

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

**VISUALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE
AFLORAMENTOS UTILIZANDO *LASER SCANNER* TERRESTRE**

SÃO LEOPOLDO

2011

Fabiano Ferrari

**VISUALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE
AFLORAMENTOS UTILIZANDO *LASER SCANNER* TERRESTRE**

Dissertação apresentada ao 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), como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Maurício Roberto Veronez

São Leopoldo

2011

F375v Ferrari, Fabiano
Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando
laser scanner terrestre / por Fabiano Ferrari. -- São Leopoldo, 2011.

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

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de
Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, RS, 2011.

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

1.Geologia. 2. Sistemas de informação geográfica. 3.Levantamento
georreferenciado – Laser scanner. 4. Mapeamento geológico – Laser scanner.
5.Modelos digitais de afloramentos. I.Veronez, Maurício Roberto. II.Título.

CDU 55
528.4
528.5

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

Fabiano Ferrari

**VISUALIZAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE
AFLORAMENTOS UTILIZANDO *LASER SCANNER* TERRESTRE**

Dissertação apresentada ao 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), como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre

APROVADO EM ___ \ ___ \ _____

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Ubiratan Ferrucio Faccini – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Prof. Dr. João Carlos Chaves - Universidade Estadual Paulista – UNESP – Presidente Prudente

Dedico a minha família, Aracéli, Gabriel e Paola, que sempre me apoiaram e aos colegas da Ferrari Topografia.

AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS pelo apoio financeiro conforme Termo de Cooperação: 0050 0044869.08.4 - SAP: 4600285973.

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

À Ferrari Topografia pelo apoio financeiro às atividades de campo e escritório.

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

RESUMO

O sistema LIDAR obtém nuvens de pontos georreferenciadas que podem ser convertidas em Modelos Digitais de Afloramentos (MDAs). Os pulsos de laser são gerados e emitidos por um Laser Scanner Terrestre, que atinge a superfície do afloramento em diferentes pontos. Estes objetos refletem o pulso incidente, que volta para o equipamento. Com isso, a distância entre o sensor e o objeto é determinada com base no intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do pulso. Para fins de Modelagem Digital de Afloramentos (MDA) o uso dessa técnica é recente e necessita do desenvolvimento de pesquisas. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi estabelecer uma sequência de métodos envolvendo a aquisição e processamento de nuvem de pontos e a visualização e interpretação de superfícies e volumes de um Modelo Digital de Afloramentos (MDA). A Rocha da Pedra Pintada, localizado no Rio Grande do Sul na Cidade de Caçapava do Sul, foi imageado a partir de 7 estações e a nuvem totalizou 17 milhões de pontos, que foi convertida, após processamento, em um MDA. Para a interpretação geológica, utilizou-se a técnica de ortorretificação para sobrepor a nuvem de pontos a fotografias de alta resolução do afloramento, o que agregou qualidade na visualização e interpretação do MDA. Dificuldades nas etapas de tratamento dos dados ocorreram em razão do grande volume de dados, da ausência de recursos de otimização de processamento e da limitação no gerenciamento de banco de dados. Além disso, faz-se necessário desenvolver um aplicativo eficiente de visualização tridimensional com ferramentas específicas de interpretação geológica.

Palavras-chave: LIDAR. Visualização e Interpretação Geológica. Imagens. Pedra Pintada. Bacia do Camaquã.

ABSTRACT

The LIDAR system provides georeferenced clouds with thousand-to-million of points which can be converted in digital outcrops models. A laser beam is emitted and captured by a laser scanner after reaching an outcrop in many different positions. Based on the travel time between sensor and outcrop it is possible to determine the position of each point with high accuracy. This technique is still a novelty for applied studies in Geology, especially in Digital Outcrop Models (DOMs), being necessary research and development. Thus, the goal of this work was establish a workflow concerning acquisition and processing of point clouds, and visualization and geological interpretation of DOMs. The Pedra Pintada, located in the state Rio Grande do Sul in the city Caçapava do Sul outcrop was imaged from seven different stations and the cloud has 17 million points, converted in a DOM after processing. The geological interpretation was made possible by the orthorectification technique, in which a high resolution photograph overlies the point cloud and the visual quality is obtained. The huge volume of data, the lack of optimized processing resources and the inadequate dataset management became visualization and interpretation of DOMs a difficult task. Furthermore, it is necessary to develop a software with an efficient tridimensional visualization system with specific tools for geological interpretations.

Keywords: LIDAR. Geological Visualization and Interpretations. Images. Pedra Pintada. Camaquã-Basin.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Localização da Rocha Pedra Pintada, Caçapava do Sul-RS..... | 16 |
| Figura 2 - Fotomontagem de uma das faces da Pedra Pintada adquirida com o Laser Scanner e ajustada com <i>softwares</i> de imagens..... | 17 |
| Figura 3 - Fluxograma que mostra as diferentes etapas entre o planejamento do imageamento, aquisição, processamento, geração e interpretação do MDA e exportação dos dados..... | 18 |
| Figura 4 - Equipamentos utilizados na etapa de imageamento. (A) <i>Laser Scanner</i> Terrestre Optech; (B) Receptor GNSS..... | 21 |
| Figura 5 - Estações de imageamento com o Laser Scanner rastreadas com o sistema GNSS. | 22 |
| Figura 6 - Laser Scanner Terrestre integrado com sistema GNSS (estação SCAN 6) imageando uma das faces do afloramento. | 23 |
| Figura 7 - Comparação entre uma fotomontagem (A) e o Modelo Digital da Rocha Pedra Pintada (B)..... | 25 |
| Figura 8 - MDA segmentado em seções transversais (A) e longitudinais (B) feitas no 3D <i>Reshaper</i> , ambas espaçadas de 1m para posterior conversão das interseções das seções em pontos e importação no GOCAD. | 26 |
| Figura 9 - Interpretação do MDA. A) imagem ortorretificada sobreposta à nuvem de pontos. B) Superfície eólica interpretada, após a exclusão da imagem ortorretificada. | 28 |
| Figura 10 - Interpretação de superfícies estratigráficas e estratificações cruzadas no MDA. A) Nuvem de pontos sobreposta à imagem ortorretificada e interpretada. B) Nuvem de pontos rotacionada com as interpretações realizadas em A. | 29 |
| Figura 11 - Nuvem de pontos com interpretações geológicas vista no aplicativo GOCAD. | 30 |

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

2D - Bidimensional

3D - Tridimensional

CAD - *Computer Aided Design*

CPU - Unidade de Processamento Central

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

GPU - *Graphic Processing Unit*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ILIRIS - *Intelligent Laser Ranging and Imaging System*

Km - Quilômetro

LANDSAT - *Land Remote Sensing Satellite*

LIDAR - *Light Detection and Ranging*

M - Metros

MDA - Modelo Digital de Afloramento

NE - Nordeste

POAL - Estação GPS Porto Alegre de monitoramento contínuo

RAM - *Random-access memory*

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RGB - *Red, Green, Blue*

SMAR - Estação GPS Santa Maria de monitoramento contínuo

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 LASER SCANNER EM ESTUDOS GEOLÓGICOS | 14 |
| 3 ÁREA DE ESTUDO | 15 |
| 4 MÉTODOS..... | 17 |
| 4.1 AQUISIÇÃO | 19 |
| 4.1.1 Estruturação da Rede de Apoio Geodésico | 20 |
| 4.1.2 Imageamento com Laser Scanner Terrestre..... | 22 |
| 4.2 PROCESSAMENTO..... | 23 |
| 4.3 INTERPRETAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE AFLORAMENTO..... | 25 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 26 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 32 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 34 |

CONTEXTUALIZAÇÃO

A ferramenta Laser Scanner 3D Terrestre é capaz de capturar algumas centenas de milhões de pontos com coordenadas tridimensionais. Para gerar coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, o equipamento emite pulsos laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso atinge o objeto e parte dessa energia volta para o sistema. Portanto, com essa energia que volta pode-se medir a distância entre o sensor e o objeto.

O princípio supracitado é o mesmo utilizado pelo equipamento utilizado nessa pesquisa - ILRIS 3D – Optech que possui as seguintes especificações técnicas:

- Acurácia de Alcance: até 7 mm;
- Acurácia de Posição: até 8 mm;
- Alcance: de 3 m a mais de 1 Km;
- Campo de Visão: 40° x 40°;
- Freqüência: 2 KHz;
- Comprimento de Onda Laser (λ): 1500 nm;
- Classe Laser: classe 1 (inofensivo aos olhos);
- Câmara Digital Acoplada: 6.6 MegaPixel (CMOS Sensor);
- Peso do Scanner: 13 Kg;
- Duração das Baterias: - 3 horas.

O sistema de operação do equipamento possui uma boa interface, onde pode-se fazer o controle das configurações através de um Pocket PC ou mesmo de um Notebook. Não exige a conexão por cabos, onde esta pode ser realizada sem fios através de wireless e ainda armazena todos os dados adquiridos em memória com o uso *Pen Drive* por possuir conexão USB (*Universal Serial Bus Controllers*). (BARCHIK, E.; MOSER, I.; SANTOS, D.S. DOS; MARTINS, B.D. 2007)

O sistema Laser Scanner é uma tecnologia que permite a obtenção de dados tridimensionais (X, Y e Z) de nuvem de pontos, que podem ser georreferenciadas com o uso de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), além de agregar informações de textura e cor em função de uma câmera fotográfica acoplada ao equipamento. Em função disso vem sendo difundida em diversos setores da sociedade. No Brasil, nas áreas de engenharia, cartografia e arquitetura, tal técnica já está bem consolidada.

