

Aplicação do Laser Scanner Terrestre para auxiliar o Monitoramento de Ondas e Processos Erosivos em Margens de Reservatórios - Estudo de caso em duas áreas da UHE Itumbiara

Ricardo Moreira Vilhena
FURNAS Centrais Elétricas SA, Goiânia, Brasil, rvilhena@furnas.com.br

Marta Pereira da Luz
FURNAS Centrais Elétricas SA, Goiânia, Brasil, martaluz@furnas.com.br

Maurício Martines Salles
Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, sales.mauricio@gmail.com

Nilvane Teixeira Porfírio
FURNAS Centrais Elétricas SA, Goiânia, Brasil, nilvane@furnas.com.br

RESUMO: O mapeamento topográfico em alta definição com finalidade de monitorar áreas suscetíveis ou com presença de processos erosivos com equipamento *laser scanner* terrestre é prática pouco comum no Brasil, mas vem ganhando espaço pelo nível de detalhamento e acurácia do levantamento. Este artigo apresenta os resultados deste método em duas áreas para monitoramento de ondas e processos erosivos localizadas nas margens do reservatório da usina hidrelétrica Itumbiara. O equipamento *laser scanner* utilizado neste trabalho é o *scanner* terrestre (*mid-range scanner*) Leica ScanStation C10 que utiliza tecnologia *Time of Flight* (TOF) para medir o trajeto e os ângulos horizontal e vertical que o feixe de laser faz ao atingir um objeto e seu retorno. As dimensões das áreas levantadas foram de aproximadamente de 600 metros de comprimento e 350 metros de largura, sendo que esta varia entre a cota do nível d'água máximo maximorum de projeto e o nível d'água do lago do dia do mapeamento. O resultado deste levantamento possibilitou a elaboração de modelos digitais do terreno e curvas de nível com equidistâncias a cada 50 centímetros. O *laser scanner* terrestre e seus produtos apresentaram modelagem da superfície do terreno com detalhamento e precisão superiores aos métodos tradicionais de topografia.

PALAVRAS-CHAVE: *Laser Scanner* Terrestre, Mapeamento topográfico, Monitoramento de Processos Erosivos.

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento topográfico em alta definição com finalidade geológico-geotécnica e ambiental com *laser scanner* terrestre é prática pouco comum no Brasil, e vem ganhando espaço pelo nível de detalhamento e acurácia do levantamento (Cacciari e Futai, 2014 e Costa e Araújo, 2015). No exterior podemos citar alguns trabalhos nesta área: Resop e Hession

(2010), Bitelli *et al.* (2004), Rosser *et al.* 2005, Lim *et al.* (2005), Heritage e Hetherington (2007) e Hoffmeister *et al.* (2012).

Neste artigo são apresentados os resultados de levantamento em duas áreas para monitoramento de ondas e processos erosivos nas margens do reservatório, utilizando-se tecnologia *laser scanner*, localizadas na margem direita do reservatório da usina hidrelétrica Itumbiara.

O presente trabalho é parte do escopo de uma das atividades vinculadas ao projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D/ANEEL), n°. PD.F10.014, intitulado: “Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs”.

As atividades em campo foram realizadas nos meses de julho a setembro de 2015, em períodos não subsequentes, incluindo a materialização de bases topográficas, georreferenciamento de pontos de controle e uso do *laser scanner* terrestre.

O processamento dos dados, em escritório, incluiu o registro dos pontos de controle, limpeza da nuvem de pontos tridimensional, modelamento digital do terreno e criação de curvas de nível.

As áreas mapeadas foram denominadas de EM.ITB 1 (Estação de Monitoramento Itumbiara 1) e EM.ITB 2 (Estação de Monitoramento Itumbiara 2).

2 LOCALIZAÇÃO

As estações de monitoramento (EMs) de ondas e processos erosivos estão localizadas na margem direita da usina hidrelétrica Itumbiara, município de Itumbiara - Goiás.

