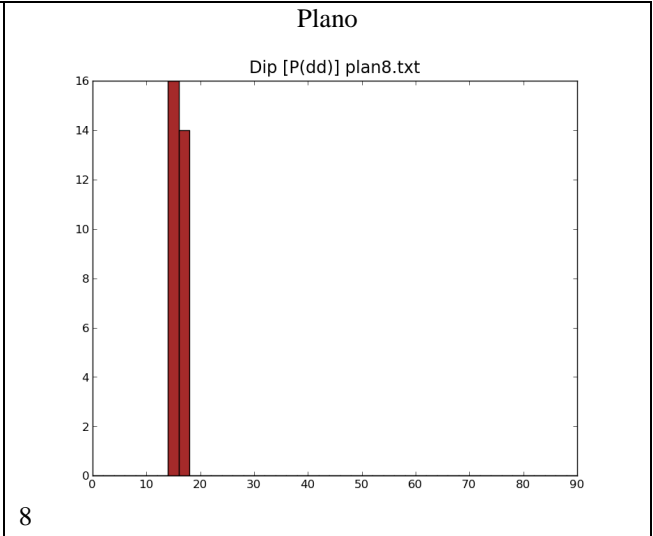
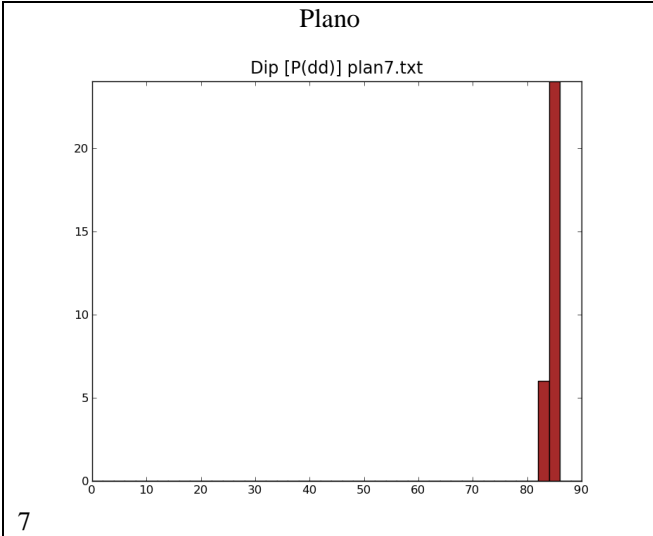
10

APÊNDICE D - Histogramas das medidas de mergulho dos planos



1







APÊNDICE E - Artigo científico submetido para IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters

(<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=4357975>)

## TERRESTRIAL LASER SCANNER: A TOOL FOR EFFECTIVE MEASUREMENTS OF GEOLOGICAL STRUCTURES IN OUTCROPS

Marcelo Kehl de Souza, Maurício Roberto Veronez, Francisco M. W. Tognoli, Luiz Gonzaga da Silveira Jr., Rudi César Comiotto Modena, Leonardo Campos Inocencio, Reginaldo Macedônio da Silva.

**Abstract**— This study aimed to build a model to survey geological planar structure geometries using light detection and ranging technique. The area chosen for the survey and application of the proposed method is located at Incopel basalt quarry, in the town of Estância Velha, State of Rio Grande do Sul. The study covered a field survey with the determinations of plane attitude using compass, clinometers, and digital images through light detection and ranging technique. Three methods were used to compute the selected planes into the point cloud, namely, three points, planar regression, and moment of inertia analysis. The methods were evaluated and compared with traditional methods of measurement (compass and clinometer). The evidence shows that the three-point method is quick and simple; however, it does not have any tool for quality analysis. Planar regression method proves to be effective and has tool for analyzing the degree of fit to the calculated plane. The Moment of Inertia provides degree of fit and reliability analysis to the calculated plane.

**Index Terms**- LIDAR; Serra Geral Formation; Fracture Orientation.

### I. INTRODUCTION

GEOLOGY has increasingly employed digital techniques for collecting spatial data with high resolution and, therefore, great accuracy in the generation of 3D geological models, which enable more detailed quantitative analysis [1].

One of the techniques that have been deployed into the geological activity is the use of terrestrial laser scanner (TLS). TLS is able to acquire a point cloud spaced by millimeters, which can be, thus, incorporated into the analysis and interpretation of field data [1]. In addition, 3D outcrop models may be used virtually with the support of visualization techniques, making it easier by contributing to cost reduction and planning fieldwork, allowing the acquisition of measurements of geological structures safely in areas of difficult access [2].