Especificamente em Modelagem Digital de Afloramentos (MDA) as pesquisas ainda são incipientes necessitando o aprimoramento da técnica principalmente no que tangem ao processamento, integração e manipulação de dados.

No Brasil a aplicação de Laser Scanner na MDA está em fase de desenvolvimento, e existem muitas análises a serem estudadas e comparadas com os métodos tradicionais para

verificar o ganho de tempo e a qualidade na obtenção dos dados que essa ferramenta pode propiciar.

As técnicas tradicionais baseiam-se em atividades de campo, como visualização e descrição *in loco*, raspagem do afloramento com o uso de ferramentas de corte e obtenção de amostras. Em alguns casos é necessário o uso da técnica de rapel para se fazer a análise do perfil sedimentológico.

A utilização do Laser Scanner para MDA tem sido introduzida recente em trabalhos de campo, para estudos geológicos e que ainda existem metodologias a serem definidas, devido a curto espaço de tempo de uso dessa ferramenta, que vem ganhando popularidade entre os geocientistas. É um método eficiente na obtenção de medidas com alta-resolução de um afloramento possibilitando observar no modelo gerado os níveis de contraste facilitando o processo de interpretação geológica.

O Laser Scanner Terrestre permite a construção de um MDA onde pode-se adicionar atributos como cor, intensidade do laser entre outros, possibilitando ao Geólogo interpretar várias informações e realizar medições precisas do afloramento.

Os métodos tradicionais de descrição de afloramentos podem acarretar erros, principalmente em afloramentos com dificuldades de acesso, distorcendo observações ao correlacionar com dados geológicos. Porém, a combinação de novas tecnologias pode ser integrada às medições de campo que podem auxiliar na interpretação e análise de informações.

Para a medição e classificação das características geológicas do afloramento, advindas do Laser Scanner, é necessária a combinação de ferramentas como programas de manipulação de dados 3D e de classificação de informações do MDA, que facilitam a visualização e interpretação de um modelo geológico. Assim, é importante enfatizar da importância de combinação do tradicional trabalho de campo (interpretação de geometria, litologia, tamanho dos grãos, estrutura sedimentar e informações de paleocorrente) com os dados analisados na nuvem de pontos do Laser Scanner Terrestre.

A interpretação de fácies no MDA, em alguns casos, pode ser complicada porque a resposta visual das informações muitas vezes acaba sendo mascarado por fatores diversos, e nesse caso, o trabalho de campo é imprescindível para auxiliar na identificação de detalhes que não podem ser observadas no MDA.

Pesquisas na área de modelagem de corpos geológicos utilizando produtos advindos de uma técnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*) vêm favorecendo a interpretação, a comparação e a quantificação de continuidades laterais, além de indicar direções de fluxos de

sedimentos. Porém, neste estudo efetuado com o Laser Scanner modelo Ilris 3D, concluiu-se que algumas variáveis são importantes para a qualidade do trabalho. Para que se possa ter uma visão do afloramento baseado na nuvem de pontos é importante que, no momento do imageamento, a luz solar esteja incidindo diretamente sobre o objeto a ser trabalhado. Assim, podem-se evitar áreas com sombras ou pouca luz, pois a fotografia capturada pelo equipamento é de média resolução/qualidade.

Caso estas condições não estejam tão favoráveis, a mesma pode ser trabalhada utilizando algumas técnicas de processamento digital de imagens (manipulação do contraste, brilho, intensidade, etc.) antes de ser processada com a nuvem de pontos. Este procedimento pode melhorar consideravelmente o resultado final do trabalho.

É importante salientar que tanto a nuvem de pontos quanto o modelo triangulado podem ser utilizados para a interpretação geológica. Em alguns casos, onde seja mais importante identificar feições pelas diferenças de cores, a nuvem de pontos é a mais indicada para ser utilizada. Nos casos em que a forma das feições é o objeto central a ser analisado, o modelo triangulado passa a ser o melhor material de trabalho.

Após o término dos processamentos dos dados do afloramento estudado nesse trabalho, foram realizados testes de integração com um software de modelagem geológica (GOCAD), para que os pesquisadores pudessem trabalhar e integrar as informações, gerando até mesmo novos produtos de acordo com sua necessidade.

Ficou evidenciada a necessidade de desenvolvimento de rotinas e programas mais específicos para a modelagem geológica, pois os aplicativos testados não suportam a manipulação de tantas variáveis geradas pelo laser scanner (coordenadas tridimensionais + coloração dos pontos).

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas na área de modelagem de corpos geológicos cada vez mais incorporam métodos de geração de modelos tridimensionais, de forma a favorecer a visualização, a parametrização e a interpretação. Esses modelos têm potencial para incrementar a qualidade da interpretação geológica, mas ainda necessitam de pesquisas que envolvam diferentes áreas do conhecimento, como a Geologia e a Informática. Com o avanço tecnológico em hardware e software, ocorreu uma melhoria significativa na aquisição e processamento de dados. Atualmente, estão disponíveis no mercado vários equipamentos e aplicativos, como aqueles associados à técnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*) na qual enquadra-se o *Laser Scanner Terrestre (Terrestrial Laser Scanner)*. No entanto, a simples utilização desses equipamentos e aplicativos não é suficiente para solucionar problemas geológicos, sendo necessárias pesquisas que integrem e otimizem as etapas de aquisição, processamento, visualização e interpretação.

Uma comparação que pode ser usada é a da Fotogrametria, que evoluiu com a substituição de máquinas fotográficas tradicionais de filmes e de processos mecânicos para as máquinas digitais de alta resolução. Com o desenvolvimento de aplicativos de processamento, a Fotogrametria passou a ter aplicações em Geomorfologia, Glaciologia e Geologia (Baltsavias *et al*, 2001; Enge *et al*, 2007). Outra técnica que evoluiu rapidamente foi o georreferenciamento de informações geológicas por meio do Sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Tal sistema vem permitindo de uma maneira mais eficiente, tanto em exatidão quanto em ganho de tempo, integrar diferentes produtos geológicos em um único sistema de referência, garantindo uma maior integridade nos processos de geração de modelos geológicos tridimensionais (Pringle *et al*, 2004; Thurmond *et al*, 2005; White & Jones, 2008).

Modelos digitais tridimensionais têm aplicações diversas e sua utilização vem crescendo no cenário mundial, em especial aqueles obtidos a partir de *Laser Scanner* Terrestres. No Brasil, ainda são poucos os estudos que discutem as vantagens, os métodos de trabalho e as aplicações dessa ferramenta (Freire, 2006; Barchik *et al.*, 2007; Wutke & Centeno, 2007; Teixeira, 2008; Centeno *et al.*, 2010; Jacobi *et al.*, 2010). Nesse contexto, é indispensável desenvolver e implementar procedimentos e métodos para a modelagem digital de afloramentos (MDAs) com o uso de *Laser Scanner* Terrestre. Esse trabalho contribui para sistematizar as atividades de aquisição e processamento de nuvens de pontos, além da visualização e interpretação de MDAs.

2 LASER SCANNER EM ESTUDOS GEOLÓGICOS

A representação digital nos estudos geológicos evoluiu a partir de estudos com imagens de satélite LANDSAT, de modelos digitais de terrenos conjugados com processamento de imagens (*e.g.*, Arnot *et al.*, 1997) e de técnicas de aerofotointerpretação conjugada com os sistemas de navegação global (GNSS) (*e.g.*, Maerten *et al.*, 2001). Nos últimos dez anos vêm crescendo o uso de tecnologias de mapeamento digital, em especial com o uso de *Laser Scanner* Terrestre e equipamentos de levantamento topográfico, integrados com os sistemas de navegação por satélite e de informações geográficas (Xu *et al.*, 2000, 2001; Alfarhan *et al.*, 2008), que substituem com inúmeras vantagens os mosaicos fotográficos (fotomontagens), rotineiramente utilizados na interpretação de afloramentos de grandes dimensões.

A ferramenta *Laser Scanner* Terrestre é capaz de capturar centenas de milhões de pontos georreferenciados. Para definir coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície, o equipamento emite pulsos *laser* com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso atinge o objeto e parte da energia do pulso volta para o equipamento. Com base no tempo envolvido

entre a emissão e o retorno do pulso, é possível medir a distância entre o sensor e o objeto. Tendo-se um ponto com coordenadas conhecidas na fonte do pulso, pode-se calcular a coordenada de cada ponto obtido pelo *Laser Scanner*. Com base nesse princípio simples, o estudo de afloramentos ganha um novo impulso com a possibilidade de quantificação de dados antes estimados ou mesmo ignorados em razão da impossibilidade de acesso.

O uso da tecnologia LIDAR em estudos de afloramentos vem se expandindo em função da facilidade na aquisição de dados georreferenciados de forma precisa, rápida e automatizada, em especial com a utilização de *Laser Scanner* Terrestres. Sua utilização para esse fim começou há cerca de uma década (Bellian *et al.*, 2002), mas somente nos últimos anos o número de artigos científicos aumentou significativamente. Os temas de interesse são variados, com destaque para as abordagens metodológicas (Bellian *et al.*, 2005; Enge *et al.*, 2007; Buckley *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2008; White & Jones, 2008), estudos de análogos de reservatórios (Pringle *et al.*, 2004; Phelps & Kerans, 2007; Fabuel-Perez *et al.*, 2009; Kurtzman *et al.*, 2009; Rotevatn *et al.*, 2009; Verwer *et al.*, 2009; Enge & Howell, 2010; Fabuel-Perez *et al.*, 2010), de rochas fraturadas (Bellian *et al.*, 2007; Olariu *et al.*, 2008; Jones *et al.*, 2009; Zahm & Hennings, 2009), de taxas de erosão (Wawrzyniec *et al.*, 2007), de modelos sísmicos sintéticos (Janson *et al.*, 2007); na visualização de patrimônios geológicos (Bates *et al.*, 2008); na determinação do sentido do fluxo de lavas basálticas (Nelson *et al.*, 2011) e no ensino em geologia (McCaffrey *et al.*, 2008, 2010).