Foram materializados no terreno marcos topográficos com objetivo de estabelecer bases locais de referência geodésica. As coordenadas planialtimétricas desses marcos e do marco de origem são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Coordenadas planialtimétricas dos marcos topográficos das EMs, Zona UTM 22K

Nome	N (m)	E (m)	Altura Ortométrica (m)
SAT 92713	7.965.756,650	704.024,252	523,343
EM ITB 1	7.965.893,516	705.051,797	521,925
EM ITB 2	7.972.200,539	707.370,610	519,793

As dimensões das áreas para os levantamentos foram previstas inicialmente com 500 metros de comprimento e largura variando

entre a cota 522,00 (N.A. Máx. Maximorum) até o nível operacional do dia do mapeamento. Porém, após os levantamentos verificou-se que foram mapeadas áreas maiores. Na Tabela 2 são apresentadas essas dimensões das EMs.

Tabela 2. Dimensões das estações de monitoramento e níveis d'água operacionais

Nome	Comprimento estimado (m)	Largura estimada (m)	Área medida (m²)
EM ITB 1	579,00	234,00	131.560,18
EM ITB 2	684,23	459,72	291.693,03

Os níveis operacionais medidos no vertedouro da usina, na época dos serviços nas estações EM ITB 1 e EM ITB 2, foram 508,65 m (22/08/2015) e 507,46 m (12/09/15), respectivamente.

A estação EM ITB 1 é caracterizada por uma morfologia em bancada com várias cunhas erosivas, produzida pelo processo erosivo do embate de ondas, auxiliada pelo seu posicionamento em relação ao reservatório, e pelas chuvas. A EM ITB 2 possui uma morfologia do terreno levemente convexa, porém sem erosões evidentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O mapeamento em alta definição utilizando *laser scanner* terrestre seguiu metodologia comum aos levantamentos de topografia: implantação da rede de apoio, aquisição e processamento dos dados. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma com as etapas gerais do trabalho.

3.1 Implantação da rede de apoio

O primeiro procedimento de qualquer levantamento topográfico em campo é o estabelecimento da rede de apoio, a partir da rede de marcos e vértices oficiais do IBGE.

Foram implantados marcos de concreto prismático (pré-moldado) nos locais das estações de monitoramento para as bases topográficas de referência, a partir do transporte de um marco oficial conhecido por meio de pares de GPS geodésicos, segundo norma

