

Estimativa de volume de área minerada utilizando técnica de *Structure from Motion*

Carlos Alberto Trindade¹
José Felipe Marques Cancela¹
Marcus Vinicius Tavares da Silva¹
Bruna Lopes De Paoli²

¹ Setor Técnico-Científico da Superintendência Regional da Polícia Federal em Minas Gerais
Rua Nascimento Gurgel, 30, Gutierrez, Belo Horizonte - MG.

{carlos.cat, cancela.jfmc, tavares.mvts}@dpf.gov.br

² Universidade FUMEC
Rua Cobre, 200, Cruzeiro, Belo Horizonte – MG
brunadepaoli@gmail.com

Abstract: According to the Brazilian Constitution, mineral resources belong to the State and, consequently, their exploitation must be authorized, under penalty of engendering Federal crime. In this context, The Brazilian Federal Police is the institution responsible for investigate and elucidate crimes against the Union, including the ones related to environmental cases such as illegal mining. Furthermore, the Forensic Division acts to uncover, measure, and materialize referred cases using traditional techniques and precision devices such as geodesic GNSS Receptors, Total Station and Laser Scanner, each one presenting their particular. In addition, a new technique called Structure from Motion (SfM) starts to be applied in these environmental forensic exams, in which a tridimensional surface model of the mining area can be reconstructed by computational processing. Although the technique's advantages is a reality, more studies is necessary to be done in order to establish the satisfactory numbers of photos and control points collected in field work, the percentage of overlapped adjacent images, as well as the technique performance in large and/or irregular surface areas. Moreover, the studies showed that the traditional equipment must be applied in association with the SfM in order to scale the model with a high precision measure. The SfM revealed to be a promising tool to estimate distances areas and volumes in mining areas, considering it's plentiful advantages such as high precision, survey time, low cost and security operation for the experts in locals with risk of human fall and ground collapse.

Palavras-chave: Structure from Motion, SfM, survey mining, geology, Photogrammetry, mine measurement.

1. Introdução

De acordo com a Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (CF/88), art. 176, “as jazidas, em lavra ou não, e demais recursos minerais e os potenciais de energia hidráulica constituem propriedade distinta da do solo, para efeito de exploração ou aproveitamento, e pertencem à União, garantida ao concessionário a propriedade do produto da lavra”. Nesse contexto, a Polícia Federal, como órgão responsável por apurar infrações em detrimento de bens, serviços e interesses da União (art. 144 da CF/88), vem ganhando papel cada vez mais relevante no combate aos crimes decorrentes da atividade minerária ilegal. A perícia criminal ambiental da PF tem como objetivo, entre outros, a constatação do dano ambiental ilegal e a fixação do montante do prejuízo causado pela atividade ao meio ambiente e à coletividade.

Para tal estimativa, os peritos utilizam técnicas de mensurações de campo por meio do uso de equipamentos geodésicos e topográficos de precisão (estação total e receptores GNSS¹

¹GNSS: *Global Navigation Satellite System*, em Português: Sistema de Navegação Global por Satélite.

geodésicos) e programas computacionais para cálculo do volume mineral extraído. A metodologia do uso de tais equipamentos já se encontra consagrada e vem sendo empregada ao longo dos anos para este tipo de atividade.

O levantamento do terreno com tais equipamentos se faz pela medição dos pontos notáveis, descrevendo-os consoante o número de pontos topográficos levantados. A qualidade da determinação da superfície está diretamente ligada ao número de pontos levantados e à complexidade do terreno. Cavas de granito (Figura 1), por exemplo, caracterizadas pelo comportamento retilíneo das frentes de lavra, apresentam resultados de cálculo de volume mais precisos tendo em vista a quantidade discreta dos pontos limites das faces. Porém, cavas de extração de quartzito (Figura 2), que apresentam faces das frentes de lavra difusas e menos comportadas, apresentam maiores dificuldades de levantamento, exigindo a determinação de um conjunto maior de pontos ou a realização de uma aproximação no cálculo do volume.



Figura 1 – Frente de lavra de granito com faces comportadas e número discreto de pontos.

Figura 2 – Frente de lavra de quartzito com superfície difusa.

