

ANAIS do 35° Congresso Brasileiro de Espeleologia 19 - 22 de julho de 2019 - ISSN 2178-2113 (online)



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 35° Congresso Brasileiro de Espeleologia disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br.

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

ANASTÁCIO, E.M.F. et al. Detecção semi-automática de dolinas ao longo da EF 334/FIOL utilizando imagens drone de alta resolução. In: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019. Bonito. *Anais...* Campinas: SBE, 2019. p.300-305. Disponível em: <a href="http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\_300-305.pdf">http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\_300-305.pdf</a>>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia. Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br





# DETECÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE DOLINAS AO LONGO DA EF 334/FIOL UTILIZANDO IMAGENS DRONE DE ALTA RESOLUÇÃO

SEMIAUTOMATIC SINKHOLE DETECTION THROUGHOUT EF 334/FIOL USING HIGH-RESOLUTION DRONE IMAGES

Emerson Marcello F. ANASTÁCIO (1); Thaís Takayassu MAGALDI (1); Leonardo Silva RODRIGUES (1); Rodrigo de Mello VASCONCELOS (1); Rafael de Sá BARCELLOS (1,2); Natália Bittencourt de O. ANGARTEN (1); Jesus, Caroline M. de JESUS (1); Paula Durante TAGLIARI (1); Luiz Gustavo BEZERRA (1); Alexandre Moreno Richwin FERREIRA (1)

(1) VALEC – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A.

(2) Universidade de Brasília.

Contato: marcello.anastacio@valec.gov.br.

# Resumo

As pesquisas direcionadas ao ambiente cárstico no Brasil vem se modernizando ao longo dos anos por meio dos dados gerados, das tecnologias utilizadas e das metodologias propostas por pesquisadores, empresas de consultoria e empreendedores públicos ou privados, sobretudo da área de infraestrutura (mineração, rodovias, ferrovias etc.). Novas tecnologias são capazes de fornecer os dados necessários à detecção de estruturas geológicas importantes para o desenvolvimento do relevo cárstico, como as dolinas. A inovação relativa a essas identificações tem potencial para reduzir o elevado investimento atualmente demandado dos empreendedores, que envolve recursos humanos, financeiros e materiais que, muitas vezes, não retornam dados totalmente satisfatórios, sobretudo se considerado o tempo gasto com tal identificação. A metodologia proposta neste artigo se baseia em uma classificação semi-automática envolvendo (a) a aquisição do Modelo Digital de Superfície (MDS); b) o cálculo da profundidade das depressões, utilizando a diferença entre o MDS bruto e o MDS correspondente com as depressões preenchidas; (c) o descarte de depressões cársticas falsamente identificadas, usando atributos morfométricos; e (d) a validação dos resultados obtidos, comparando-os com feições identificadas em imagens DRONE e verificação em campo. A área de estudo escolhida coincide com a faixa de 500 metros ao longo do trajeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (EF 334/FIOL), entre Serra do Ramalho (BA) e Correntina (BA), local de exposição do Grupo Bambuí e ocorrência de dolinas. Para o mapeamento, foram considerados valores de espessura do preenchimento (P), Área (A) e Índice de Circularidade (IC) maiores que 0,25 metros, 10 m<sup>2</sup> e 0,2, respectivamente, obtidos da comparação dos resultados prévios com dolinas já conhecidas. Os resultados indicam que é possível mapear potenciais dolinas com considerável grau de confiança e rapidez, utilizando imagens de alta resolução obtidas por DRONE.

Palavras-Chave: geoprocessamento; modelo digital de superfície; dolinas; ferrovia.

# Abstract

The research directed to the karstic environment in Brazil are modernizing through out the years by the generated data, technologies used and the methodologies proposed by researchers, consulting companies, public and private entrepreneurs amongst all the infrastructure area (mining, roads, railways etc). New technologies are capable of providing the data needed to the detection of important carstic development structures such as sinkholes. The innovation related to these identifications will lead to the reduction of the currently high investment made by the entrepreneurs that involve human, financial and material resources who often don', t giving back satisfactory results. The methodology proposed in this article is based on a semi automatic classification involving (a) the acquisition of a Digital Surface Model (DSM), (b) the calculation of the depth of the depressions using the difference of the raw model with the filled model, (c) the rule out of false positives and (d) the validation of the resulting data comparing it with DRONE imagery and field verification. The study area coincides with a buffer of 500 meter over the Ferrovia de Integração Oeste-Leste (EF334/FIOL), between the municipalities of Serra do Ramalho (BA) and Correntina (BA), site of outcrops of Bambuí Group and sinkhole occurrence. For the mapping were used values of P, IC and A higher than 0.25 meters, 0.2 and 10 m<sup>2</sup> respectively, obtained with comparison of previous results with known sinkholes. The results indicated that it is possible to map potential sinkholes with a with a considerable level of confidence and speed, using high resolution DRONE imagery.

