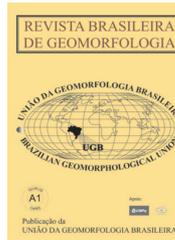


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 3 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1645>



MAPEAMENTO DE DOLINAS: DESAFIOS E POSSIBILIDADES DO USO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

DOLINES MAPPING: CHALLENGES AND POSSIBILITIES OF USING DIGITAL ELEVATION MODELS

Cristiano Fernandes Ferreira

*Departamento de Geografia, Universidade de Brasília e Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
Parque Nacional de Brasília, Via EPIA, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70635-800. Brasil*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9555-465X>

E-mail: cristiano.ferreira@icmbio.gov.br

Rogério Elias Soares Ugoda

Departamento de Geografia, Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70910-900. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9448-1313>

E-mail: rogeriouagoda@unb.br

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
18/04/2019

Aceito (Accepted):
30/04/2020

Palavras-chave:

Dolinas; Geomorfologia Cárstica;
Detecção de Feições.

Keywords:

Dolines; Karst Geomorphology;
Features Detection.

Resumo:

As dolinas são feições indicadoras do sistema cárstico e além de atestarem processos evolutivos, também apresentam importância no contexto das dinâmicas hídricas e ambientais. O mapeamento dessas feições serve como base para diversas análises da paisagem e exige grande dispêndio de tempo e recursos, com significativa subjetividade inerente à técnica de aquisição ou à problemas de escala. A melhoria da resolução espacial nas bases de dados permitiu maior precisão nos mapeamentos de dolinas com o uso de modelos digitais de elevação e técnicas de geoprocessamento, automatizadas ou manuais. Entretanto, as dificuldades de detecção dos pontos de absorção que individualizam as dolinas, e os limites estabelecidos para seu perímetro dificultam a comparação entre estudos, agregando incertezas nos atributos espaciais como área, profundidade e eixo principal. Neste artigo são discutidas as principais metodologias de mapeamento de dolinas e sintetizadas as estratégias mais utilizadas para superar erros de omissão de feições verdadeiras, problemas com a detecção de falsos positivos e a delimitação mais precisa das depressões cársticas.

Abstract:

Dolines are considered karst indicator features, attesting evolutionary processes and controlling hydrodynamic and environmental processes. The mapping of these features assists in several types of landscape analysis demanding time and funds, besides presenting subjectivity related to acquisition technique or scale problems. The spatial resolution improvement allowed accuracy in the mapping

of dolines using digital elevation models and geoprocessing, automated or not. Hindrances in point detection and demarcation of depression limits do not allow the correct comparison between attributes from different studies, such as perimeter, area, depth, and main axis. This paper discusses the main methods for the mapping of dolines and synthesized the mean strategies to overcome errors such as omission of true features, false positive or spurious feature counting, beside the improvement of the accurate individualization of karst depressions.

1. Introdução

Dolinas são feições deprimidas, de fluxo centrípeto, sem conexão com redes de drenagem superficiais e sua presença na paisagem pode ser considerada uma forma indicadora do sistema cárstico (FORD e WILLIAMS, 2007). Representam a conexão entre a superfície e o meio subterrâneo, tendo forte relação com o maior desenvolvimento do epicarste (WILLIAMS, 1983; KLIMCHOUK, 1995) e possuem importância ambiental por concentrarem fluxos hídricos autogênicos e recursos tróficos à fauna subterrânea. Essas feições funcionam como moderadoras do aporte hidrológico aos sistemas aquíferos subjacentes, tanto epicárstico, vadoso ou freático (WILLIAMS, 2008) e frequentemente estão relacionadas a problemas ambientais na superfície, como alagamentos ou colapsos repentinos (GUTIERREZ *et al.*, 2014). Também é comum que dolinas estejam associadas a sistemas de cavernas, muitas vezes servindo de única entrada disponível para acessar essas feições do carste subterrâneo, permitindo, assim, uma maior compreensão da evolução e funcionamento dos ambientes cársticos como um todo.