Uma solução para a determinação da superfície de frentes de lavras difusas seria a utilização da tecnologia de Laser Scanner Terrestre (LST) que determina a posição tridimensional dos pontos de uma superfície utilizando um sistema de varredura bidimensional. Seu funcionamento baseia-se na utilização de um feixe de laser² que é emitido na direção da superfície, determinando ângulos e distâncias, ao final produzindo uma nuvem de pontos tridimensional da superfície. O grande óbice para utilização desta tecnologia pela Criminalística são os preços elevados do equipamento, ainda mais considerando a existência de diversas unidades de perícia presentes nos estados brasileiros.

A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens do uso de cada um dos equipamentos e tecnologias para cálculo de volume em áreas mineradas, de acordo com a ótica de trabalho e a disponibilidade de equipamentos por parte das Unidades de Criminalística da Polícia Federal.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens no uso de equipamentos para cálculo de volume de áreas mineradas.

Equipamento	Vantagens	Desvantagens
Estação Total	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente precisão; • Metodologia e emprego consolidado; • Peritos Criminais treinados no uso e processamento dos dados; • Equipamento disponível na maioria das unidades de criminalística da PF; • Possibilidade da medição de pontos sem prisma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de mudança de base, aumentando tempo em campo e de pós-processamento; • Levantamento reduzido de pontos; • Necessidade do levantamento de grande quantidade de pontos para representar fielmente o terreno; • Necessidade, por vezes, de uso de prisma de medição em encostas íngremes expondo o profissional a riscos.

² LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*.

Equipamento	Vantagens	Desvantagens
Receptores GNSS dupla frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente precisão; • Metodologia e emprego consolidado; • Peritos Criminais treinados no uso e processamento dos dados; • Equipamento disponível nas maiores unidades de criminalística do PF. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade de trabalho em áreas cobertas; • Erros devido a multicaminho e PDOP nas encostas íngremes de áreas mineradas; • Necessidade do levantamento de grande quantidade de pontos para representar fielmente o terreno; • Necessidade de percorrer fisicamente as encostas expondo o operador a riscos de acidentes.
Laser scanner terrestre	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente precisão; • Levantamento de grande quantidade de pontos descrevendo melhor o terreno. 	<ul style="list-style-type: none"> • A Criminalística dispõe de um único equipamento no País; • Custo elevado do equipamento.

2. Técnica de *Structure from Motion*

Adicionalmente aos métodos anteriormente descritos, está em fase de teste na Criminalística de Minas Gerais o emprego da técnica de *Structure from Motion* (SfM), que pode-se traduzir de forma livre como “Estrutura pelo Movimento”, para a determinação de um modelo de superfície do terreno. A técnica consiste na tomada de duas ou mais fotos de uma cena a partir de pontos de vistas diferentes. Tais fotografias podem ser tomadas a partir do solo ou de veículos aéreos. A partir de pontos característicos coincidentes de determinada cena, capturada em visadas distintas, são realizados cálculos para a reconstrução tridimensional do terreno mediante triangulações. A fundamentação técnica do SfM reside, em parte, no teorema de SfM de Ullman (1979), o qual anuncia que “para transformações rígidas, uma reconstrução métrica única é possível a partir de três visadas ortogonais de quatro pontos”.

A reconstrução 3D por meio da técnica de SfM pode ser dividida nas seguintes etapas:

- a determinação de inúmeras feições características em cada imagem (Figura 3);
- a identificação dos emparelhamentos (*matching*) de feições correspondentes (Figura 4);
- a determinação de uma estimativa inicial da estrutura da cena e a movimentação relativa da câmera (Figura 5);
- a otimização das estimativas;
- calibração da câmera;
- adensamento da nuvem de pontos (*dense cloud*);
- geração do modelo tridimensional por meio de rede triangular.

Na primeira etapa, em que geralmente se utiliza o algoritmo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), pontos chaves são detectados na imagem (Figura 3) e descritos por sua localização, escala, orientação e por um vetor de identificação. Na segunda etapa, os pontos determinados na etapa prévia e que correspondem ao mesmo objeto real em diferentes imagens são pareados (Figura 4). Na terceira etapa é realizado o ajuste fino das matrizes de projeção e pontos tridimensionais estimados inicialmente, num processo iterativo e que estima a geometria tridimensional do objeto de estudo (Figura 5). A calibração da câmera é uma atividade obrigatória, uma vez que o SfM se baseia no uso de imagens capturadas por câmeras não calibradas. Assim, são determinados os parâmetros para correção de erros referentes à distorções radiais, distorções tangenciais, distância focal e posição do ponto principal de cada foto. Para otimização da estrutura tridimensional resultante, pode-se ainda adensar as nuvens de pontos obtidas através do SfM, mediante uso do software *Clustering Views for Mult-View Stereo* (CMVS). A partir de tais pontos,

é criada a superfície do modelo 3D, possibilitando o seu uso para diversos fins, entre eles, o cálculo de volume.