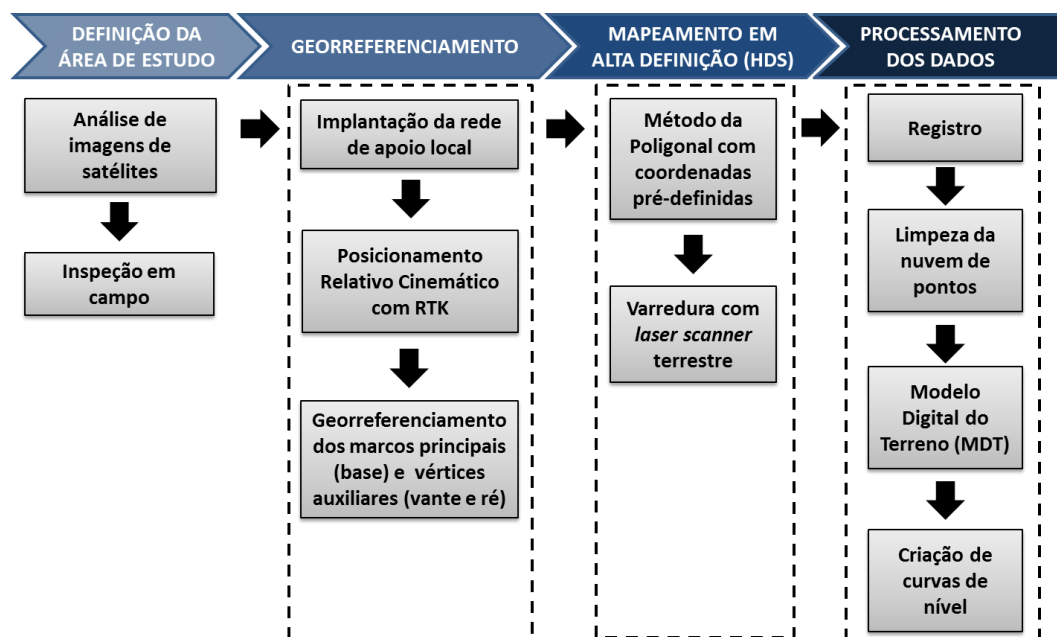


Figura 1. Fluxograma com as etapas gerais do trabalho para levantamentos com *laser scanner*.

técnica INCRA (2010). Além disso, vértices auxiliares de referência, vante e ré, foram implantados com piquetes para a realização do levantamento pelo método da poligonal.

Foi aplicada a técnica de levantamentos cinemáticos em tempo real (RTK), pelo método de posicionamento relativo semicinemático, para determinação das coordenadas das bases de referência e pontos auxiliares.

A definição do método de posicionamento semicinemático a partir do GPS RTK foi baseada no nível de precisão adequado à finalidade deste trabalho, ou seja, admitindo-se precisões centimétricas a métricas.

Foi realizado o transporte de coordenadas planialtimétricas de um marco de origem até as bases de referência e pontos auxiliares nos locais das EMs a partir da Estação Geodésica do IBGE, tipo estação planimétrica GPS, número SAT 92713, possuindo precisão altimétrica em função de sua conexão à RN 3261L. Este marco de origem está localizado na ponta sudoeste da barragem da UHE Itumbiara, junto ao marco de recalque RN 3261F. As coordenadas da estação planimétrica do IBGE estão apresentadas na Tabela 2.

O sistema de coordenadas adotado foi o SIRGAS 2000, conforme as recomendações e instruções do IBGE (2008)

Para que os dados medidos pudessem ser corrigidos em tempo real, foi necessário que os

dados coletados na estação de referência (BASE) fossem transmitidos para o receptor móvel (ou ROVER), pelo método RTK, dentro do alcance do rádio, que é de aproximadamente 15 km para atingir a precisão desejada.

Segundo Ribas (2008) os receptores atuais são capazes de obter precisões na ordem de 5 a 20 mm na horizontal e de 10 a 30 mm + 1 ppm na vertical para um receptor de dupla frequência, além de permitir que as ambiguidades sejam determinadas em movimento e a reinicialização obtida de forma automática.

3.2 Mapeamento com Laser Scanner Terrestre

O termo Mapeamento em Alta Definição ou *High Definition Surveying* (HDS) é aplicado ao levantamento topográfico utilizando equipamento *Laser Scanner*. Este possui capacidade para emitir uma sequência de raios lasers, orientados, sobre uma superfície, de um objeto ou de uma cena, com a finalidade de determinar a posição espacial dos pontos medidos pelo raio laser.

Além disso, o *laser scanner* é capaz de capturar centenas de milhões de coordenadas tridimensionais ou pontos georreferenciados de uma determinada área. Ele emite pulsos laser com o auxílio de um espelho de varredura e ao atingir o objeto, parte da energia do pulso volta

para o equipamento (receptor), sendo possível medir a distância entre o sensor e o objeto com base no tempo envolvido entre a emissão e o retorno do pulso.

A aplicação do *laser scanner* é mais usual para comparações entre o anteprojeto e o projeto conforme construído (as-built), porém vários trabalhos já foram realizados para os seguintes segmentos: Arquitetura, Engenharia e Construção Civil, Patrimônios, Geologia, Topografia, Mineração, Obras Subterrâneas, Cálculo de Volume, Inventário Florestal, Indústria do Petróleo (Gonçalves, 2007).