TLS has become increasingly popular in geomorphological studies [3-10]; however, its application in parametric/geometric study of outcrops still needs to be improved. These improvements are related, directly, to the identification and interpretation of geological features, as

well as the parameterization of structures in digital outcrop models (DOMs), generated from a dense cloud of three-dimensional points. Thus, new geological interpretation methodologies need to be developed using the whole potential of models generated from the TLS.

In outcrops of difficult access, where there is the interference of magnetic fields in deposits of magnetic mineral, that is, magnetite, ilmenite, pyrrhotite, and so on, traditional methods may lead to errors, making it difficult and distorting the generation of geological models. Therefore, it is necessary to build a methodology for planning, collecting, and processing data for geometric data modeling of geological structural plans with the use of TLS.

The study aims to build a model for survey geological planar structure geometries using LIDAR technique. For this purpose, three methods are applied and compared, namely, three points (3P), planar regression (PR), and moment of inertia analysis (MI), for the characterization of planar geological structures using the point cloud.

### II. Literature review

The characterization of outcrop surface is related to many geological activities applied, such as the slope stability analysis [6, 7], studies of analog outcrops of hydrocarbon reservoirs [11-16], DOM interpretations [17-19], and studies of fractured rocks [6, 10, 14, 20, 21].

For featuring high resolution in the generation of 3D point cloud, TLS is effective in getting measurements that make the process of interpretation of geological structures easier [17, 22], as well as measurements of plans for geological structural studies [6, 9].

There are some methods of getting the orientation of a plane from a point cloud [6, 23-25]. The first is to select three points in the georeferenced point cloud and calculate both the dip direction and the dip with the support of analytic geometry tools [6]. The second, called moment of inertia analysis (MI), consists in finding the maximum moment of inertia axis, pole to the best-fit plane, estimating the moment of inertia of a set of nodes [25]. It is assumed that, to estimate the moment of inertia of a set of points, the best-fit plane passes through the point of coordinates:  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ , and  $\bar{z}$ , the center of mass of the nodes. From the calculation

of the vectors that connect the center of mass to each node, the orientation matrix  $T$  is made:

$$T = \begin{bmatrix} \sum l_i^2 & \sum l_i m_i & \sum l_i n_i \\ \sum m_i l_i & \sum m_i^2 & \sum m_i n_i \\ \sum n_i l_i & \sum n_i m_i & \sum n_i^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

From the symmetric matrix  $T$ , the eigenvectors  $(v_1, v_2, v_3)$  and the corresponding eigenvalues  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  can be found [26]. The eigenvector  $v_1$  is associated with the orientation of maximum density of vectors. The eigenvector  $v_3$  is associated to the minimum density of vectors, the highest moment of inertia, and therefore, the pole of best-fit plane.

The third method calculates the orientation of a plane through the points used in the method called planar regression (PR) [23, 24]. The equation of best-fit plane, in this method, is expressed by the regression planar:

$$Z = b_0 + b_1 X + b_2 Y \quad (2)$$

The matrix below is made to find the coefficients  $b_0, b_1, b_2$  of an  $n$  number of captured points:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

where  $x_i, y_i, z_i$  are the coordinates of the selected points of the plane. The coefficients  $b_0, b_1, b_2$  can be found either by Cramer's theorem or by Gaussian elimination. According to the coefficients (vector normal to the plane) the dip direction and the dip are determined.

The concepts degree of fit and reliability define the quality of the orientation measurements produced from the points [25]. The degree of fit is inversely proportional to the distance of the nodes. The reliability is associated with the stability of the method.