Para a geração do modelo a partir da técnica de SfM, é necessária a definição das unidades de medida relacionando-o com a localização geográfica definida. Desta forma é necessário o uso de pontos de controle com coordenadas conhecidas, aos moldes da Fotogrametria tradicional, para colocar o modelo gerado em escala.

Assim, é possível, a partir do uso de câmeras fotográficas de baixo custo, realizar a tomada de um conjunto de imagens de um determinado local de forma a determinar uma nuvem de pontos 3D que corresponda à superfície examinada.



Figura 3 – Pontos característicos em uma cena.

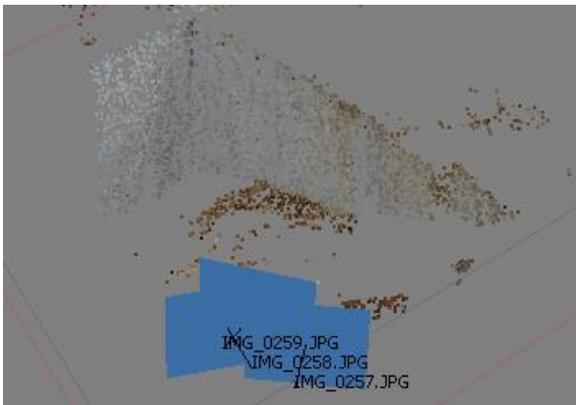


Figura 5 – Determinação inicial da posição das tomadas das fotos e nuvem esparsa de pontos.

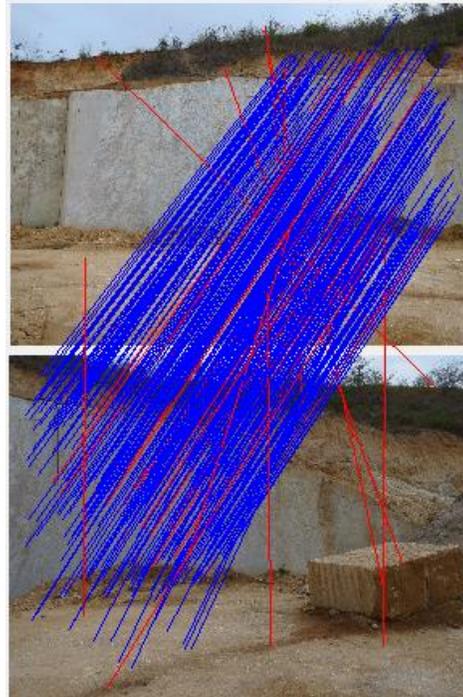


Figura 4 – Emparelhamento de feições correspondentes. Linhas em azul referem-se a emparelhamentos corretos e linhas em vermelho a emparelhamentos errados.

3. Resultados e discussões

Foram realizados testes de emprego da técnica SfM em três locais distintos a seguir apresentados e descritos. Todas as fotografias foram tomadas com a câmera Canon PowerShot SX40 HS, na resolução de 12 MB, sem aplicação de zoom.

3.1. Cava de exploração³ de ardósia

Esta cava (Figura 6) apresentava medidas aproximadas de 140 m de largura x 140 m de extensão x 40 m de profundidade. Foi realizado um levantamento (Figura 7) utilizando uma estação total marca Topcon, modelo GPT 7005i, ocupando duas estações base. O volume foi

³ Exploração é um termo técnico usado para referir-se à retirada ou obtenção de recursos naturais, geralmente não renováveis, para fins de aproveitamento econômico.

determinado utilizando o programa Topograph 98SE. A técnica de SfM foi empregada tomando fotografias (Figura 8) a partir de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), desenvolvido na Unidade de Criminalística Federal de Minas Gerais (SETEC/MG). Foi definida uma área de recobrimento entre as fotos de cerca de 80%. Os dados SfM foram processados utilizando o programa Agisoft Photoscan. O volume também foi calculado utilizando o programa Topograph 98SE. Na técnica foram utilizados 7 (sete) pontos de apoio de campo (Figura 9), determinados por meio de receptor GPS Geodésico, marca/modelo Trimble R6 com precisão centimétrica.