Keywords: geoprocessing; digital terrain model; sinkholes; railroad.





# 1.1 INTRODUÇÃO

A dissolução de rochas, sobretudo carbonáticas e evaporíticas, pode produzir vazios subterrâneos que dão origem a dolinas (depressões semicirculares no terreno que podem conter água, sedimentos argilosos e/ou vegetação (Figura 1).



**Figura 1:** Modelo simplificado dos processos de desenvolvimento de dolinas. Fonte: British Geological Survey (disponível em <u>https://bit.ly/2CISmUM</u>).

O desenvolvimento de dolinas requer regiões com (a) rochas solúveis (calcários, dolomitos, mármores, carbonatitos, evaporitos etc.) com fraturas permeáveis; (b) relevo com gradiente hidráulico moderado a alto; e (c) clima com disponibilidade de água (KARMANN, 2009). Se o clima é tropical úmido, as rochas calcárias comumente são capeadas por solos (carste encoberto) de espessura variada. Se o clima é árido, menos propício ao intemperismo químico, os calcários geralmente afloram ou estão muito próximos à superfície (carste exumado).

As dolinas, e o carste como um todo, possuem riscos intrínsecos de natureza (i) geotécnica (recalque, desabamento etc.); (ii) ambiental (contaminação de mananciais subterrâneos); e/ou (iii) material (perda de vidas humanas, lavouras etc.). Portanto, conhecer a geologia de uma região cárstica em detalhe (distribuição espacial das feições cársticas, os fatores que favorecem possíveis eventos de subsidência e a dinâmica hidrogeológica de uma região) é fundamental ao planejamento e à execução de obras de infraestrutura como ferrovias, rodovias e linhas de transmissão (SANTOS, 2014).

O mapeamento de dolinas por análise da superfície é uma atividade relativamente simples, geralmente apoiada em outras técnicas de investigação geológica direta (sondagens mecânicas) e indireta (SEV, gravimetria) do terreno. Há uma ampla bibliografia que propõe a utilização de sensoriamento remoto e geoprocessamento (Soriano et al. 1995; White et al. 1986) para tal mapeamento.

\_\_\_\_\_

De modo especial, os Modelos Digitais de Superfície (MDS) são amplamente utilizados, pois permitem a avaliação da distribuição destas feições cársticas. Neste contexto, o presente artigo se utiliza de metodologia semi-automática em ambiente SIG para identificar dolinas ao longo da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (EF 334/FIOL), utilizando informações altimétricas de imagens de alta resolução obtidas por DRONES.

# 2. METODOLOGIA

# 2.1 Delimitação da Área de Estudo

A área de estudo abrange um *buffer* de 500 metros ao redor do eixo da EF 334/FIOL na região de ocorrência dos calcários cársticos do Grupo Bambuí, entre Serra do Ramalho/BA e Correntina/BA (*ca.* 317,3 km de ferrovia; Figura 2).



**Figura 2:** Área de estudo. Em vermelho, áreas potencialidade espeleológica muito alta (vermelho) conforme JANSEN et al (2012).

#### 2.2 Arquivos vetoriais e matriciais

Para o processamento digital foram utilizados arquivos vetoriais (.shp) de geologia (CPRM, 2003), hidrografia (ANA), potencialidade espeleológica (JANSEN et al. 2012) e curvas de nível do projeto da ferrovia (topografia de detalhe e restituição topográfica a partir de ortofotocartas).