In the PR, the degree of fit of the plane is found through the correlation coefficient  $R^2$ , which is the relation among the variables [24], expressed by the following:

$$R^2 = \frac{\left[ \sum (z_i - \bar{z})(\hat{z}_i - \bar{\hat{z}}) \right]^2}{\sum (z_i - \bar{z})^2 \sum (\hat{z}_i - \bar{\hat{z}})^2} \quad (4)$$

$$\hat{z}_i = b_0 + b_1(x_i - \bar{x}) + b_2(y_i - \bar{y}) \quad (5)$$

In the MI, the degree of fit and reliability can be obtained through the ratio between the eigenvalues of the matrix orientation [26]. The degree of fit is defined by the ratio between the eigenvalue one  $(\lambda_1)$  and eigenvalue two  $\lambda_2$ , according to the equation:

$$M = \ln(\lambda_1 / \lambda_2) \quad (6)$$

The higher is the value of  $M$ , the shorter is the distance between the best-fit plane and the nodes. However, a good fit plane does not necessarily correspond to good quality in the orientation. For reliability in the orientation measurement, the nodes need to be as far as possible from the collinearity and as far as possible from the center of mass. The ratio between the eigenvalues of the orientation matrix, in the analysis of the moment of inertia, provides the degree of collinearity of points, the reliability of the best-fit plane, expressed by the following:

$$K = \ln(\lambda_1 / \lambda_2) / \ln(\lambda_2 / \lambda_3) \quad (7)$$

### III. Materials and Methods

To carry out this research, the equipment used was 3D Terrestrial Laser Scanner ILRIS—from OPTECH, Receptor GPS- Topcon Modelo Hiper Lite RTK and compass with clinometer.

The study was conducted in a quarry (Incopel Industry and Trade of Crushed Stone Ltd.), located in the town of Estância Velha in the State of Rio Grande do Sul (UTME = 485685 m; UTMN = 6722017 m; Zone 22S, SIRGAS2000) (Fig. 1).

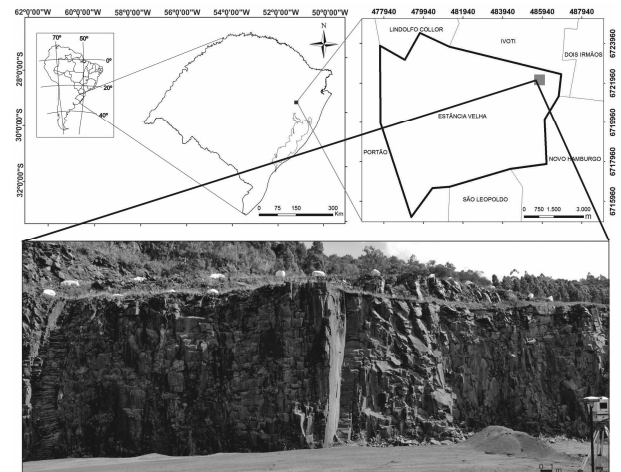


Fig. 1. Location of study area.

The quarry lies on the first basaltic floods of the southern edge of the Paraná Basin [27].

The wall of the quarry is composed of a basaltic flood of approximately 40 meters thick located in a valley between two massive aeolian dunes of the Botucatu Formation [28]. Superimposed on these volcanic rocks, an interflow dune, with up to 27 meters thick, was formed, slightly hidden by small basaltic floods that came from the north [28].

The scans were performed in two selected locations with 30% coating, with a 20-millimeter mesh and an average distance of 33 meters from the outcrop.

In the stage of data processing, the point clouds generated by the TLS had to be unified and georeferenced. The plans are identified and marked directly on the point cloud (Fig. 2).

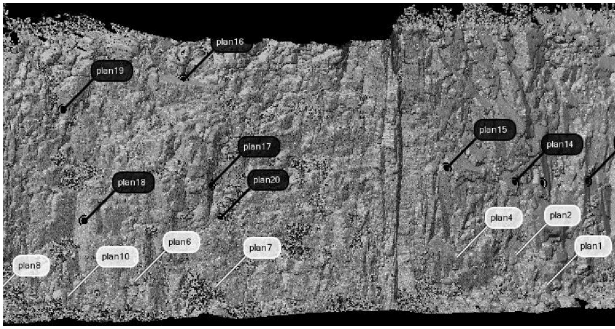


Fig. 2. Selection of planes in the point cloud. The planes marked in white are planes measured by compass and clinometer, the orientations of which were computed with three techniques: 3P, MI, and PR. The planes marked in black, of hard access, were computed with the three techniques.

To calculate the orientation of fracture planes, the three methods mention above were used: 3P, MI, and PR.

#### IV. Analysis and Discussion of Results

The point cloud obtained from the LIDAR technique has a total of 6.1 million georeferenced points in the UTM-SIRGAS2000 coordinate system, producing the first result of the technique (Fig. 3).