O mapeamento de dolinas é realizado há muito tempo como um procedimento de caracterização geomorfológica de regiões cársticas, podendo auxiliar interpretações evolutivas dessas paisagens, sobretudo quando realizadas com o apoio de análises morfométricas (WILLIAMS, 1972; KARMANN, 1994). Esses mapeamentos podem ser utilizados como precursores de testes qualitativos mais detalhados, com traçadores corantes, para definição de rotas de fluxo e delimitação de bacias hidrográficas subterrâneas (ANGEL, *et al.*, 2004). Em regiões com grande incidência de colapsos também, podem ser aplicadas técnicas de mapeamento de dolinas, baseadas na densidade de ocorrências, de modo a produzir estimativas prévias de maior susceptibilidade a tais acidentes (CAHALAN e MILEWSKI, 2018; SALLES *et al.*, 2018). A localização dessas importantes feições de concentração de fluxo também é utilizada em análises de vulnerabilidade intrínseca de contaminação dos aquíferos cársticos (ZWAHLEN, 2004).

Poucos trabalhos realizaram mapeamentos de dolinas no Brasil, em especial utilizando de modelos digitais e abordagens automatizadas de detecção. Na maior parte dos trabalhos realizados nessa área foi utilizada fotointerpretação em escalas abrangentes (1:60.000 p.ex.), que não permitem uma clara visualização das feições. A identificação de depressões cársticas por métodos manuais, a partir da delimitação visual em fotos aéreas, imagens de satélite, mapas topográficos ou diretamente no campo, pode significar uma tarefa consideravelmente complexa, subjetiva, imprecisa e demorada, especialmente em grandes áreas. Em âmbito mundial, por outro lado, observou-se nos últimos tempos o incremento do uso de abordagens automatizadas com o auxílio de modelos digitais e bases de alta resolução (FERREIRA e UAGODA, 2020).

O objetivo deste artigo é investigar de forma detalhada os trabalhos e as metodologias empregadas para detecção remota de dolinas, de forma automatizada ou não, especialmente a partir de modelos digitais de elevação (MDE). Procedimentos adotados em trabalhos que utilizaram novas fontes de dados de maior resolução espacial e uso de técnicas computacionais foram confrontados com aqueles que utilizaram métodos tradicionais de mapeamento de dolinas. A intenção é avaliar as ferramentas adotadas, os filtros e demais soluções encontradas nos trabalhos pesquisados para diferenciar feições naturais das artificiais, bem como observar os limites e recortes mais utilizados na delimitação de dolinas. Com base nesta investigação pretende-se estabelecer as estratégias e parâmetros prévios para a futura realização do mapeamento de depressões em uma extensa área cárstica nacional, de difícil recobrimento por métodos tradicionais.

2. Detecção X Delimitação

O mapeamento sistemático de dolinas requer a definição prévia de algumas estratégias e protocolos. Dentre elas está a delimitação geográfica, a escolha da base de dados, a escala mais apropriada, a forma de detecção do ponto mais representativo da dolina e, sobretudo, a definição do método para determinar seu perímetro. A

localização pontual das dolinas pode ser realizada com a identificação do centroide, como indicado por Denizman (2003) para uma região de carste coberto e relevo suave na Flórida, com o propósito de diminuir a subjetividade e dinamizar o trabalho. Ford e Williams (2007) defendem que a locação espacial de uma dolina, equivalente ao ponto de detecção, ocorra a partir do nível mais baixo da depressão em que convergem os fluxos, e não necessariamente no centro geométrico da feição. Bondesan *et al.* (1992) ressaltam a importância da distribuição dos pontos mais profundos das dolinas, por representarem o foco de corrosão acelerada, equiparáveis aos fundos de vales, ou talvegues em sistemas fluviais abertos. Segundo esses autores, o ponto mais representativo de uma dolina equivaleria ao sumidouro, ou ponto de absorção para o sistema subterrâneo. A identificação desses pontos auxiliaria, portanto, na tarefa de subdivisão das dolinas em uma situação de adjacência, ou seja, em depressão composta, na qual a existência dos pontos de infiltração permite a individualização das dolinas internas, ao passo que o centroide pode generalizar essas nuances. No entanto, em situações de dolinas colmatadas, de fundo plano, o centroide pode ser a solução possível, visto que somente com escavação seria possível identificar de fato o ponto de absorção.

A determinação dos pontos de absorção por métodos tradicionais com mapas topográficos, fotos aéreas e campo, nem sempre pode ser realizada de forma inequívoca. Muitas vezes, é mais prático identificar e localizar a depressão pelo formato areal mais amplo do que determinar o seu ponto mais profundo. Isso é especialmente verdadeiro em mapas topográficos de pequena escala ou por meio de análise de fotos aéreas em regiões de densa vegetação, que dificultam a identificação precisa dos pontos de absorção. Em outras situações, como em grandes depressões compostas, pode ser mais fácil determinar os pontos de absorção do que separar cada dolina interna individualmente, em virtude da falta de um critério de fácil execução, que defina o perímetro das feições, muitas vezes em pontos altimétricos distintos.