Também foram utilizadas imagens de resolução espacial entre 5 e 8 cm, resolução temporal de 60 dias e largura entre 200 e 250 m ao redor do eixo ferroviário (obtidas por um sensor CMOS 1" 20M acoplado ao DRONE DJI Phantom 4 Pro); cenas SRTM (USGS) em formato HGT, com resolução radiométrica de 16 bits, resolução espacial de 30 m na região entre a área coberta pelas fotos de DRONE até 500 m; e Modelo Digital de Superfície (MDS) gerado a partir das imagens mencionadas.





### 2.3 Rotinas de geração e validação dos dados

Os dados foram tratados em um *Model Builder*, adaptando a metodologia proposta por CARVALHO JÚNIOR et al (2014) (Figura 3).



**Figura 3:** Fluxograma de processamento semi-automático das informações em ambiente SIG, construído com a ferramenta *Model Builder* do *software* ArcGIS 10.6. As tarefas/ferramentas (A - J) utilizadas bem como os produtos gerados em cada etapa (1 - 11) estão representadas pelos retângulos laranjas e pelas elipses verdes, respectivamente.

fluxograma é 0 de processamento relativamente simples, apesar de ter várias etapas. Em resumo, Modelo Digital de Superfície (MDS) (Figura 3; 1) é processado para que as depressões existentes sejam preenchidas (Figura 3; A), dando origem a um novo dado raster contendo apenas as depressões preenchidas (Figura 3; 2). Com a calculadora raster (Figura 3; B) são calculadas as espessuras dos preenchimentos (P), basicamente subtraindo o raster bruto do raster preenchido, dando origem a um novo raster com os valores de preenchimento indexados (Figura 3; 3). O raster valores de preenchimento, com então, é reclassificado (Figura 3; C), para separar as depressões em classes de acordo com a espessura de preenchimento (Figura 3; 4). As depressões de interesse (ver item 3) são selecionadas de acordo com o atributo de espessura do preenchimento, dando origem a um novo raster (Figura 3; 5) e, por meio da ferramenta "raster to polygon" (Figura 3; E), é convertida para vetor (Figura 3; 6).

Deste ponto em diante, apenas dados vetoriais são tratados. O arquivo .shp gerado na etapa anterior é editado de modo a incluir o campo "CI" em sua tabela de atributos (Figura 3; F), que abrigará os valores do Índice de circularidade (ver item 3). No arquivo .shp gerado (Figura 3; 7) são adicionados os valores dos atributos de geometria "Área" e "Perímetro" (Figura 3; G). Com o arquivo .shp que contém os valores de "Área" e "Perímetro" (Figura 3; 8) são calculados os valores do "Índice de Circularidade" (Figura 3; H), por meio da expressão

\_\_\_\_\_

12.56\*[POLY\_AREA/([PERIMETER]\*[PERIMET ER]), notação da expressão CI =  $4\pi A/P^2$  em ambiente SIG, dando origem a um novo .shp (Figura 3; 9). CI, A e P se referem, respectivamente, ao Índice de Circularidade, à Área e ao Perímetro.

As feições com CI de interesse (Figura 3; I) são selecionadas dando origem a um novo arquivo .shp (Figura 3; 10) e, logo após, as feições com CI e A (Figura 3; J) de interesse (ver item 3) são selecionadas dando origem ao arquivo .shp com o mapeamento das possíveis dolinas para validação (Figura 3; 11). O processo então recomeça até todas as cenas terem sido processadas. A validação dos dados se deu em duas etapas. A primeira ocorreu mediante a confrontação dos dados obtidos do processamento digital com dolinas já conhecidas e mapeadas. A segunda etapa, em campo, buscou avaliar *in loco* as possíveis dolinas resultantes da primeira validação.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelas próprias características do levantamento, as informações altimétricas das imagens obtidas por DRONE incluem a superfície da área amostrada (incluindo as copas das árvores, por exemplo). Tal fato pode retornar dados não confiáveis, caso a imagem seja utilizada indiscriminadamente. Portanto, foi aplicado um tratamento digital para eliminar as copas das árvores e demais informações indesejáveis, no intuito de gerar um Modelo Digital do Terreno (MDT).





este tratamento digital Contudo. gerou depressões onde antes haviam as copas das árvores, o que poderia gerar falsos positivos. Portanto, optouse por utilizar o Modelo Digital de Superfície (MDS), tomando o cuidado de verificar a validade de cada feição, cruzando as informações geradas pelo MDS com as imagens de DRONE e com as curvas de nível de projeto. Como descrito no item 2.2, as imagens de DRONE apenas abarcam a faixa entre o eixo ferroviário e 250 metros. Entre 250 e 500 metros foram utilizados MDT derivados de imagens SRTM, que não demandaram qualquer tratamento.