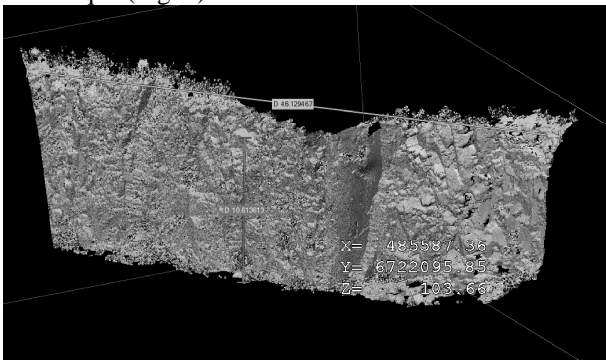


Fig. 3. Georeferenced point cloud. The IMInspect module of the Polyworks program was used to obtain measurements, in meters, in the outcrop.

The point cloud can be positioned at points of view that field work does not allow, either for the dimensions of the outcrop or for safety reasons.

The poles of the planes measured, 30 measurements in each plane, with compass and clinometer, were plotted on stereographic projection of the equal area (Fig. 4).

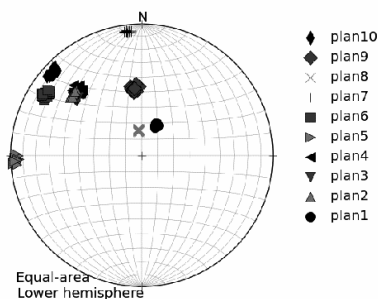


Fig. 4. Poles of the planes measured using a compass and plotted on projection of the equal area.

In the comparison made between the orientations of fracture planes using a compass and a clinometer, and the three methods (3P, MI, and PR), conducted in this study, the evidence shows differences in the dip direction of 5.9

degrees, 2.4 degrees, and 3.1 maximum, respectively (Fig. 5).

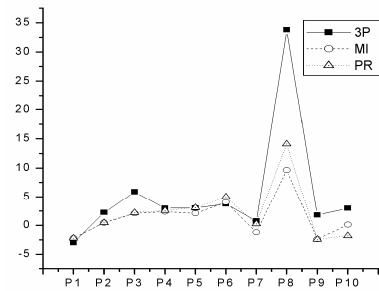


Fig. 5. Graph showing the difference between the averages of measurements of dip direction in the 10 fracture planes carried out using a compass and the measurements calculated by the three techniques: 3P, MI, and PR in degrees.

In the comparison made with the dip angle, the maximum differences were as follows: 5.4, 2.3, and 4 degrees, respectively, for 3P, MI, and PR (Fig. 6).

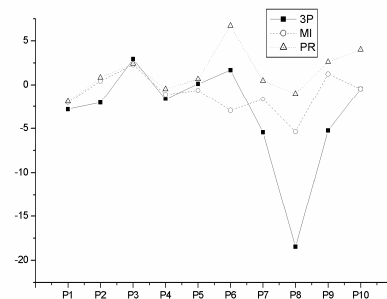


Fig. 6. Graph of the difference between the averages of the measurements of dip angles of 10 fracture planes carried out using an inclinometer and the measurements calculated by the three techniques: 3P, MI, and PR, in degrees.

The planes that PR (Fig. 7) and MI (Fig. 8) identified as low degree of fit and low reliability were excluded from that comparison. Measurements of 8 and 4 degrees of, respectively, dip direction and dip are suitable for the purpose of geotechnical studies [9].

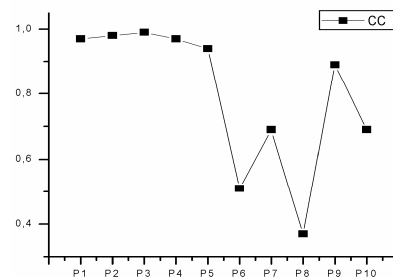


Fig. 7. Graph of the correlation coefficient (CC) of the planes calculated by Planar Regression.

Some planes stood out in the graphics of point spatial distribution, according to the ratio between the eigenvalues (Fig. 8). The plane 8, in particular, shows bad ratios in M and K in the MI. Good best-fit planes produce values higher than 4 for M and values lower than 0.8 for K [25]. It was perceived that the plane 8 is occluded because of obstacles for the TLS, resulting in a selection of points that are not representative of the plane to be measured.