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no Brasil, no município de Caçapava do Sul, região central do Rio Grande do Sul, há aproximadamente 300 km da capital Porto Alegre (Fig. 1). O acesso a partir de Porto Alegre se dá pelas rodovias BR-290, BR-153 e RS-625, essa última próxima à

localidade de Minas do Camaquã. A Rocha Pedra Pintada foi escolhida como objeto desse estudo em razão de sua excelente exposição. As faces íngremes e relativamente pouco vegetadas no seu entorno, a existência de áreas amplas próximas ao afloramento, a presença de estruturas sedimentares com dimensões métricas e a existência de superfícies estratigráficas nítidas foram os elementos principais considerados para o imageamento.

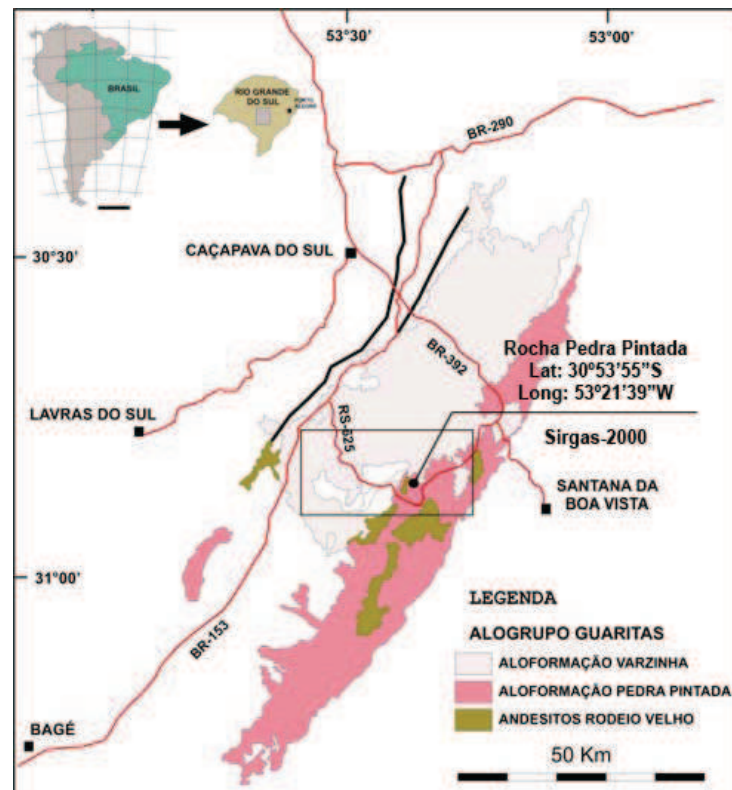


Figura 1 - Localização da Rocha Pedra Pintada, Caçapava do Sul-RS.
Fonte: Paim *et al.* 2010.

O afloramento é formado por arenitos finos a médios, bem selecionados, constituídos de grãos bem arredondados e com alta esfericidade, estruturados em *sets* com estratificação cruzada de até 15 metros de espessura (Fig. 2) (Paim & Scherer, 2003; Paim *et al.*, 2010). Níveis sílticos e argilosos com espessuras centimétricas a milimétricas podem ocorrer no interior dos *sets*, por vezes associados a gretas de contração (Paim & Scherer, 2003). Tais arenitos representam fácies eólicas associadas a campos de dunas simples e compostas de formato crescente cuja migração ocorria no sentido NE, enquanto os intervalos síltico-

argilosos são interpretados como produtos de inundações flúvio-lacustres, que representam afogamentos periódicos desse paleodeserto (Paim & Scherer, 2003, 2007; Paim *et al.*, 2010).



Figura 2 - Fotomontagem de uma das faces da Pedra Pintada adquirida com o Laser Scanner e ajustada com *softwares* de imagens.

4 MÉTODOS

Apesar do grande potencial do *Laser Scanner* como uma ferramenta de aquisição e visualização de dados geológicos, os métodos para a utilização dessa ferramenta são variados e podem interferir positiva ou negativamente no processo de geração de modelos digitais de afloramentos. Faz-se necessário descrever minuciosamente o fluxo de trabalho a ser executado nas atividades de interesse, principalmente no que tange à coleta e processamento dos dados. Em função do tipo de aplicação deve-se planejar a atividade de aquisição como forma de otimizar os resultados pretendidos.

As características técnicas de um sistema LIDAR são importantes para definir as aplicações em estudos geológicos. Os principais elementos que devem ser considerados são o alcance, a precisão e os recursos em imagem. O correto posicionamento do equipamento em relação ao objeto, o georreferenciamento das estações de imageamento, a iluminação adequada do afloramento e a definição da resolução necessária para a visualização e interpretação do afloramento são apenas alguns dos elementos a serem considerados

previamente à etapa de imageamento. O imageamento de uma única cena de um afloramento representa um grande volume de dados, normalmente da ordem de vários milhões de pontos, contendo informações de coordenadas posicionais e da cor da superfície (padrão RGB), obtida com o uso da câmera fotográfica acoplada ao equipamento.

Para melhor entender a metodologia criada no trabalho, criou-se uma representação que enumera e põe em ordem todas as etapas. É possível seguir este fluxograma para repetir o processo (Fig. 3).

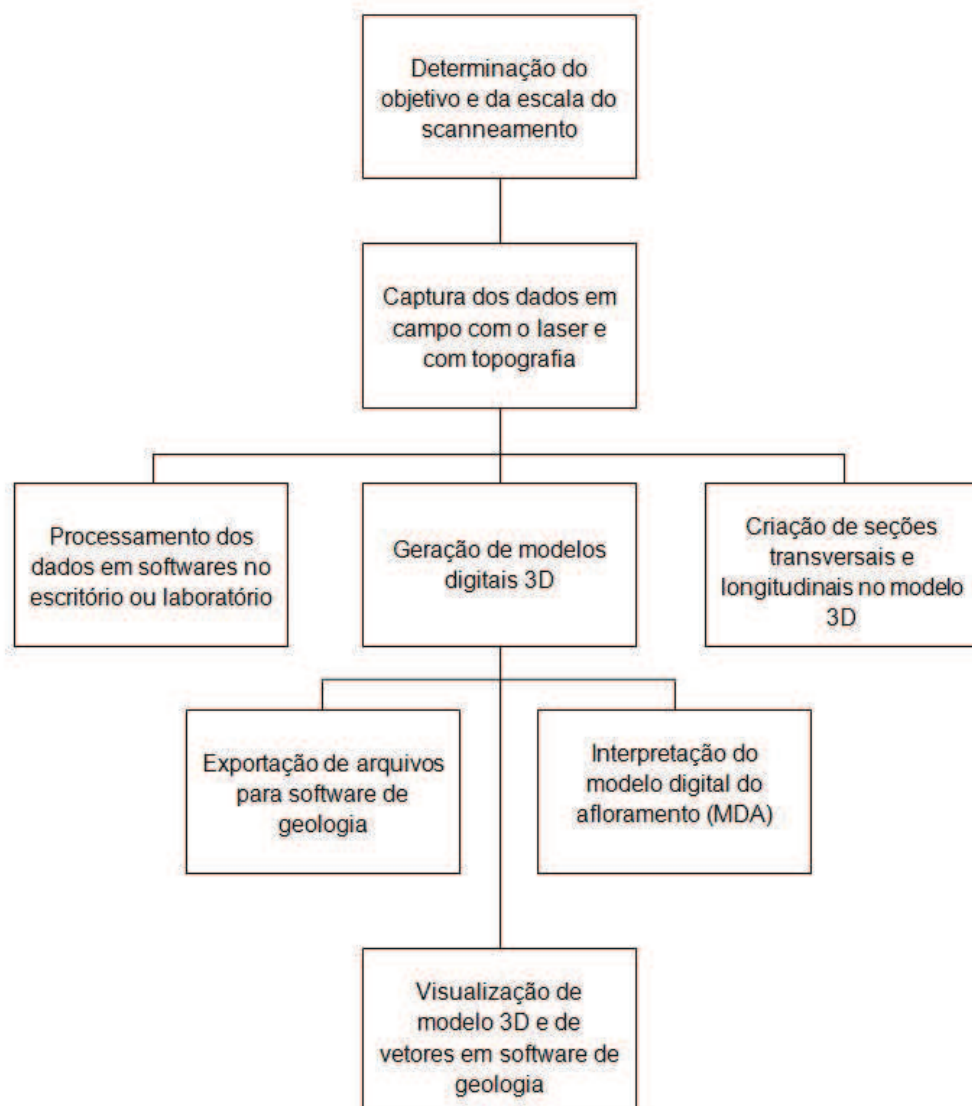


Figura 3 - Fluxograma que mostra as diferentes etapas entre o planejamento do imageamento, aquisição, processamento, geração e interpretação do MDA e exportação dos dados.

4.1 AQUISIÇÃO

O imageamento é um modo relativamente simples de obter um dado de um afloramento com alta-resolução, especialmente se comparado com a fotogrametria terrestre, onde muito planejamento e processamento são requeridos e o sucesso é mais sensível à geometria da imagem e aos níveis de contraste (Baltasavias *et al*, 2001). No que diz respeito a estudos de afloramentos é importante considerar a densidade de pontos a serem capturados. Assim, se faz necessário avaliar inicialmente a capacidade de *hardware*, tanto para o armazenamento de dados quanto para o processamento da nuvem de pontos.