O *laser scanner* terrestre (*mid-range scanner*) utilizado para o levantamento proposto foi o ScanStation C10, da fabricante Leica Geosystems. Trata-se de um equipamento de varredura a laser compacto, sem sistemas de cabeamento e totalmente integrado, que utiliza a tecnologia Time of Flight (TOF).

As medições das coordenadas tridimensionais (XYZ) obtidas pelo equipamento são armazenadas e mostradas como “nuvem de pontos” que podem ser visualizadas, medidas e permitem a navegação em ambiente 3D.

O método de varredura a laser adotado foi o da “Poligonal com Coordenadas Pré-Definidas em Campo”, que consiste em criar uma poligonal fechada que envolva todas as estações de trabalho (pontos de posicionamento do equipamento na área de interesse), amarrados por leituras de Ré e Vante, ao longo do trecho a ser mapeado. Para este método é fundamental conhecer as coordenadas do ponto da primeira estação ocupada (primeiro posicionamento do equipamento) e a primeira ré. A partir daí o equipamento faz o transporte das coordenadas para os demais pontos.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as poligonais realizadas para as estações de monitoramento EM ITB1 e EM ITB2, respectivamente.

Nos pontos de apoio definidos para Ré e Vante foi instalado um alvo refletivo fixado na ponta de bastões e com altura conhecida. Os alvos HDS utilizados foram de 6 polegadas, inclináveis e giratórios (*tilt & turn*) para melhor orientação ao scanner. Durante o levantamento

esses bastões foram devidamente aprumados e o alvo direcionado para o *laser scanner*.

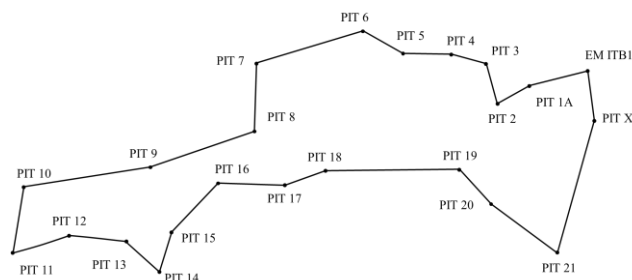


Figura 2. Poligonal fechada da EM ITB1 com 22 vértices auxiliares e 1 marco de referência.

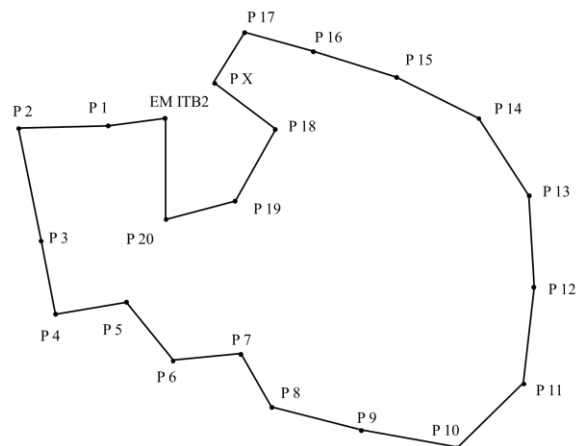


Figura 3. Poligonal fechada da EM ITB2 com 21 vértices auxiliares e 1 marco de referência.

Foi adotada a configuração de baixa taxa de varredura para este trabalho, ou seja, menos quantidade de pontos por segundo. Esta escolha não diminui o nível de precisão do levantamento, mas a velocidade da varredura e a quantidade de pontos na nuvem.

3.3. Processamentos dos dados

O objetivo deste trabalho é a elaboração do modelo digital do terreno (MDT) e curvas de nível, equidistantes a cada 50 centímetros, das duas áreas mapeadas. Para isso, foi necessário processar os dados gerados pelo mapeamento de alta definição a *laser* no que tange ao registro e limpeza da nuvem de pontos.

A maioria dos equipamentos topográficos possui programas computacionais de pós-processamento de dados para o processamento dos dados, sejam eles estações totais, GPSs ou *laser scanners*.