Figura 6 – Cava de ardósia.



Figura 7 – Levantamento utilizando estação total.



Figura 8 – Posição da tomada das fotografias aéreas com VANT.



Figura 9 – Pontos de apoio de campo.

A Tabela 2 mostra características dos dois tipos de levantamento e o volume calculado a partir de cada uma. Observa-se diferença de cerca de 1,2% entre os dois volumes calculados.

Tabela 2 – Comparativo de levantamento utilizando estação total e SfM.

Dados	Estação Total	SfM com VANT
Pontos Levantados	144 pontos	83.157 pontos
Tempo Consumido no levantamento	2 horas	5 minutos*
Volume calculado	170.811,8 m ³	173.002,2 m ³

Observação: Não foi computado o tempo de planejamento de voo.

3.2. Frente de lavra de granito

A Frente de lavra de granito (Figura 10) foi levantada da mesma forma utilizando estação total e cálculo de volume com o programa Topograph 98SE. O local apresentava cerca de 58 metros em sua maior extensão. O levantamento utilizando a técnica de SfM foi realizado com 61 (sessenta e uma) fotografias tomadas a partir do solo (Figura 11). O processamento dos dados e o cálculo de volume foram realizados utilizando o programa Agisoft Photoscan. O modelo foi escalado tomando por base a determinação de uma distância principal por meio de trena a laser.



Figura 10 – Frente de lavra de granito.

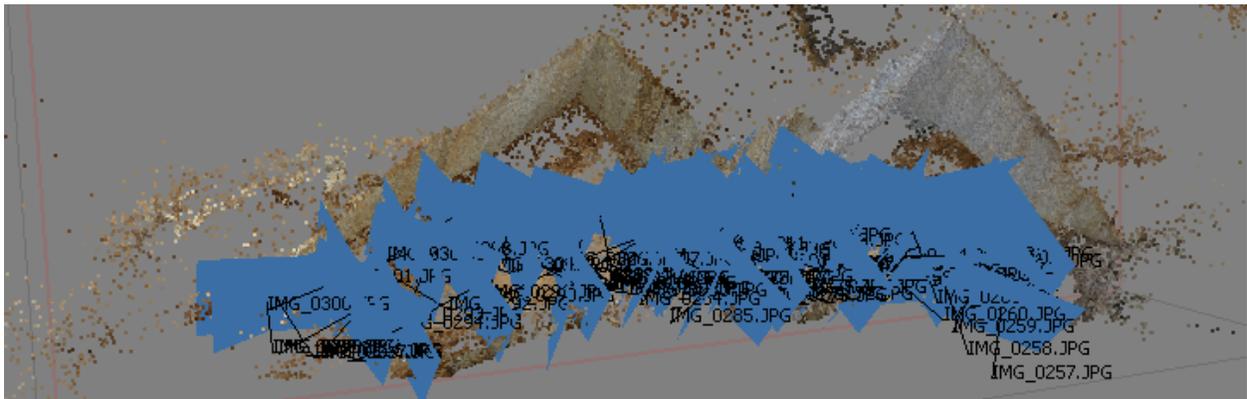


Figura 11 – Posicionamento dos pontos de tomada das 61 fotos (em azul) da frente de lavra.

Cálculo Volume	Estação Total	SfM
Pontos Levantados	23 pontos	88.246 pontos
Tempo Consumido no levantamento	15 minutos	5 minutos
Volume calculado	1.807,40 m ³	1.901,80 m ³

Observa-se diferença de cerca de 4,9% nos dois volumes calculados.

3.3. Área construída

Embora se tenha conseguido resultados de cálculo de volume compatíveis entre si, é de se esperar diferenças no cálculo do volume usando técnicas tradicionais que fornecem pontos discretos e técnicas que fornecem nuvem de pontos. Além do que, quanto maior o local a ser levantado, menor será a diferença percentual do cálculo de volume.