Outro parâmetro a ser considerado no processo de imageamento é a capacidade da rocha a ser imageada em refletir a luz incidente, denominada de albedo. Os fabricantes informam em seus catálogos um alcance máximo do *laser* do equipamento, porém não informam que esse alcance só é possível com objetos com um albedo mínimo de 80 % (Riegl, 2009). Wehr & Lohr (1999) relataram que superfícies com rochas expostas geralmente têm um albedo de até 75%, sendo que as condições atmosféricas (ex: alto percentual de umidade e de aerossóis) podem dispersar a luz do *laser*, reduzindo o alcance máximo do mesmo.

Para os afloramentos com grandes dimensões, uma única estação de imageamento não é suficiente, principalmente pela existência de obstáculos e sombras na área a ser imageada. Portanto, se faz necessário definir um conjunto de estações para garantir um imageamento representativo do objeto de estudo. Outro elemento relevante é a posição do equipamento em relação ao afloramento. Se o instrumento está instalado em um ponto muito mais baixo que o afloramento (como ocorre em geral), então a linha de visão para todas as áreas da face fica prejudicada, em razão do posicionamento oblíquo entre o equipamento e o objeto a ser imageado. Portanto, é preferencial que o equipamento fique posicionado perpendicularmente à cena, como forma de minimizar efeitos de sombra e de não-aquisição de dados em razão das

irregularidades da superfície. Na impossibilidade de posicionar o equipamento adequadamente em relação ao afloramento, Labourdette & Jones (2007) salientam que a aquisição de dados a partir de técnicas fotogramétricas ou com *laser scanner* aerotransportados pode ser mais eficiente, ou mesmo podem ser usados para complementar o imageamento terrestre.

4.1.1 Estruturação da Rede de Apoio Geodésico

O processo de imageamento integrado ao sistema GNSS foi realizado a partir da definição de um ponto de referência próximo ao afloramento. Realizando seu transporte de coordenadas. Nesse ponto foi implantado um Marco Geodésico, que foi rastreado durante 4 horas com um equipamento de dupla frequência (L_1 , L_2), modelo Leica 900 (Fig. 3). Para o transporte de coordenadas foram utilizados como pontos de controle as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) das cidades de Santa Maria (SMAR) e Porto Alegre (POAL). Esse ponto foi ajustado com o *software* LGO e serviu de apoio para a obtenção das coordenadas geodésicas de sete estações utilizadas no imageamento da Pedra Pintada (Fig. 4).



Figura 4 - Equipamentos utilizados na etapa de imageamento. (A) *Laser Scanner* Terrestre Optech; (B) Receptor GNSS.

As coordenadas UTM de todas as estações de imageamento foram obtidas com um nível de exatidão menor que 10 mm. A preocupação com o nível de exatidão na obtenção das coordenadas geodésicas é de suma importância no processo de imageamento uma vez que o modelo 3D gerado proporcionará interpretações geológicas que poderão ser integradas com outros sensores remotos e todos os dados integrados servirão para a geração de modelos geológicos tridimensionais.

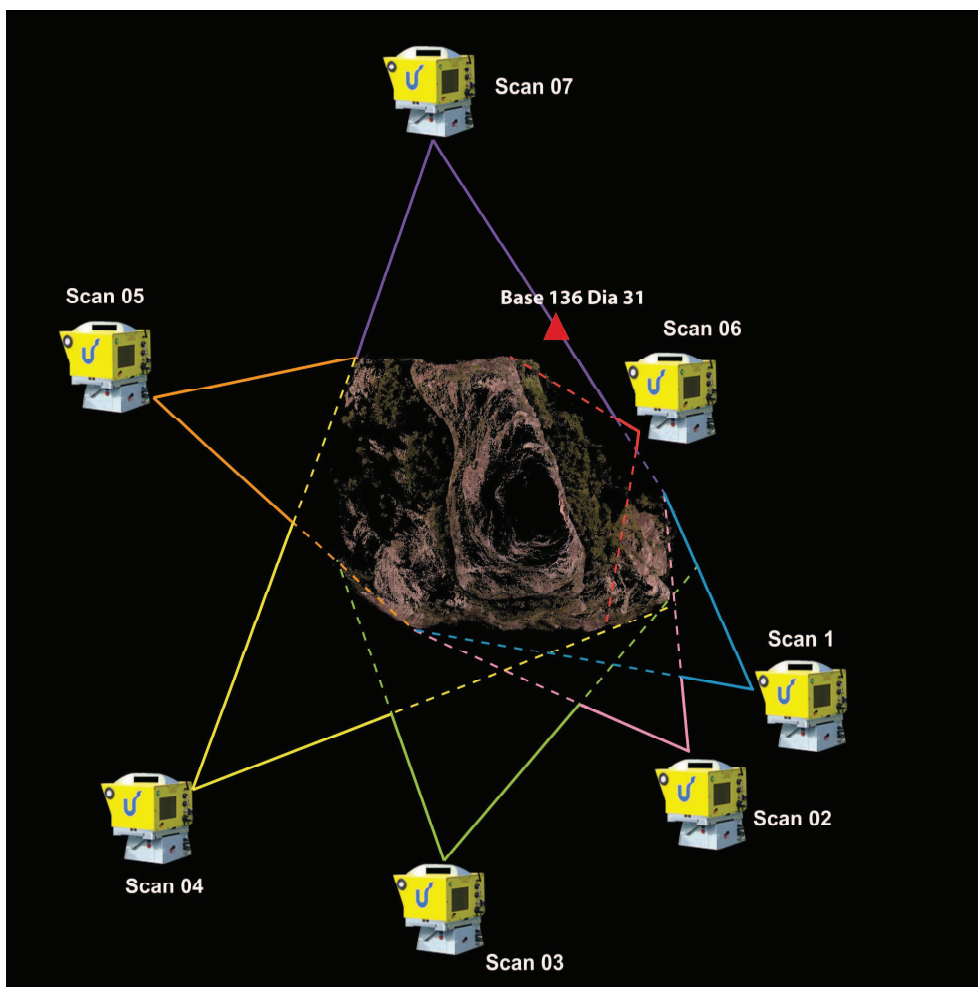


Figura 5 - Estações de imageamento com o Laser Scanner rastreadas com o sistema GNSS.

4.1.2 Imageamento com *Laser Scanner* Terrestre

Durante o trabalho de campo para o imageamento da Pedra Pintada o *Laser Scanner* Optech, modelo ILRIS-3D (*Intelligent Laser Ranging and Imaging System*) (Fig. 3) foi instalado nos 7 pontos da rede geodésica. O imageamento em cada ponto teve a duração de aproximadamente 40 minutos. Com o transporte do *scanner* de um ponto a outro, seu posicionamento e configuração levava-se aproximadamente 3 horas para cada imageamento, tendo sido necessários 3 dias de trabalho. Adotou-se como parâmetro para o imageamento do afloramento uma resolução de 4 centímetros, o que gerou uma nuvem com 17.000.000 de

pontos. As distâncias das estações de imageamento ao afloramento variaram de 170 a 320 metros.

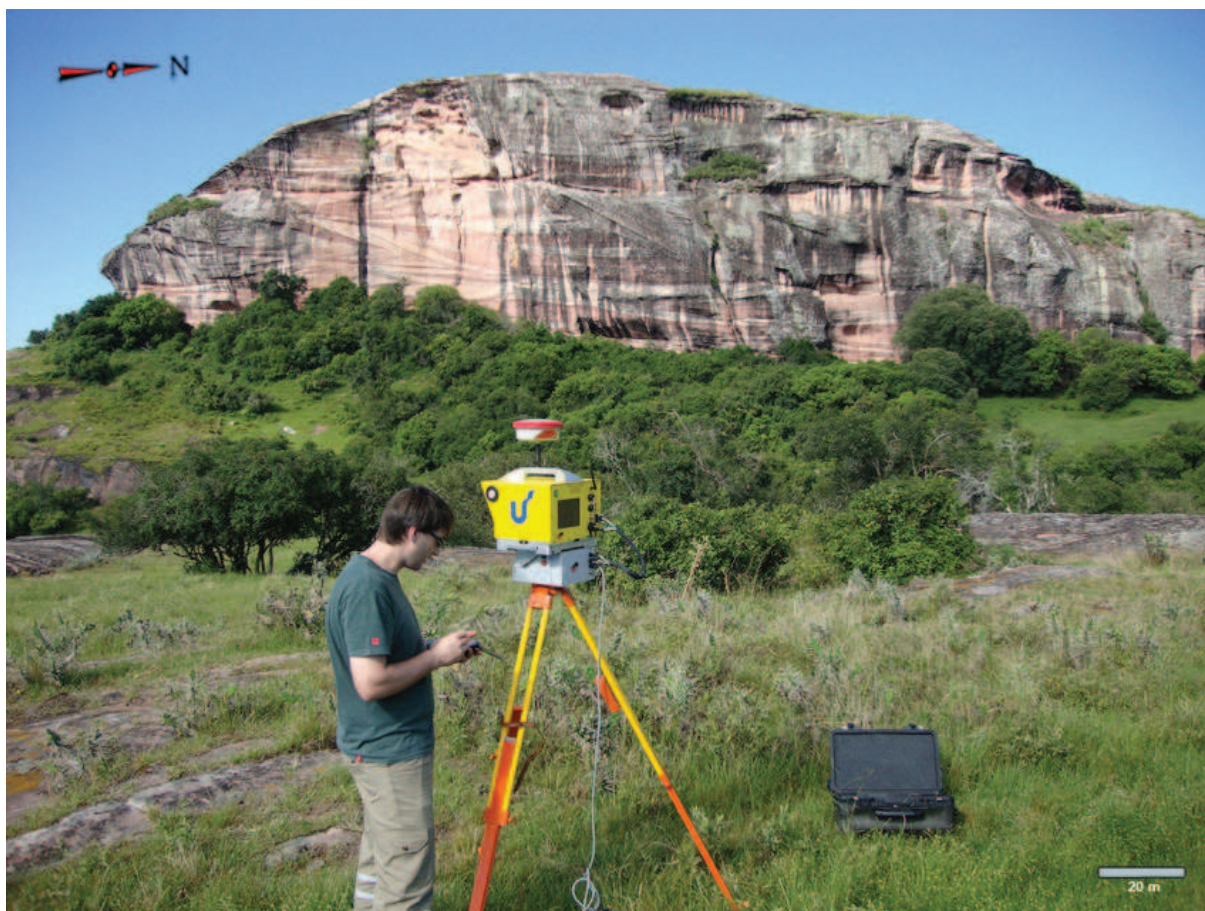


Figura 6 - Laser Scanner Terrestre integrado com sistema GNSS (estação SCAN 6) imageando uma das faces do afloramento.