O programa Leica Geosystems HDS Cyclone (versão 9.1) foi utilizado para o processamento e registro das nuvens de pontos (*point clouds*), pois estes dados com coordenadas (X,Y e Z), já foram devidamente georreferenciados em campo, a partir das coordenadas do marco topográfico e vértices de referências (vante e ré) inseridas no aparelho durante a varredura.

O próximo passo foi a limpeza ou remoção dos pontos indesejados, são eles: vegetação, poeira, troncos secos, cercas, casas e qualquer objetos desnecessário para finalidade de modelagem da superfície do terreno. Este procedimento poderia ser realizado manualmente no Cyclone, porém pela quantidade enorme de pontos indesejados (vegetação), acima da elevação do terreno, optou-se por uma manipulação semiautomática desses dados em outro programa, denominado 3D Reshaper.

Esta limpeza foi realizada pelo módulo *Ground Extractor* deste programa, que considera a inclinação média do terreno em relação ao eixo vertical e a distância entre os pontos para remoção dos pontos indesejados.

A análise da nuvem de pontos que fazem parte do terreno e os pontos indesejados é feita de forma visual, bem como o nível de suavização da modelagem digital do terreno, a partir da coloração da nuvem de pontos aplicada pelas fotografias capturadas pelo *laser scanner*.

Foi considerada inclinação máxima do terreno de 36° e distância média entre os pontos para a malha do grid de 0,39 para a EM ITB1, em função da morfologia em bancada da área. Já os parâmetros para a EM ITB 2 foram utilizadas a inclinação máxima do terreno de 20° e distância média entre os pontos para a malha do grid de 0,30, por ser um relevo mais suavizado. Esses valores de inclinação e distância média foram definidos visualmente por meio de várias tentativas que melhor representasse o terreno.

Todo processo de limpeza dessa nuvem também é facilitado pelo bom conhecimento da área durante as atividades em campo.

A representação do terreno foi feita pela triangulação da nuvem de pontos já tratados, formando uma rede irregular triangular

(*triangulated irregular network* – TIN) ou malha (*mesh*) irregular de triângulos.

Em seguida, foram geradas curvas de nível (isolinhas), equidistantes a cada 0,50 metros, a partir do MDT para as EMs.

As curvas de nível geradas por malhas triangulares normalmente produzem linhas com aspecto dentilhado e com muitos segmentos retilíneos. Por isso, sempre é recomendado realizar a suavização das linhas para melhor representação do terreno.

Os procedimentos de criação do MDT (*mesh*) e curvas de nível (*contours*) foram realizados no 3D Reshaper, mas também poderiam ter sido feitos pelo módulo MODEL do Leica Cyclone sem alteração da rapidez do processamento.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os levantamentos realizados nas duas áreas de monitoramento de processos erosivos por efeito de ondas ocorreram durante três meses do período hidrológico de seca e não consecutivos, compreendendo os seguintes períodos: 19/08/15 a 21/08/15 (3 dias) e 09/09/15 a 12/09/15 (4 dias).

Foram realizadas varreduras a *laser* em 45 estações de escaneamento, obtendo uma nuvem com 55 milhões de pontos tridimensionais ao longo de 3,15 quilômetros em torno de duas poligonais. Essas poligonais apresentaram erros de visada menores que 20,00 centímetros. E o transporte de coordenadas, com o RTK, obteve precisão máxima de 3,00 centímetros na altimetria e 9,00 milímetros na planimetria.

A partir da nuvem de pontos foi gerado o modelo digital do terreno produzindo 2,4 milhões de triangulações e todo o trabalho gerou cerca de 17 GB de tamanho dos arquivos, incluindo: imagens, dados brutos e curvas de nível.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os produtos finais do levantamento em alta definição por meio do *laser scanner*.

Os levantamentos realizados foram parte de uma primeira etapa, sendo que para o monitoramento da perda de solo por processos erosivos deverão ser realizados outros

“escaneamentos” para comparação entre os MDTs gerados e permitir a quantificação dessa perda com precisão centimétrica.