A delimitação do perímetro é mais complexa do que a localização do ponto representativo de uma dolina. Os métodos mais tradicionais utilizados para mapeamento indireto do perímetro de dolinas, ou seja, por mapas ou imagens, são: 1) identificação da curva de nível fechada mais externa no caso dos mapas topográficos; 2) identificação dos divisores topográficos da bacia de contribuição para cada ponto de absorção; 3) identificação da linha de quebra de relevo (geralmente

em imagens ou campo).

A delimitação manual a partir das linhas fechadas mais externas em mapas topográficos, apesar de laboriosa, é simples, bastando transpor o polígono formado pela delimitação da feição em papel vegetal ou ambiente digital. Entretanto, segundo Palmer (2007), a representação de dolinas em mapas topográficos típicos, por meio de contornos fechados, alcança de 10 a 25% das feições realmente existentes, normalmente ressaltando apenas as maiores depressões. A identificação das dolinas em mapas topográficos depende, portanto, do tamanho dessas feições, da escala do mapa e da equidistância vertical da linha topográfica. Segundo Bondesan *et al.* (1992), análises morfométricas em mapas topográficos somente alcançam uma acurácia suficientemente detalhada em escalas maiores que 1:10.000. Ford e Williams (2007) enfatizam que mesmo em escalas grandes e intervalo pequeno de contorno, informações significativas são perdidas, especialmente para feições rasas, que não ultrapassem a equidistância das linhas topográficas.

O método baseado na bacia de contribuição para cada ponto de absorção, com a delimitação dos divisores topográficos por fotointerpretação (1:15.000) foi utilizado por Williams (1972) para mapear grandes depressões fechadas justapostas na Nova Guiné. Ao traçar em planta os divisores topográficos que bordejavam os pontos de absorção dessas depressões, o autor identificou um padrão em rede celular, com formatos hexagonais ou pentagonais, que recobriam toda a superfície, ao que atribuiu o nome de carste poligonal. O uso de mapas topográficos para esse tipo de delimitação também é possível, porém com as mesmas perdas de informações por conta da escala e da equidistância vertical, como já mencionado. Esse método foi amplamente utilizado posteriormente para delimitação de dolinas ao redor do mundo, especialmente em regiões tropicais com incidência de padrões poligonais. Karmann (1994) identificou no carste do Vale do Ribeira uma frequência de feições similar à alcançada por Williams (1972), porém, utilizando fotografias em escala menos detalhada (1:25.000). Apesar da eficácia do método para áreas de carste poligonal, a sua adoção para áreas de dolinas isoladas na paisagem tende a magnificar exageradamente o tamanho das feições, podendo não representar adequadamente a paisagem cárstica (Figura 1). Além disso, como todo trabalho de fotointerpretação, tal método é passível de certo grau de subjetividade e requer muito tempo e trabalho para abranger grandes áreas.