4.2 PROCESSAMENTO

As nuvens de pontos processadas, embora representem o relevo do afloramento com precisão, não são suficientes no processo de interpretação geológica. É importante o uso de uma câmera fotográfica de alta-resolução integrada ao *Laser Scanner*. Isso vem a somar informações qualitativas, adicionando a cor do pixel ao ponto coletado. A imagem também pode ser usada como uma fonte adicional de medida. Mas, para tal, é necessário calibrar a câmera, bem como utilizar os parâmetros de distorção da lente (Wolf & Dewitt, 2000). A vantagem em se trabalhar com a câmera calibrada é que a nuvem de pontos pode ser

associada a uma imagem ortorretificada, desde que todas as informações estejam no mesmo sistema de referência de coordenadas.

Para a integração de dados geológicos no mesmo sistema de referência é fundamental uma rede de apoio geodésico. Para isso, se faz uso do sistema GNSS para garantir que a qualidade do georreferenciamento esteja intrinsecamente correlacionada com a exatidão da rede. A junção de diferentes cenas imageadas é um típico caso. Durante a aquisição, geralmente se faz uso de alvos, que não necessariamente têm que ser colocados no afloramento, mas, sim, em qualquer lugar desde que eles sejam visíveis de vários locais. Na prática, muitas vezes, ao invés de alvos, são utilizadas feições comuns nas cenas imageadas para a junção das mesmas (Buckley *et al*, 2008). Tal método proporciona um ganho de tempo nas atividades de campo especialmente quando os afloramentos são inacessíveis, mas dependem de um correto procedimento de obtenção de coordenadas das estações de imageamento.

O processamento da nuvem de pontos foi realizado em 3 etapas, utilizando-se os recursos dos aplicativos *PolyWorks*, *Parser* e *Point Cloud*, conforme descrito a seguir.

Limpeza – foram eliminados pontos referentes à vegetação e/ou obstruções que pudessem interferir na modelagem e interpretação do afloramento, bem como no tamanho do arquivo a ser processado;

Alinhamento e Georreferenciamento – foram executados os alinhamentos das cenas imageadas de todas as 7 nuvens de pontos obtidas a partir de cada estação para a junção em um único arquivo. De forma concomitante, realizou-se o georreferenciamento da nuvem de pontos, utilizando-se os dados obtidos no campo com o sistema GNSS;

Triangulação - foi executada a triangulação dos pontos para renderizar a superfície do afloramento, gerar o modelo digital tridimensional do afloramento e adicionar as informações de cores a esse modelo.

Após essas etapas, o MDA pode ser visualizado (Fig. 6) e, posteriormente, interpretado.

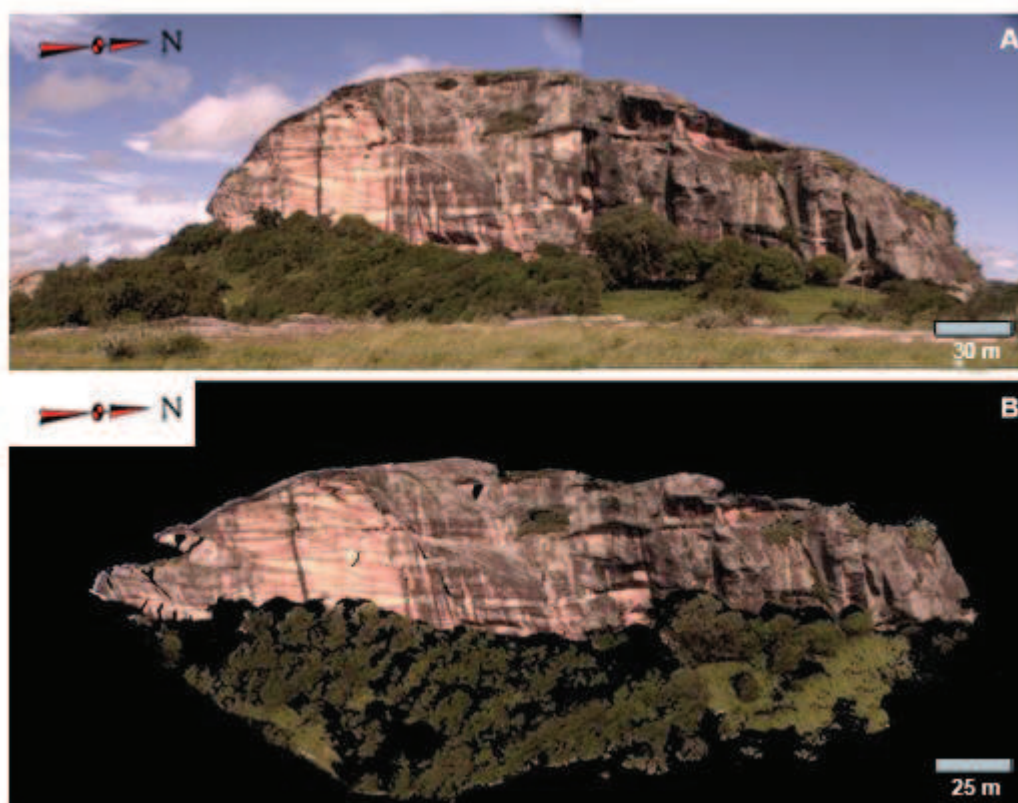


Figura 7 - Comparação entre uma fotomontagem (A) e o Modelo Digital da Rocha Pedra Pintada (B).

4.3 INTERPRETAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE AFLORAMENTO

As etapas de interpretação dos MDAs e a integração dos resultados com os aplicativos de modelagem geológica são o grande desafio na utilização da técnica LIDAR para estudos de afloramentos. Dentre os principais desafios a serem solucionados estão o processamento de grande volume de dados e o desenvolvimento de ferramentas de interpretação geológica incorporadas ao(s) aplicativo(s) onde os MDAs são visualizados e interpretados.

O MDA da Pedra Pintada foi interpretado utilizando-se um aplicativo de plataforma CAD denominado *Point Cloud Pro*, desenvolvido exclusivamente para manipular nuvens com grande quantidade de pontos. Com o *Point Cloud Pro* foi possível segmentar o afloramento (Fig. 8, 9 e 10) e demarcar feições geológicas identificadas de forma hierárquica. Nesse processo, utilizou-se a técnica de montagem para sobrepor uma imagem digital de alta

resolução ao MDA. Essa montagem foi executada pelo próprio software e apresentado um relatório de precisão melhor que 0,20 m. Os resultados obtidos na interpretação do MDA foram exportados em um formato que pode ser carregado e visualizado no aplicativo de modelagem geológica GOCAD.

A exportação do modelo para o GOCAD foi executada através dos softwares 3D *Reshaper*, CAD e conversor de arquivo vetorizados em pontos. Devido ao volume de dados em formato de nuvem de pontos, foi necessário exportar para o GOCAD somente o modelo digital da rocha e posteriormente os vetores da interpretação no *Point Cloud Pro*. O GOCAD não suportava o trabalho com nuvens de pontos e nem a junção da foto com a nuvem.

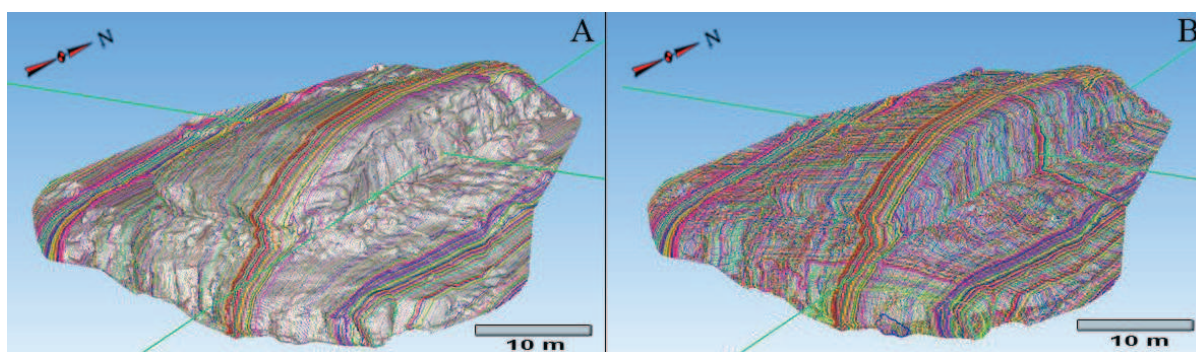


Figura 8 - MDA segmentado em seções transversais (A) e longitudinais (B) feitas no 3D *Reshaper*, ambas espaçadas de 1m para posterior conversão das interseções das seções em pontos e importação no GOCAD.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A grande vantagem de se utilizar o sistema LIDAR para a geração de MDAs é a possibilidade de se ter um modelo virtual 3D com qualidade de visualização suficiente para a análise e interpretação geológica. Além disso, permite interpretar áreas inacessíveis do afloramento com a mesma qualidade visual das áreas onde o geólogo pode acessar durante um trabalho de campo. Por ser um modelo tridimensional gerado a partir de uma nuvem de

pontos georreferenciada de alta densidade é possível estabelecer medidas precisas, como a altura, extensão, espessura de estratos sedimentares, orientação de planos etc.