A periodicidade da revisita aos pontos ainda será definida pela pesquisa, mas em princípio poderão ser realizados levantamentos anuais, nos mesmos períodos do ano deste trabalho. No entanto, este tempo de retorno ao campo poderá ser reduzido ou ampliado em função do grau de erodibilidade do solo.

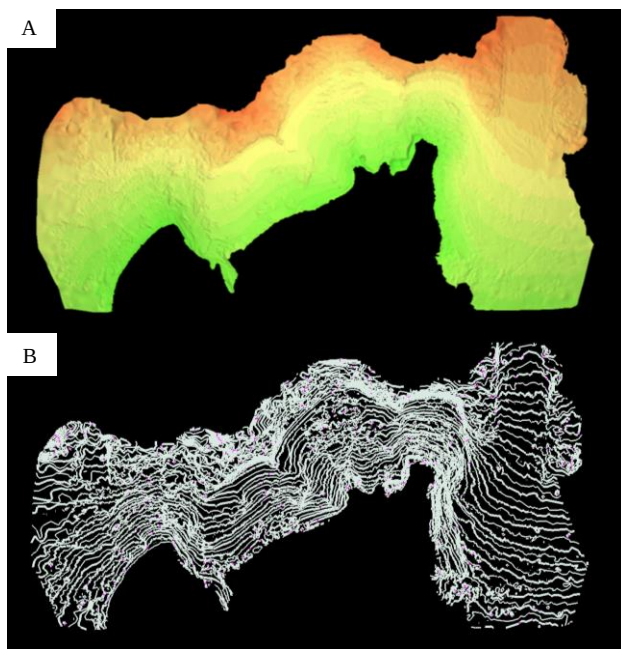


Figura 4. Modelo Digital do Terreno (A) e Curvas de Nível (B) da EM ITB 1.

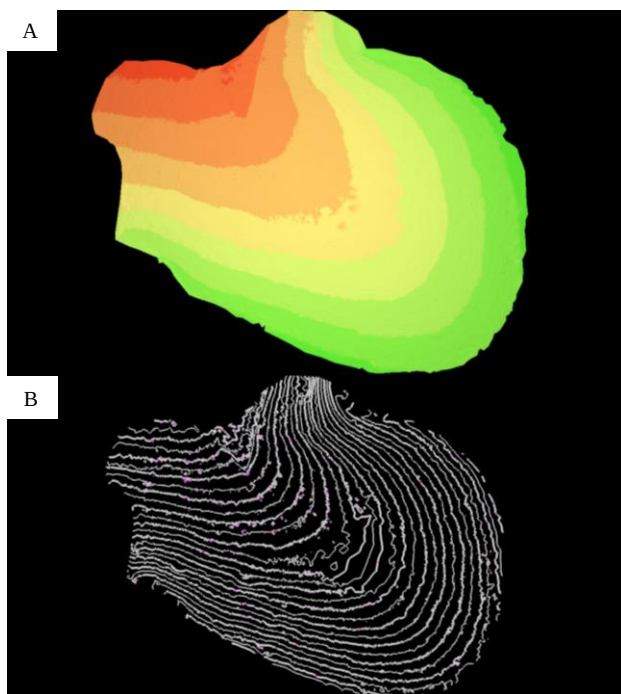


Figura 5. Modelo Digital do Terreno (A) e Curvas de Nível (B) da EM ITB 2.

Contudo, os resultados apresentados pelo *laser scanner* terrestre permitiram a modelagem da superfície do terreno com detalhamento e precisão superiores aos métodos tradicionais de topografia.

Além disso, o monitoramento será útil na quantificação da perda de solo por erosão laminar em margem de reservatório, por meio de levantamentos periódicos das EMs.

Esta técnica também pode ser aplicada ao monitoramento de erosões lineares (ravinas e voçorocas), em margens de reservatório com bordas mais abruptas, em taludes e encostas.