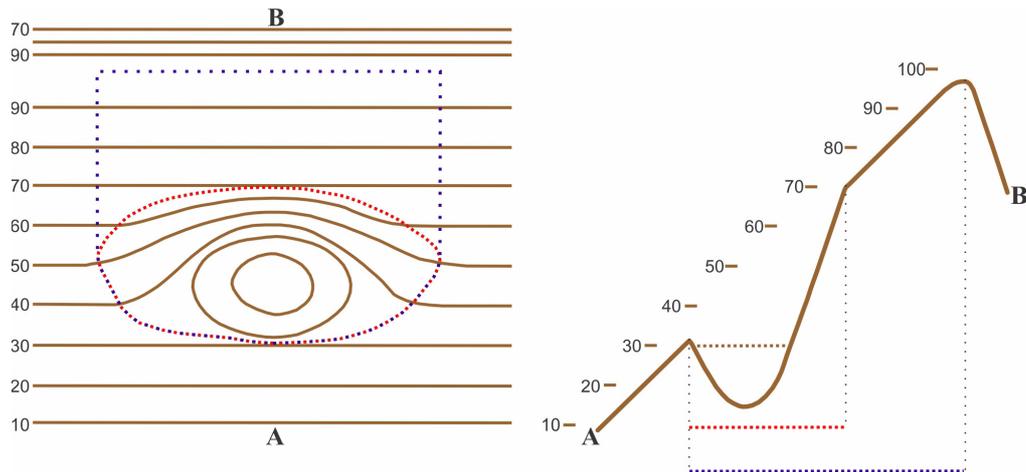


Figura 1 - Representação em planta de uma dolina no mapa topográfico e correspondente perfil em um relevo inclinado. O pontilhado em azul demarca o perímetro da dolina no método por bacia topográfica, abrangendo uma área maior. A linha pontilhada vermelha representa o método da quebra de relevo. Abrangendo a menor área nessa simulação, o método da linha de contorno fechada mais externa é representado pela cor marrom (pontilhada no perfil e contínua no mapa topográfico). Fonte: Adaptado de Bondesan *et al.* (1992).

Por fim, o método baseado na mudança abrupta da inclinação da superfície, ou quebra de relevo, foi defendida por Šušteršič (1994) em alternativa à adoção dos métodos anteriores. Segundo o autor, a identificação do perímetro de dolinas é relativamente fácil por meio de fotos aéreas (1:5.000, p. ex.), com a separação entre a superfície cárstica “normal”, da influenciada por processos de encosta, induzidas pela influência centrípeta da depressão. Essa abordagem, que separa mecanismos superficiais e cársticos, pode indicar que o ajuste de declives compete com processos subterrâneos de dissolução na configuração da feição. Por esse motivo, o perímetro não é altimetricamente regular, como no caso da linha topográfica mais externa, podendo apresentar variações significativas em relevo mais movimentado (Figura 2). Apesar de mais indicado para áreas com ocorrência de dolinas dispersas na paisagem, o fator subjetividade na fotointerpretação pode ser maior do que na identificação dos divisores topográficos, especialmente no caso de feições menores ou de formato mais suave. Por outro lado, fatores como a mudança de aspecto da vegetação ou o efeito de sombra favorecem a identificação da ruptura de relevo na fotointerpretação.

A coleta de dados *in loco* é uma alternativa para diminuir imprecisões ou subjetividades na utilização de bases remotas para delimitação de dolinas. Embora o mapeamento de campo possa ser um método capaz de gerar dados acurados para análises morfométricas, o dispêndio de tempo e a pequena abrangência de áreas cobertas tornam essa opção pouco prática (BONDE-

SAM *et al.*, 1992; FORD e WILLIAMS, 2007). A decisão de qual limite deve ser usado para representar o perímetro permanece, pois nem sempre a dolina se apresenta uniforme, circular, em uma paisagem aplainada, especialmente em ambientes de alta interferência de processos superficiais, como no carste tropical. Apesar dessas dificuldades, trabalhos recentes ainda se utilizam dessa ferramenta, seja para checar o levantamento prévio de gabinete, seja para a efetiva aquisição principal de dados e mapeamento. Como exemplo, Keskin e Yilmaz (2016), mapearam 940 dolinas com o uso de GPS, trena de fita e a laser, em uma área de 92km² na Turquia.

Existem algumas técnicas para mapear e obter os principais dados morfométricos de dolinas em campo. O mais utilizado é a partir da topografia via instrumentos de medida como bússola, clinômetro, trena, GPS ou teodolito, a partir dos quais é possível estabelecer medições radiais ou fechamento de poligonais, como normalmente utilizado no mapeamento de cavernas (RUBBIOLI e MOURA, 2005). Para feições de grandes tamanhos, uma possibilidade é a coleta de pontos ou caminhamento com GPS ao longo de seu perímetro e aquisição do ponto de maior profundidade. Entretanto, essas técnicas carecem de precisão em função do erro inerente aos aparelhos, especialmente em áreas muito vegetadas ou acidentadas. Bondesan *et al.* (1992) consideram que um dos melhores métodos foi o proposto por Šušteršič (1986, Apud BONDESAM *et al.*, 1992) ao utilizar um teodolito instalado no ponto mais profundo da dolina, de onde foram traçados seis perfis radiais até as bordas. A partir de cada um

desses perfis foram tomadas 12 medidas equidistantes de altura em relação ao solo e assim determinadas 72 coordenadas relativas, de razoável acurácia para posterior processamento computacional. Para uma dolina de

tamanho “médio” em ambiente não florestado, Šušteršič levou uma hora e meia para realizar essas medidas, algo praticamente inviável para áreas extensas e com grande adensamento de feições.