A possibilidade de movimentar (isto é, inclinar, rotacionar etc) o modelo tridimensional permite que a interpretação seja coerente e precisa, pois de forma rápida pode-se conferir a continuidade de superfícies que estão sendo interpretadas em diferentes faces de um mesmo afloramento ou de afloramentos diferentes em uma mesma região. Essa é uma vantagem que o trabalho de campo convencional não possibilita em razão da limitação do campo visual que o ser humano possui em relação à distância do objeto de estudo ou às distâncias entre diferentes pontos da região de estudo.

O processo de ortorretificação foi incorporado na fase de interpretação do MDA por agregar qualidade visual, uma vez que o traço interpretativo é realizado com base em uma fotografia digital de alta resolução sobreposta à nuvem de pontos (Fig. 8). O emprego dessa técnica facilita o processo interpretativo uma vez que todo o traçado (Fig. 8A) está vinculado ao MDA, mas é realizado com base nos detalhes da fotografia digital. É importante salientar que, nesse caso, a foto serve apenas para orientar o traçado sobre o MDA, pois os segmentos são conectados nos pontos tridimensionais que estão atrás da imagem. O traçado conectado à nuvem de pontos pode-se ser melhor percebido com a desabilitação função da visualização da imagem ortorretificada (Fig. 8B).

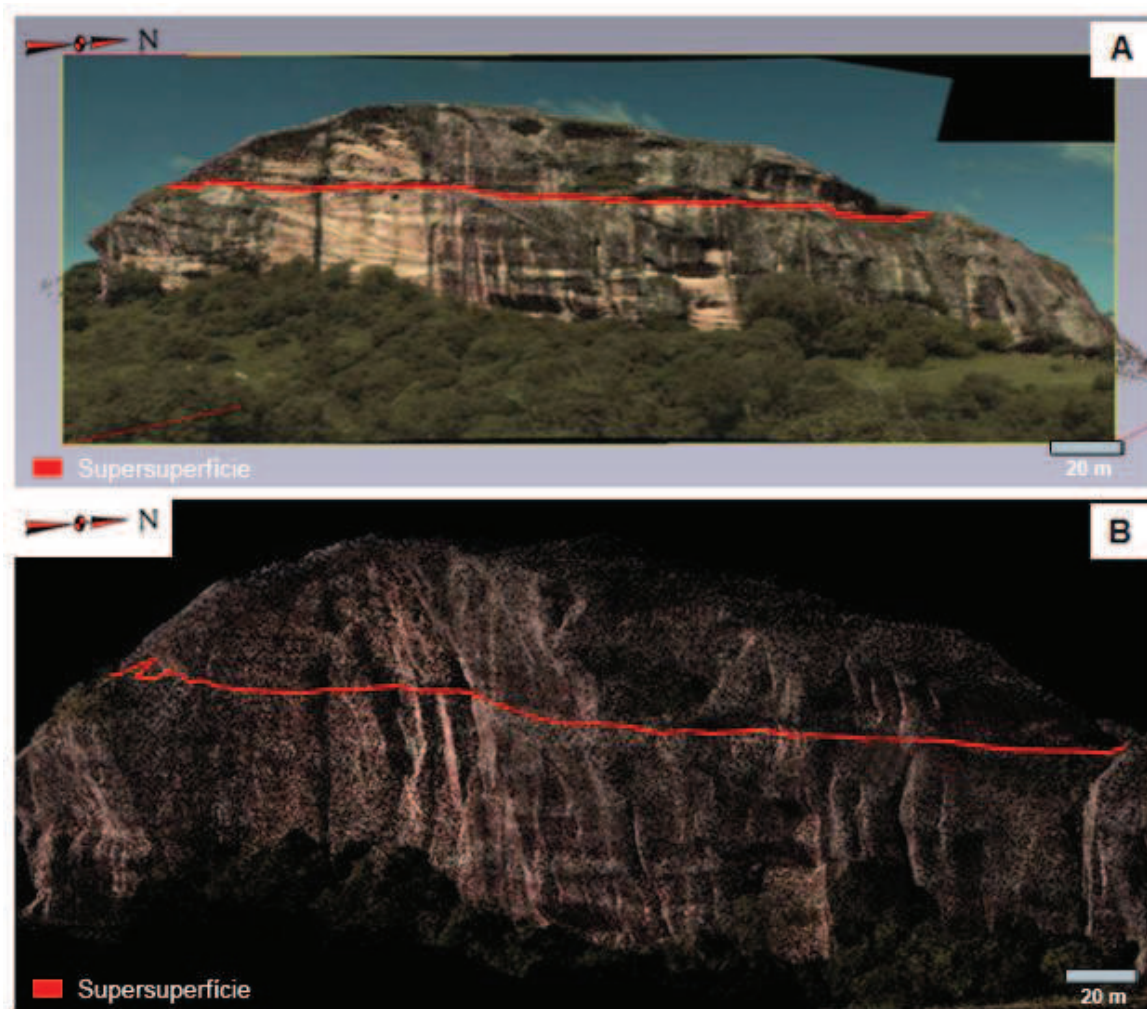


Figura 9 - Interpretação do MDA. A) imagem ortorretificada sobreposta à nuvem de pontos. B) Superfície eólica interpretada, após a exclusão da imagem ortorretificada.

A interpretação geológica foi realizada em um aplicativo desenvolvido com o propósito de manipulação e tratamento de nuvens de pontos, sendo por isso limitado em termos de ferramentas de interpretação geológica. Trata-se de um aplicativo desenvolvido em plataforma CAD com ferramentas de desenho limitadas a traçados de linhas, polilinhas, polígonos etc. A figura 9A ilustra a interpretação geológica do afloramento Pedra Pintada executada com as ferramentas do aplicativo *Point Cloud Pro*. Na figura 9B, o MDA interpretado está rotacionado como forma de mostrar que os traços de interpretação são tridimensionais e georreferenciados, permitindo assim que sejam exportados em formato adequado aos dos aplicativos de modelagem geológica, a exemplo do GOCAD. A figura 9C

mostra a nuvem de pontos renderizada pelo método da triangulação sobreposta pelos traços de interpretação geológica realizados no aplicativo *Point Cloud Pro*. Essa figura resulta do processo de exportação dos dados interpretados no MDA e importados no aplicativo GOCAD. Cabe salientar que o modelo visualizado no GOCAD está representado com todos os pontos coletados em campo com o *Laser Scanner Terrestre*. O MDA gerado foi convertido em um arquivo passível de importação no aplicativo de modelagem geológica GOCAD, que serviu de base para a sobreposição das interpretações geológicas realizadas no aplicativo *Point Cloud Pro*. Nesse processo de exportação e importação entre diferentes aplicativos, não foi possível a importação dos dados de cores associados ao MDA no aplicativo GOCAD, motivo pelo qual as interpretações geológicas são visualizadas sobre a superfície renderizada a partir da nuvem de pontos (Fig. 9C).

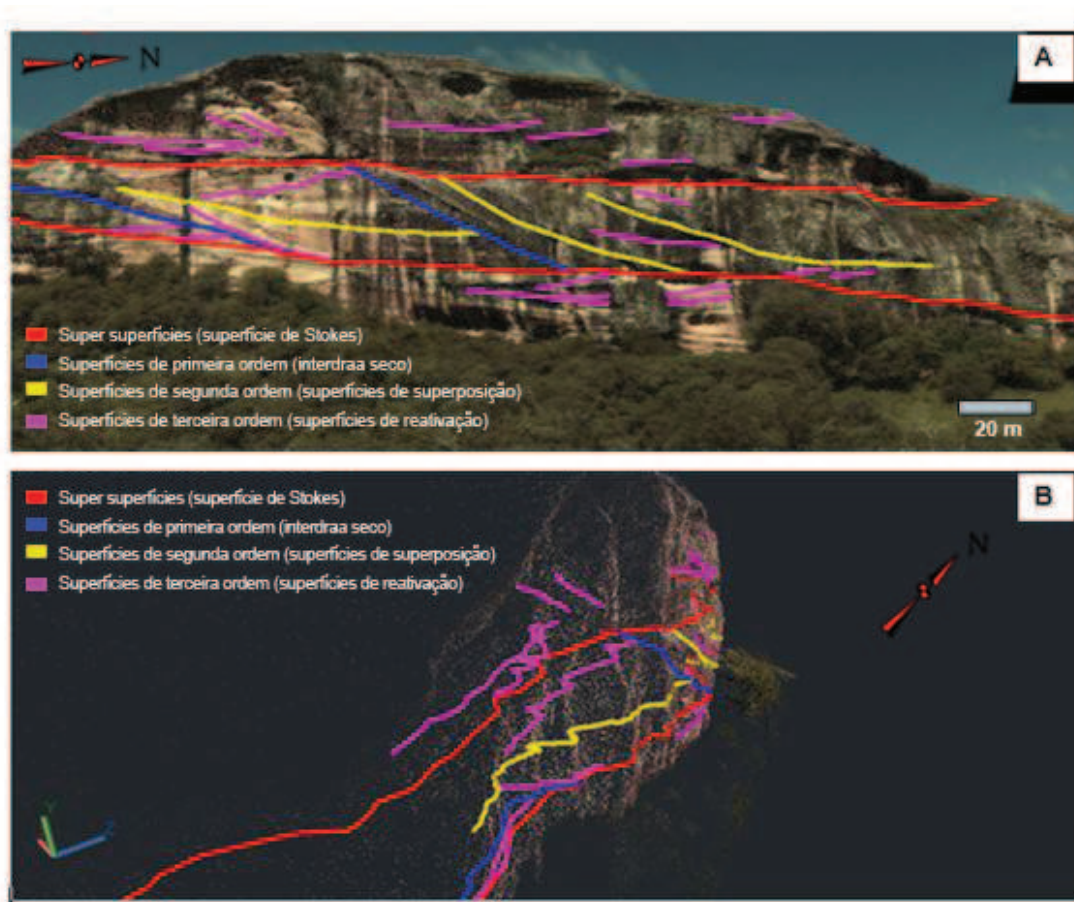


Figura 10 - Interpretação de superfícies estratigráficas e estratificações cruzadas no MDA. A) Nuvem de pontos sobreposta à imagem ortorretificada e interpretada. B) Nuvem de pontos rotacionada com as interpretações realizadas em A.