5 CONCLUSÕES

O equipamento *Leica Scanstation C10* (*laser scanner*) atendeu aos objetivos do escopo da pesquisa e o nível de precisão demandado.

Foi necessário 4 a 5 dias para o levantamento das áreas estudadas, sendo 2 dias para viagem ao local (ida e volta em até 150 km), 1 dia para implantação da rede de apoio (com distância menor que 20 km) e 2 dias para o “escaneamento”.

Sugere-se que a equipe de campo seja composta por três pessoas e pelo menos duas delas conheçam e operem bem o equipamento, para tornar o levantamento mais ágil. É importante que o trabalho sempre seja supervisionado por profissional que possua conhecimentos básicos em geoprocessamento.

Recomenda-se que o uso do *laser scanner* terrestre para mapeamentos topográficos de áreas de monitoramento de processos erosivos ou de onda em margens de reservatórios, seja restrito a áreas menores que 0,5 km² e com pouca vegetação, em função do tempo gasto em campo e no processamento dos dados em escritório.

Para áreas com dimensões maiores recomenda-se avaliar a utilização de equipamentos a *laser* aerotransportados (drones e LIDAR) ou acoplados em embarcações dependendo do escopo do levantamento.

A técnica utilizada neste trabalho apresentou

resultados da superfície do terreno em alta definição que permitirá a quantificação da perda de solo por erosão laminar mais precisa que os métodos tradicionais. Porém, serão necessários novos levantamentos nas duas áreas, de forma periódica, para comparação dos modelos digitais do terreno gerados ao longo do tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos profissionais envolvidos neste trabalho, ao laboratório da Gerência de Pesquisa, Serviços e Inovação Tecnológica (GST.E) de FURNAS Centrais Elétricas S.A. e a Universidade Federal de Goiás (UFG). Além desses órgãos, à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo fomento à pesquisa e desenvolvimento de práticas inovadoras.

REFERÊNCIAS

- Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A. (2004) *Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies*, XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 246–251.
- Cacciari, P. P., Futai, M.M. (2014) *Mapeamento de Descontinuidades Geológicas em Túneis Utilizando Imagens Geradas por Scanner a Laser 3D*, Anais do VI Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Goiânia – GO.
- Costa, S. B.; Araujo T. B. (2015) *Levantamento Topográfico Expedido de Boçorocas com Telêmetro a Laser*, Anais do 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Bento Gonçalves - RS.
- Gonçalves, R. (2007) Dispositivo de varredura 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.
- Heritage, G., Hetherington, D. (2007) *Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology*, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 32, pp. 66–74.
- Hoffmeister, D., Tilly, N., Curdt C., Aasen, H., Ntageretzi, K., Hadler H., Willershäuser T., Vött A., Bareth G. (2012) *Terrestrial Laser Scanning for Coastal Geomorphologic Research in Western Greece*, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2008) *Recomendações para Levantamentos Relativo Estático – GPS*. <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/rec_om_gps_internet.pdf>.
- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária - INCRA (2010) *Normas Técnicas para Georreferenciamento de Imóveis Rurais* (aprovada pela Portaria/INCRA/P/Nº578 de 16/09/2010). 2ª Edição.
- Lim, M., Petley, D. N., Rosser, N. J., Allison, R. J., and Long, A. J. (2005) *Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution*, Photogramm. Record, Vol. 20 (110), pp. 109–129.
- Resop, J. P., Hession, W. C. (2010) *Terrestrial Laser Scanning for Monitoring Streambank Retreat: Comparison with Traditional Surveying Techniques*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 136, N°. 10.
- Ribas, W. K. (2008) *Levantamento Cinmático em Tempo Real (RTK)*. Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A., Curitiba - PR.
- Rosser, N. J., Petley, D. N., Lim, M., Dunning, S. A., and Allison, R. J. (2005) *Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion*, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology., Vol. 38, pp. 363–375.