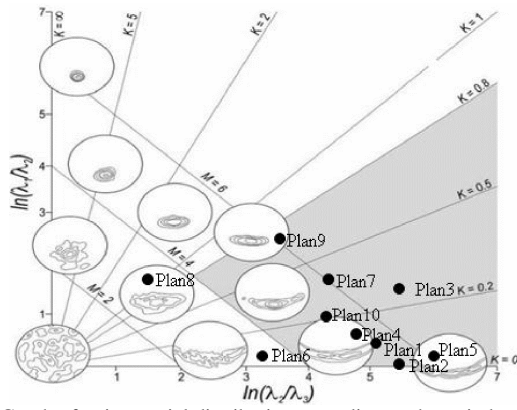


Fig. 8. Graph of point spatial distribution according to the ratio between the eigenvalues. With the ratios of fit degree (M) and reliability of the measurements (K) of the computed planes in the MI method. Source: Adapted from [26].

Plane 6 showed a low degree of fit in both PR (correlation coefficient) and the MI (ratio M). The photograph of the plane in Fig. 9 shows the surface roughness.

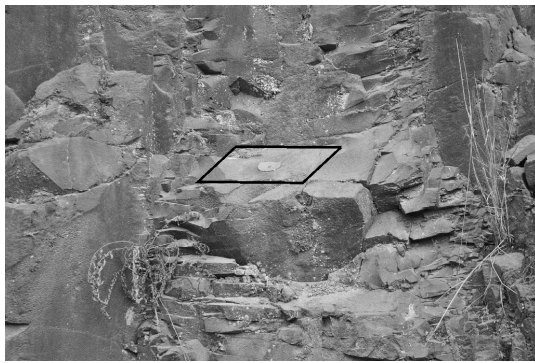


Fig. 9. Plane 6. The photograph of the plane shows the surface roughness.

Calculations on dip direction (Fig. 10a) and dip (Fig. 10b) were carried out for 10 planes of difficult access with the methods 3P, MI, and PR.

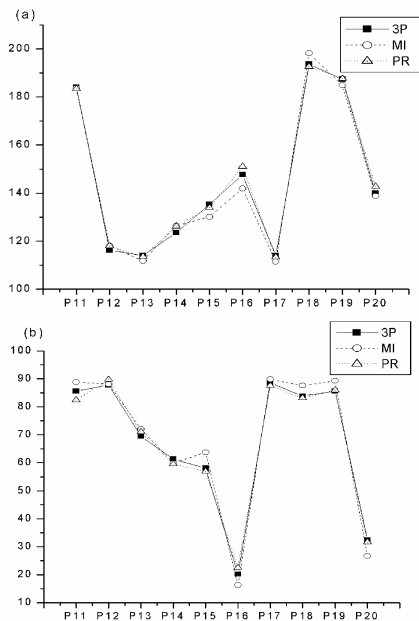


Fig. 10. Graph of the measurements of dip direction (a) and dip angles (b) of 10 fracture planes of difficult access, in degrees.

Three planes of difficult access stand out: plane 15 ( $M < 4$ ), plane 16 ( $K > 0.8$ ), and plane 20 ( $M < 4$  and  $K > 0.8$ ) (Fig. 11). Plane 15 features a curved surface, and plane 16 features low dip angle and is on the top of the outcrop; besides, it presented a point cloud twice bigger than the one configured in scanning. It is advisable, for surveying with TLS in these situations, if possible, to make way between the equipment and the outcrop. Finally, the plane 20 features a rough surface.

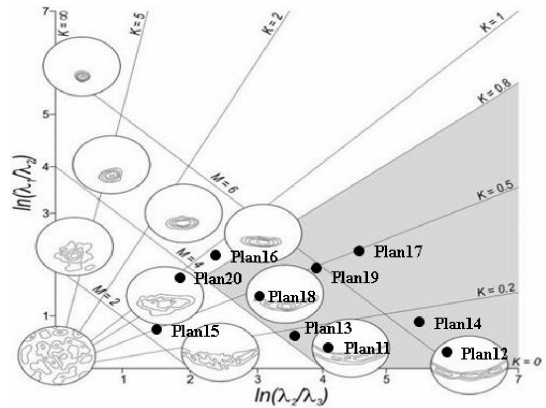


Fig. 11. Graph of point spatial distribution according to the ratio between the eigenvalues. With the ratios of degree of fit (M) and reliability of the measurements (K) of the planes of difficult access computed in the MI method. Source: Adapted from [26].