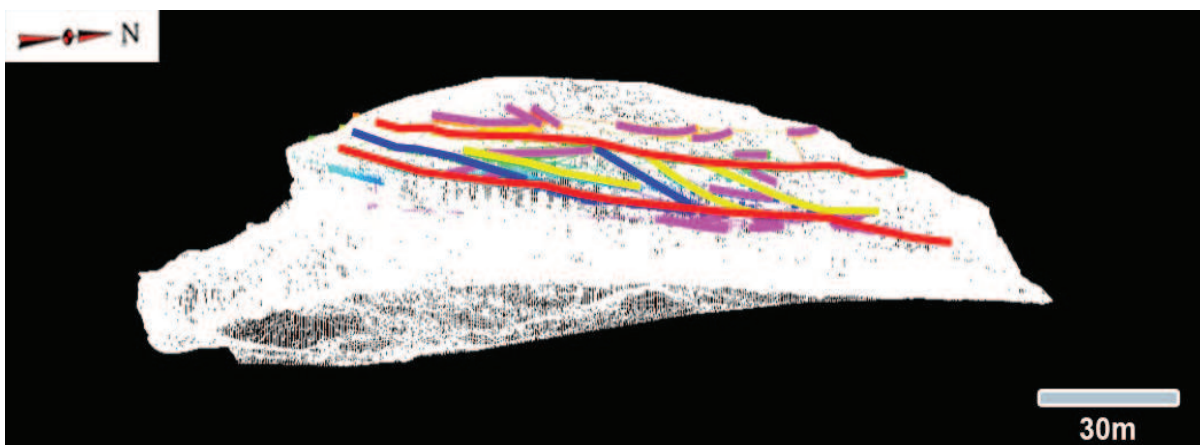


Figura 11 - Nuvem de pontos com interpretações geológicas vista no aplicativo GOCAD.

O *software Point Cloud Pro* quanto o GOCAD são sistemas desenvolvidos em unidade de processamento central (CPU), o que compromete o desempenho do hardware quando um grande volume de dados necessita de processamento simultâneo. Experiências realizadas com nuvens de pontos de tamanhos variados mostraram que o aumento da capacidade de processamento em hardware (ex: processadores multi-núcleo, memória RAM) não é diretamente proporcional ao aumento de eficiência necessário. Bellina (2009) desenvolveu um aplicativo de visualização baseado na renderização por pontos e em níveis de detalhamento (LOD) que permitiu manipular com rapidez um MDA com 130 milhões de pontos em um computador portátil convencional. Posteriormente, Gomes (2010) comparou diferentes configurações de hardware no processamento de uma nuvem com 21 milhões de pontos advindos de *Laser Scanner* Terrestre. Os resultados mostraram que o aumento de desempenho necessário às operações com MDAs foi obtido com unidades de processamento gráfico (GPU).

Mesmo com o desempenho comprometido ao manipular o modelo 3D durante o processo de interpretação geológica no sistema *Point Cloud Pro* foi possível demarcar superfícies estratigráficas e estratificações cruzadas de forma hierarquizada. A literatura geocientífica relata casos de autores que apenas conseguiram viabilizar a importação de MDAs obtidos a partir do sistema LIDAR em aplicativos de modelagem geológica após filtrarem a nuvem de

pontos, com a conseqüente redução do número de pontos da nuvem (Buckley *et al.*, 2008; Teixeira, 2008). Embora seja um recurso válido, tal procedimento subutiliza a potencialidade do equipamento e pode levar a um MDA com qualidade visual inferior à necessária para a interpretação geológica. Ao contrário, neste trabalho foram utilizados todos os pontos do imageamento.

6 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi estabelecer procedimentos e métodos para a geração de MDAs a partir da utilização da técnica LIDAR, que envolveram a aquisição de dados, seu processamento, visualização e interpretação de feições geológicas. Todos esses procedimentos foram integrados com dados do sistema GNSS, o que permitiu gerar um MDA georreferenciado.

É importante ressaltar que no processo de imageamento teve-se o cuidado de garantir uma sobreposição mínima de 10% entre as cenas para que ocorresse uma junção adequada entre elas, minimizando os efeitos provocados por sombras, comuns durante o imageamento em razão do movimento aparente do sol.

Para que o MDA gerado representasse bem o afloramento, foi necessário que no momento do imageamento as condições de iluminação estivessem boas: poucas nuvens, sol incidindo diretamente no afloramento e baixa quantidade de aerossóis, pois essas condições garantiram uma fotografia de melhor qualidade, o que influenciou positivamente na informação de cor (RGB) da nuvem de pontos. A fotografia obtida sofreu um processo de processamento digital de imagem antes da associação com a nuvem de pontos, com alteração de suas propriedades, tais como brilho, contraste e intensidade, como forma de aumentar a qualidade visual do MDA.

Quanto à distância entre o equipamento e o objeto imageado, o equipamento mostrou-se eficiente com distâncias superiores a 60 metros e inferiores a 1000m. Constatou-se um deslocamento da nuvem de pontos em relação à imagem obtida com o *laser scanner* em distâncias inferiores a 60 metros. Tal fato deve-se a um problema de paralaxe em função da resolução relativamente baixa da câmera fotográfica acoplada ao *laser scanner*. O nível de exatidão do MDA da Pedra Pintada foi inferior a 0,20 metros. Isso decorreu de erros inerentes

à rede geodésica bem como à resolução da nuvem de pontos, que no caso da Pedra Pintada foi de um ponto coletado a cada intervalo de 4 centímetros.

O trabalho evidenciou que a técnica LIDAR pode ser uma ferramenta de extrema importância para a manutenção de registros de afloramentos, pois, muitos locais propícios para o estudo geológico, com o passar do tempo, sofrem degradações não permitindo novas interpretações geológicas. Com o imageamento de tais afloramentos, constatou-se a possibilidade de criação de um banco de dados com modelos virtuais, preservando o local na forma digital.

Por fim foi constatou-se que a modelagem digital de afloramentos utilizando a técnica LIDAR depende de uma junção de conhecimentos de áreas distintas, como geologia, informática e cartografia, integrados para desenvolver métodos de coleta e processamento de dados, desenvolver técnicas de visualização 3D e interpretação de feições geológicas. Além disso, devem-se aperfeiçoar os procedimentos de exportação de MDAs interpretados, de forma a integrá-los com diferentes aplicativos de modelagem geológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARHAN, M.; WHITE, L.; TUCK, D.; AIKEN, C. **Laser rangefinders and ArcGIS combined with three-dimensional photorealistic modeling for mapping outcrops in the Slick Hills, Oklahoma**, *Geosphere*, June 1, 2008; 4(3): 576 - 587.

ARNOT, M.J.; LEWIS, J.M.; GOOD, T.R. **Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale out-crop data**. 1997. *Journal of sedimentary Reserch*, 67, 984-987.

BALTSAVIAS, E.P. *et al.* **Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacial monitoring**. *Photogrammetric Record*, n. 17, p. 243-273, 2001.

BARCIK, E.; MOSER, I.; SANTOS, D.S. DOS; MARTINS, B.D. 2007. **Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS – 3D no Ramo da Mineração**. Anais. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3631-363.

BATES, K.T.; RARITY, F.; MANNING, P.L.; HODGETTS, D.; VILA, B.; OMS, O.; GALOBART, A.; GAWTHORPE, R.L. **High-resolution LiDAR and photogrammetric survey of the Fumanya dinosaur tracksites (Catalonia): implications for the conservation and interpretation of geological heritage sites**, *Journal of the Geological Society*, January 1, 2008; 165(1): 115 - 127.

BELLIAN, J.A.; BECK, R.; KERANS, C. **Analysis of hyperspectral and lidar data: Remote optical mineralogy and fracture identification**, *Geosphere*, December 1, 2007; 3(6): 491 - 500.

BELLIAN, J.A., JENNETTE, D.C., KERANS, C., GIBEAUT, J., ANDREWS, J., YSSLDYK, B., AND LARUE, D., 2002, **3-Dimensional digital outcrop data collection and analysis using eye-safe laser (LIDAR) technology: American Association of Petroleum Geologists (AAPG)**. Search and Discovery Article 40056, (<http://www.searchanddiscovery.net/documents/beg3d/index.htm>).

BELLIAN, J.A.; KERANS, C.; JENNETTE, D.C. **Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling**. *Journal of Sedimentary Research*, n. 75, p.166–176. 2005.

BELLINA, G.M. 2009. **Modelagem Digital de Afloramentos a partir da renderização por pontos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Ciência da Computação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 25p.