Os dados resultantes foram analisados em vários cenários, utilizando valores de CI, A e P distintos em cada um deles. Com base nas dolinas já conhecidas na área, que foram utilizadas para balizar os resultados, considera-se que a metodologia se mostrou mais satisfatória quando utilizados os parâmetros de Espessura do preenchimento (P) > 0,25 m; Índice de Circularidade (CI) > 0,20; e Área (A) > 10 m<sup>2</sup>.

Com tais atributos, o processamento retornou 262 dolinas ao longo dos 168,65 km<sup>2</sup> analisados (*ca.* 1,55 dolinas/km<sup>2</sup>). Das possíveis dolinas retornadas pelo processamento, 97 ainda despertavam dúvidas, e foram alvo de incursão em campo, para validação. Após a etapa de campo, 15 alvos foram descartados como possíveis dolinas, resultando em 247 possíveis dolinas mapeadas considerando informações de superfície (*ca.* 1,46 dolinas/km<sup>2</sup>).

Amostras dos resultados do processamento em cada etapa são apresentadas entre a Figura 4 e a Figura 7.



Figura 4: Amostra das imagens utilizadas no processo.

\_\_\_\_\_



Figura 5: Curvas de nível (verde) sobre imagens utilizadas.



**Figura 6:** Curvas de nível (verde) sobre imagens utilizadas e resultados do processamento (em azul).



**Figura 7:** Modelo Digital de Superfície (MDS) obtido pelas imagens DRONE com a indicação das possíveis dolinas (em azul) identificadas pelo processamento.





As possíveis dolinas identificadas possuem valores médios de CI e A da ordem de 0,90 e 2800 m<sup>2</sup>, respectivamente (Tabela 1). Das possíveis dolinas identificadas pelo processamento, apenas 47 estão localizadas dentro da Faixa de Domínio da FIOL (40 metros para cada lado do eixo ferroviário).

Dolinas	Área (m²)	Perímetro (m)	CI
Valor mínimo	35,69	22,29	0,41
Valor médio	2781,74	158,90	0,90
Valor máximo	43057,42	1044,21	1,00

Tabela 1:	Dados-resumo	das	dolinas	identificadas.
T COLOR TO	Dudob robuillo	aus	aomao	iaominitation addition

# 4. CONCLUSÕES

As imagens de alta resolução obtidas por DRONE se mostraram satisfatórias pela aplicação da metodologia. Com alguns cuidados prévios, é possível utilizar imagens de DRONE com grau de confiabilidade bastante razoável em levantamentos desta natureza. Considerando que as dolinas mapeadas por análise das imagens utilizadas serão confirmadas após outras investigações geológicas indiretas mais detalhadas, diretas e/ou а metodologia terá alcançado uma taxa de acerto de 95%, o que é bastante satisfatório.

Levantamentos por DRONE cada vez mais se mostram promissores para a aquisição de imagens de alta resolução espacial e sua utilização na detecção de dolinas. Em condições favoráveis, estudos futuros poderão ser realizados utilizando dados LiDAR (Light Detecting and Ranging), tanto para detectar dolinas quanto para estimar a evolução das subsidências a elas associadas, conforme sugerem FILIN & BARUCH (2010); FILIN et al. (2011); SHAW-FAULKNER et al. (2013); WALTHAM et al. (2005), entre outros.

Com dados deste tipo será possível contornar o problema com a copa das árvores, dada a capacidade dos levantamentos a *laser* em penetrar o dossel da vegetação. Contudo, o território brasileiro ainda possui extensas áreas que não dispõem de tais dados. Outra possibilidade reside na classificação de imagens multi-espectrais.

Considerando que as áreas onde ocorrem as dolinas podem apresentar variações na umidade do solo, no tipo de sedimentação, na presença de água ou até mesmo na distribuição espacial da vegetação,

\_\_\_\_\_

a extensa gama de dados de sensoriamento remoto disponível oferece uma forma alternativa de detecção de dolinas.