### V. Conclusion

The processing of point cloud generated by the LIDAR technique was performed using three different methodologies: 3P, MI, and PR. The 3P method is quick and simple to measure planar geological structure orientation; however, it does not have any tool for quality analysis. The two methods, MI and PR, prove to be effective in calculating the orientation of planes from selected points of a point cloud. Both feature a tool for analyzing the degree of fit of selected points to the calculated plane. Although, MI, besides presenting minor measurement differences when compared with traditional methods, provides the quantitative measurement of the point spatial distribution, proving to be an efficient tool for processing the orientation of planes from points. This work shows that appropriate methods of LIDAR surveying and processing point cloud can provide realistic characterizations of the orientation of planar geological settings with a degree of fit and reliability.

### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Geology Postgraduate Program of Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS and LASERCA (Laboratory of Remote Sensing and Mapping) team of this university for providing support for the fieldwork. This project was financially supported by PETROBRAS through the projects NEAP (16 – SAP 4600242459) and “Mapeamento 3D Georreferenciado de Afloramentos Utilizando uma Técnica LIDAR” (0050 0044869. 08.4 – SAP: 4600285973) and FAPERGS, project “Modelos Digitais de Afloramentos como ferramenta na análise e interpretação geológica” (ARD – Process 10/0477-0).

## REFERENCES

- [1] S. J. Buckley, J. A. Howell, H. D. Enge, and T. H. Kurz, "Terrestrial laser scanning for use in virtual outcrop geology," *Journal of the Geological Society*, vol. 165, no. 3, pp. 625-638, May. 2008. DOI: 10.1144/0016-76492007-100.
- [2] S. J. Buckley, H. D. Enge, C. Carlsson, and J. A. Howell, "Terrestrial Laser Scanning for Use in Virtual Outcrop Geology," *Photogrammetric Record*, vol. 25, no. 131, pp. 225-239, Sep. 2010. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2010.00585.x.
- [3] J. Armesto, C. Ordonez, L. Alejano, and P. Arias, "Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes," *Geomorphology*, vol. 106, no. 3-4, pp. 271-277, May. 2009. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.11.005.
- [4] A. Abellán, J. M. Vilaplana, and J. Martínez, "Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain)," *Engineering Geology*, vol. 88, no. 3-4, pp. 136-148, Dec. 2006. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.012.
- [5] S. Nagihara, K. R. Mulligan, and W. Xiong, "Use of a Three-Dimensional Laser Scanner to Digitally Capture the Topography of Sand Dunes in High Spatial Resolution," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, no. 3, pp. 391-398, Mar. 2004. DOI: 10.1002/esp.1026.
- [6] A. Nagalli, A. Pio Fiori, and B. Nagalli, "Método para aplicação de escâner a laser terrestre ao estudo da estabilidade de taludes em rocha," *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 41(1), pp. 56-67, 2011.
- [7] S. Slob, B. van Knapen, R. Hack, K. Turner, J. Kemeny, and Trb, "Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning," *Geology and Properties of Earth Materials 2005*, pp. 187-194, 2005.
- [8] M. A. Pearce, R. R. Jones, S. A. F. Smith, and K. J. W. McCaffrey, "Quantification of fold curvature and fracturing using terrestrial laser scanning," *Aapg Bulletin*, vol. 95, no. 5, pp. 771-794, May. 2011. DOI: 10.1306/11051010026.
- [9] M. Sturzenegger and D. Stead, "Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts," *Engineering Geology*, vol. 106, no. 3-4, pp. 163-182, Jun. 2009. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.03.004.
- [10] M. I. Olariu, J. F. Ferguson, C. L. V. Aiken, and X. M. Xu, "Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas," *Geosphere*, vol. 4, no. 1, pp. 247-259, Jan. 2008. DOI: 10.1130/GES00139.1.