BUCKLEY, S. J.; HOWELL, J.A.; ENGE, H.D; KURZ, T.H. **Terrestrial Laser Scanning in Geology: Data Acquisition Processing and Accuracy Considerations**. Journal of the Geological Society, London; 2008, v. 165; ISSUE: 3, p. 625-638. DOI: 10.1144/0016-76492007-100.

CENTENO, J.A.S.; WUTKE, J.D.; MITISHITA, E.A.; VÖGTLE, T. **Two Methods to Estimate the Spot Size of Terrestrial Laser Scanners**. Journal of Surveying Engineering, v. 136, p. 126-131, 2010.

ENGE, H.D. & HOWELL, J.A. **Impact of deltaic clinothems on reservoir performance: Dynamic studies of reservoir analogs from the Ferron Sandstone Member and Panther Tongue, Utah**. AAPG Bulletin, February 1, 2010; 94(2): 139 - 161.

ENGE, H.D.; BUCKLEY, S.J.; ROTEVATN, A.; HOWELL, J.A. **From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures**, Geosphere, December 1, 2007; 3(6): 469 - 490.

ENGE, HAVARD D.; BUCKLEY, SIMON J.; ROTEVATN, ATLE; HOWELL, JOHN A. **From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures**. Geological Society of América. Geosphere; December 2007; v. 3; no. 6; p. 469-490; DOI: 10.1130/GES00099.1

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, June 1, 2009; 93(6): 795 - 827.

FABUEL-PEREZ, I.; HODGETTS, D.; REDFERN, J. **Integration of digital outcrop models (DOMs) and high resolution sedimentology - workflow and implications for geological modelling: Oukaimeden Sandstone Formation, High Atlas (Morocco)**. Petroleum Geoscience, May 1, 2010; 16(2): 133 - 154.

FREIRE, R.C. **Técnicas de aquisição de dados geológicos com a tecnologia LIDAR**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 54p.

GOMES, R.K. 2010. **Visualização de Nuvem de Pontos no Processo de Imageamento de afloramentos com Laser Scanner Terrestre utilizando GPU**. Trabalho de Conclusão de Curso, Ciência da Computação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 87p.

JACOBI, L.; MACEDONIO, R. DA S.; MARKOSKI, P.R.; VERONEZ, M.R.; TOGNOLI, F.M.W.; PAIM, P.S.G.; FACCINI, U.F. ; LAVINA, E.L.C. **Modelo Digital de Afloramento**

visando a análise e interpretação geológica: um estudo de caso baseado em dados de Laser Scanner 3D Terrestre, Anais do 45º Congresso Brasileiro de Geologia PAP916.pdf, 2010.

JANSON, X.; KERANS, C.; BELLIAN, J.A.; FITCHEN, W. **Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas** AAPG Bulletin, October 1, 2007; 91(10): 1405 - 1436.

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, December 1, 2009; 5(6): 465 - 482.

JONES, R.R.; MCCAFFREY, K.J.W.; IMBER, J.; WIGHTMAN, R.; SMITH, S.A.F.; HOLDSWORTH, R.E.; CLEGG, P.; PAOLA, N. DE; HEALY, D.; WILSON, R.W. **Calibration and validation of reservoir models: the importance of high resolution, quantitative outcrop analogues**, Geological Society, London, Special Publications, January 1, 2008; 309(1): 87 - 98.

KURTZMAN, D.; EL AZZI, J.A.; LUCIA, F.J.; BELLIAN, J.; ZAHM, C.; JANSON, X. **Improving fractured carbonate-reservoir characterization with remote sensing of beds, fractures, and vugs**, Geosphere, April 1, 2009; 5(2): 126 - 139.

LABOURDETTE, R. & JONES, R.R. **Characterization of fluvial architectural elements using a three-dimensional outcrop data set**. Escanilla braided, n. 3, 2007.

MAERTEN, L.; POLLARD, D.D.; MAERTEN, F. 2001. **Digital mapping of three-dimensional structures of the Chimney Rock fault system, central Utah**. Journal of Structural Geology, 585-592.

MCCAFFREY, K.J.W.; HODGETTS, D.; HOWELL, J.; HUNT, D.; IMBER, J.; JONES, R.R.; TOMASSO, M.; THURMOND, J.; VISEUR, S. **Virtual fieldtrips for petroleum geoscientists**, Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series, January 1, 2010; 7(0): 19 - 26.

MCCAFFREY, K.J.W.; FEELY, M.; HENNESSY, R.; THOMPSON, J. **Visualization of folding in marble outcrops, Connemara, western Ireland: An application of virtual outcrop technology**, Geosphere, June 1, 2008; 4(3): 588 - 599.

NELSON, C.E.; JERRAM, D.A.; HOBBS, R.W.; TERRINGTON, R.; KESSLER, H. **Reconstructing flood basalt lava flows in three dimensions using terrestrial laser scanning**, Geosphere, February 1, 2011; 7(1): 87 - 96.

OLARIU, M.I.; FERGUSON, J.F.; AIKEN, C.L.V.; XU, X. **Outcrop fracture characterization using terrestrial laser scanners: Deep-water Jackfork sandstone at Big Rock Quarry, Arkansas**, *Geosphere*, February 1, 2008; 4(1): 247 - 259.

PAIM, P.S.G. & SCHERER, C.M.S. 2003. **Arquitetura estratigráfica de sucessões flúvio-eólicas: o exemplo do Alogrupo Guaritas na região da Pedra Pintada, Rio Grande do Sul, Brasil**. In: Paim P. S. G.; Faccini U. F.; Netto R. G. (eds.) *Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudo de casos.*, São Leopoldo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, p. 38-58.

PAIM, P.S.G. & SCHERER, C.M.S. 2007. **High resolution stratigraphy and depositional model of wind-and-water-laid deposits in the Ordovician Guaritas rift (southernmost Brazil)**. *Sedimentary Geology*, 202:776-795.

PAIM, P.S.G.; FACCINI, U.F.; NETTO, R.G. 2003. **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudo de casos**. São Leopoldo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

PAIM, P.S.G.; FALLGATTER, C.; SILVEIRA, A.S. 2010. **Guaritas do Camaquã, RS - Exuberante cenário com formações geológicas de grande interesse didático e turístico**. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Berbert-Born, M.; Sallun filho, W.; Queiroz, E.T.; (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Publicado na Internet em 30/08/2010 no endereço <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio076/sitio076.pdf>

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, U.S.A.** *Journal of Sedimentary Research*, November 1, 2007; 77(11): 939 - 964.

PRINGLE, J.K.; WESTERMAN, A.R.; CLARK, J.D.; DRINKWATER, N.J.; GARDINER, A.R. **3D high-resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty: an example from Alport Castles, Derbyshire, UK**. *Petroleum Geoscience*, 10, 343–352. 2004.

RIEGL. **3D scanner selection guide**. Disponível em: http://www.riegl.com/terrestrial_scanners/3d_scanner_selection_guide_/ssg_all.htm>. Acesso em: 10 de março. 2009.

ROTEVATN, A.; BUCKLEY, S.J.; HOWELL, J.A.; FOSSEN, H. **Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study**, *AAPG Bulletin*, March 1, 2009; 93(3): 407 - 427.

TEIXEIRA, W.L.E. 2008. **Aquisição e construção de modelos estáticos análogos a reservatórios petrolíferos com tecnologia LIDAR e GEORADAR.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 99p.

THURMOND, J.B.; DRZEWIECKI, P.A.; XU, X. **Building simple multiscale visualizations of outcrop geology using virtual reality modeling language (VRML).** Computers and Geosciences, 31, 913–919. 2005.

VERWER, K.; MERINO-TOME, O.; KENTER, J.A.M.; DELLA PORTA, G. **Evolution of a High-Relief Carbonate Platform Slope Using 3D Digital Outcrop Models: Lower Jurassic Djebel Bou Dahar, High Atlas, Morocco,** Journal of Sedimentary Research, June 1, 2009; 79(6): 416 - 439.

WAWRZYNIEC, T. F.; MCFADDEN, L. D.; ELLWEIN, A.; MEYER, G.; SCUDERI, L.; MCAULIFFE, J.; FAWCETT, P. **Chronotopographic analysis directly from point-cloud data: A method for detecting small, seasonal hillslope change, Black Mesa Escarpment, NE Arizona,** Geosphere, December 1, 2007; 3(6): 550 - 567.

WEHR, A. & LOHR, U. **Airborne laser scanning—an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, n. 54, P. 68-82. 1999.

WHITE, P.D. & JONES, R.R. **A cost-efficient solution to true color terrestrial laser scanning,** Geosphere, June 1, 2008; 4(3): 564 - 575.

WOLF, P.R. & DEWITT, B.A. **Elements of Photogrammetry (with Applications in GIS).** 3rd McGraw–Hill, New York. 2000.

WUTKE, J.D.; CENTENO, J.S. **Métodos para avaliação da resolução de sistemas de varredura a laser terrestres.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 13, p. 151-164, 2007.

XU, X.; AITKEN, C.L.V.; BHATTACHARYA, J.B.; DAVIES, R.K.; CARBEANU, R.M.; NIELSEN, K.C.;MCMECHAN, G.A.;ABDELSALAM, M.G. 2000. **Creating virtual 3-D outcrop.** The Leading Edge 19, 197-202.

XU, X.; BHATTACHARYA, J.B.; DAVIES, R.K.; AITKEN, C.L.V. 2001. **Digital Geologic Mapping of the Ferron Sandstone, Muddy Creek, Utah, With GPS an Reflectorless Laser Rangefinders,** GPS Solutions 5,15-23.

ZAHM, C.K. & HENNINGS, P.H. **Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming,** AAPG Bulletin, November 1, 2009; 93(11): 1427 - 1446.