A combinação de Modelos Digitais de Terreno e imagens de satélite de alta resolução tem produzido ótimos resultados em pesquisas voltadas à geomorfologia cárstica (GUIMARÃES et al. 2005; SIART et al. 2009).

Com o conhecimento que tais levantamentos podem proporcionar, espera-se contribuir com a definição de ações de engenharia detentoras da maior margem de segurança possível, evitando que sejam incorporados sérios riscos construtivos e operacionais para os empreendimentos pretendidos.

Além disso, acredita-se que estes dados têm potencial para direcionar as ações ambientais de controle e/ou mitigação dos impactos eventualmente imputados ao ambiente subterrâneo por empreendimentos de grande porte, como a FIOL.

Portanto, sugere-se que sejam realizados estudos de geofísica como Sondagens Elétricas Verticais (SEV), gravimentria e/ou Ground Penetration Radar (GPR), bem como de hidrogeologia, seja para a confirmação das informações obtidas por levantamentos em superfície ou para o dimensionamento das atividades necessárias à proteção dos atributos físicos e bióticos relacionados ao carste.

Com dados desta natureza é possível construir um modelo geológico da região com nível de detalhamento tal que ações específicas podem ser direcionadas de acordo com as características de cada área, evitando assim que sejam dispensados recursos humanos e/ou materiais desnecessários ou que não estejam de acordo com as necessidades do carste em cada região.

Cabe salientar, ainda, que os dados levantados pelo presente artigo não devem ser utilizados indiscriminadamente, posto que ainda carecem de estudos geológicos específicos para a confirmação ou não de que as depressões levantadas são realmente dolinas. Tal confirmação só poderá ocorrer com a investigação do substrato rochoso por sondagens diretas ou indiretas já recomendadas.

# REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. Base Hidrográfica do Brasil. Disponível em <u>http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home</u>.





- CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GILLESPIE, A.R.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S.; SILVA, N.C. Karst Depression Detection Using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-Derived Digital Elevation Models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sens**. 2014, 6, 330-351.
- CPRM. **Mapa geológico do estado da Bahia**. SOUZA, João Dalton de; MELO, Roberto Campelo de; KOSIN, Marília (Coords.). 2003. Disponível em <u>http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/8665</u>.
- FILIN, S.; BARUCH, A. Detection of sinkhole hazards using airborne laser scanning data. Photogramm. Eng. **Remote Sens.** 2010, 76, 577–587.
- FILIN, S.; BARUCH, A.; AVNI, Y.; MARCO, S. Sinkhole characterization in the Dead Sea area using airborne laser scanning. **Nat. Hazard.** 2011, 58, 1135–1154.
- GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; SOUZA MARTINS, E.M.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Detection of karst depression by ASTER image in the Bambui Group, Brazil. **Proc. SPIE**: 2005; 5983, pp. 328–339.
- JANSEN, D.C; CAVALCANTI, L. F. LAMBLÉM, H. S. Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000. **Revista Brasileira de Espeleologia**, Brasília, 2012, v. 2, n.1.
- SANTOS, A.R. Áreas de risco para a engenharia em calcários cársticos: modelagem geológica e soluções construtivas. O case de Cajamar – SP. Revista Fundações & Obras Geotécnicas. Ano 4, nº 45. P 52-62. 2014.
- SHAW-FAULKNER, M.G.; STAFFORD, K.W.; BRYANT, A.W. Delineation and Classification of Karst Depressions using LiDAR: Fort Hood Military Installation, Texas. In Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Carlsbad, NM, USA, 1 May–15 August 2013; 459–468.
- SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology** 2009, 112,106–121.
- SORIANO, M.A.; SIMÓN, J.L. Alluvial dolines in the central Ebro Basin, Spain: A spatial and developmental hazard analysis. **Geomorphology** 1995, 11, 295–309.
- USGS. United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) USGS EROS Archive. Disponível em <u>https://earthexplorer.usgs.gov/</u>.
- WALTHAM, T.; BELL, F; CULSHAW, M. Ground investigation in sinkhole terrains. In Sinkholes and Subsidence; Springer: Chichester, UK, 2005; p. 181–204.
- WHITE, E.L.; GERT, A.; WHITE, W.B. The influence of urbanization in sinkhole development in central Pennsylvania. Environ. Geol. Water Sci. 1986, 8, 91–97.

\_\_\_\_\_