Foi gerado o modelo SfM em área edificada (Figura 12) a partir de 32 fotografias e levantadas as coordenadas locais com uso de estação total. O modelo foi gerado utilizando 3 pontos

de controle (pontos em vermelho nas Figuras 12 e 13). Os demais pontos serviram para verificar a rigidez do modelo a partir da medida de distâncias. A Tabela 3 apresenta a comparação entre distâncias medidas entre um modelo e outro. Os erros foram maiores onde houve menor cobertura de fotos.



Figura 12 – Área levantada com SfM. Em vermelho, pontos utilizados na geração do modelo.



Figura 13 - Modelo SfM gerado. Em vermelho, pontos utilizados na geração do modelo.

Tabela 3 – Comparação entre valores medidos.

Linha	Distância ET	Distância no modelo	ΔD (m)
Linha 1	4,94	4,92	0,02
Linha 2	3,20	3,15	0,05
Linha 3	6,38	6,44	-0,06
Linha 4	6,41	6,44	-0,03
Linha 5	13,26	13,01	0,25
Linha 6	14,36	14,28	0,08

4. Conclusões

O levantamento topográfico que se obtém com estação total ou receptores GNSS, apesar de possuírem excelente precisão (de ordem centimétrica), não possibilita descrever adequadamente todas as variações do terreno. Tais métodos podem expor os profissionais a riscos desnecessários, ao realizar o levantamento em locais íngremes, suscetíveis a desmoronamentos. O levantamento realizado por laser scanner terrestre, apesar de fornecer boa precisão, apresenta o inconveniente referente ao custo do equipamento.

A grande motivação do uso da técnica SfM nasceu da simplicidade do seu uso e do baixo custo dos equipamentos utilizados, em comparação aos demais métodos apresentados, e a boa descrição do terreno alcançada por meio da representação usando grande quantidade de pontos. Tal técnica permite, de forma visual, a materialização do corpo de delito (no caso, fraude minerária), perpetuando as condições encontradas pelos Peritos por ocasião dos exames de campo, servindo como peça para futuros questionamentos e defesa no processo judicial.

Os resultados obtidos nas áreas de teste até o momento são animadores. Contudo, mais estudos são demandados, visando principalmente determinar a quantidade necessária de fotos e de pontos de controle para fortalecimento do modelo, e o percentual de sobreposição entre imagens adjacentes. É também indispensável verificar os resultados do trabalho em outras superfícies e o comportamento do modelo SfM em grandes áreas mineradas, e analisar os resultados da comparação do modelo em superfícies difusas com a técnica de laser scanner terrestre. O levantamento de grandes áreas pode apresentar resultados melhores com o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), já em teste no Setor de Criminalística da PF em Minas Gerais.

Apesar de ter seus benefícios, os testes realizados ainda mostraram a necessidade da utilização de pontos de controle para escalar o modelo, o que ainda obriga o uso de equipamentos tradicionais de levantamento. Testes ainda estão sendo realizados para verificar se a utilização de somente uma medida, tomada a partir de trena a laser, por exemplo, seria suficiente para escalar o modelo de forma precisa.

5. Bibliografia

Structure from Motion, Chapter 13. Disponível em: <<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/archive/Publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>>. Acesso em: 10.out.2014.

Structure from Motion from Tracked Points, Lecture 16. Disponível em: <<https://cseweb.ucsd.edu/classes/sp04/cse252b/notes/lec16/lec16.pdf>> acesso em: 09.out.2014.

On Ullman's theorem in computer vision. Disponível em: <<http://www.math.harvard.edu/~knill/sfm/papers/ullman.pdf>>. Acesso em: 05.out.2014.

FILHO, L. O. S. **Apostila III Curso de introdução às técnicas de fotogrametria em perícias de local**. Brasília, 2014, 92 p. Academia Nacional de Polícia do Departamento de Polícia Federal.

Guerreiro, Rui Felipe Cardoso, **Modelos 3D densos a partir de imagens com sobreposição parcial: fatorização com dados desconhecidos**. Universidade Técnica de Lisboa, setembro de 2004

Levantamento Topográfico para Cálculo de Volume, disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2010/08/12/levantamento-topografico-para-calculo-de-volume/>>. Acesso em: 05.out.2014.

Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, disponível em: <http://activetectonics.asu.edu/ActiveFaultingSeminar/Papers/Westoby%20etal_2012.pdf>. Acesso em: 03.out.2014.