- [11] D. García-Sellés, O. Falivene, P. Arbués, O. Gratacos, S. Tavani, and J. A. Muñoz, "Supervised identification and reconstruction of near-planar geological surfaces from terrestrial laser scanning," *Computers & Geosciences*, vol. 37, no. 10, pp. 1584-1594, Oct. 2011. DOI: 10.1016/j.cageo.2011.03.007.
- [12] J. K. Pringle, J. A. Howell, D. Hodgetts, and A. R. Westerman. (2006) Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art. *First Break*. 33-42.
- [13] R. M. Phelps and C. Kerans, "Architectural Characterization and Three-Dimensional Modeling of a Carbonate Channel Levee Complex: Permian San Andres Formation, Last Chance Canyon, New Mexico, U.S.A.," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 77, no. 11, pp. 939-964, Nov. 2007. DOI: 10.2110/jsr.2007.085.
- [14] D. Kurtzman, J. A. El Azzi, F. J. Lucia, J. Bellian, C. Zahm, and X. Janson, "Improving fractured carbonate-reservoir characterization with remote sensing of beds, fractures, and vugs," *Geosphere*, vol. 5, no. 2, pp. 126-139, Apr. 2009. DOI: 10.1130/GES00205.1
- [15] A. Rotevatn, S. J. Buckley, J. A. Howell, and H. Fossen, "Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study," *AAPG Bulletin*, vol. 93, no. 3, pp. 407-427, Mar. 2009. DOI: 10.1306/09300807092.
- [16] H. D. Enge, S. J. Buckley, A. Rotevatn, and J. A. Howell, "From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures," *Geosphere*, vol. 3, no. 6, pp. 469-490, Dec. 2007. DOI: 10.1130/GES00099.1.
- [17] E. P. Baltsavias, E. Favéy, A. Bauder, H. Bosch, and M. Pateraki, "Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring," *Photogrammetric Record*, vol. 17, no. 98, pp. 243-270, Oct. 2001. DOI: 10.1111/0031-868X.00182.
- [18] J. A. Bellian, C. Kerans, and D. C. Jennette, "Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 75, no. 2, pp. 166-176, Mar. 2005. DOI: 10.2110/jsr.2005.013.
- [19] R. M. Silva, L. C. Incencio, L. Jacobi, D. Lamberty, F. M. Tognoli, and M. R. Veronez, "LIDAR for visualization of 3D geological models," *Coordinates*, vol. 8, no. 1, Jan. 2012.
- [20] J. A. Bellian, R. Beck, and C. Kerans, "Analysis of hyperspectral and lidar data: Remote optical mineralogy and fracture identification," *Geosphere*, vol. 3, no. 6, pp. 491-500, Dec. 2007. DOI: 10.1130/GES00097.1.
- [21] R. R. Jones, S. Kokkalas, and K. J. W. McCaffrey, "Quantitative analysis and visualization of nonplanar fault surfaces using terrestrial laser scanning (LIDAR)-The Arkitsa fault, central Greece, as a case study," *Geosphere*, vol. 5, pp. 465-482, Dec. 2009.
- [22] I. Fabuel-Perez, D. Hodgetts, and J. Redfern, "A New Approach for Outcrop Characterization and Geostatistical Analysis of a Low-Sinuosity Fluvial-Dominated Succession Using Digital Outcrop Models: Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, Central High Atlas, Morocco," *Aapg Bulletin*, vol. 93, no. 6, pp. 795-827, Jun. 2009. DOI: 10.1306/02230908102.
- [23] Q. Feng, P. Sjögren, O. Stephansson, and L. Jing, "Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station," *Engineering Geology*, vol. 59, no. 1-2, pp. 133-146, Jan. 2001. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00070-3.
- [24] A. K. L. Kwong, H. Kwok, and A. Wong, "Use of 3D Laser Scanner for Rock Fractures Mapping," presented at the FIG Working Week 2007, Hong Kong SAR, China, 2007.
- [25] O. Fernández, "Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data," *Journal of Structural Geology*, vol. 27, no. 5, pp. 855-858, May. 2005. DOI: 10.1016/j.jsg.2004.12.004.
- [26] N. H. Woodcock, "Specification of Fabric Shapes Using an Eigenvalue Method," *Geological Society of America Bulletin*, vol. 88, no. 9, pp. 1231-1236, 1977. DOI: 10.1130/0016-7606(1977)88<1231:SOFSA>2.0.CO;2.
- [27] W. Wildner, F. V. Orlandi, and L. E. Giffoni. (2004, 10/10/2011). *Excursão Virtual aos Aparados da Serra, RS/SC: aspectos geológicos e turísticos cânions do Itaimbezinho e Fortaleza*. Available: <http://www.cprm.gov.br/Aparados/index.htm>
- [28] H. T. Frank, "Gênese e Padrões de Distribuição de Minerais Secundários na Formação Serra Geral (Bacia do Paraná)," Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.