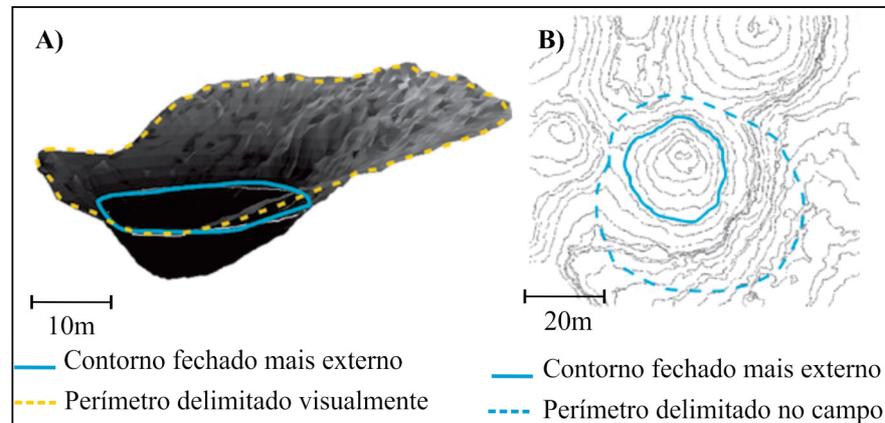


Figura 2 - Diferenças de perímetro entre o conceito de contorno fechado e quebra de relevo. A) Perímetro delineado a partir de um MDE LIDAR sombreado; B) Perímetro delineado em campo versus mapa topográfico. Fonte: Adaptado de Šegina et al. (2018).

Tabela 1: Matriz qualitativa de avaliação dos métodos manuais de delimitação de dolinas. Prós sinalizados pelo símbolo mais (+) e contras pelo símbolo menos (-). *A escala é 1:1 (apenas para pequenas áreas).

	Curva Fechada	Bacia Topográfica	Quebra de Relevo	Trabalho de Campo
Facilidade	++	+	+ -	--
Tempo	+ -	+ -	-	--
Subjetividade	++	+ -	+ -	+ -
Subdimensiona	-	+	++	+ -
Superdimensiona	+	--	++	+ -
Precisão morfológica	+ -	-	++	+
Ponto mais profundo	--	+ -	+ -	++
Processos de encosta	+ -	+ -	+	++
Processos hidrológicos	+	++	+ -	+ -
Depende de grande escala	--	+ -	--	--*
Depende de imagens	++	+ -	-	+ -
Acertos e Erros	11 e 8	10 e 9	11 e 8	10 e 12
Precisão final	1,38	1,11	1,38	0,8

De um modo geral, tendo em vista a análise qualitativa sintetizada (Tabela 1), percebe-se os prós e contras em todos os métodos, dependendo principalmente dos propósitos do mapeamento em curso, nível de acurácia desejado, tamanho da área de estudo, tempo e acesso às fontes de dados disponíveis. Os resultados dessa comparação livre, realizada conforme a experiência dos presentes autores no assunto, mostra a equivalência dos métodos por curva fechada (maior facilidade e menor

subjetividade) e quebra de relevo (fatores morfológicos), seguidos pela delimitação por bacia topográfica (que contempla todos os processos hidrológicos). A delimitação em campo, apesar de vantajosa para confirmar o ponto mais profundo e permitir analisar corretamente os processos de encosta na conformação da dolina, é penalizado especialmente por depender do fator escala (1:1), dificuldade e dispêndio de tempo, tendo o pior desempenho nessa matriz.

3. O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para detecção/delimitação de dolinas

Com o avanço das tecnologias cartográficas, a disponibilidade crescente de bases de dados remotas (satélite, sensor aerotransportado) e principalmente com o desenvolvimento de computadores e softwares capazes de processar grandes quantidades de informações geográficas, novas possibilidades de mapeamento e automação foram incorporadas e aplicadas no campo das geociências. Dados raster obtidos por sensoriamento remoto permitiram construir modelos digitais de elevação e a partir disso, ferramentas computacionais e algoritmos foram criados para a extração e vetorização de informações como a topografia, bacias de drenagem e direção de fluxos superficiais.

Esse foi o propósito do algoritmo apresentado por Jenson e Domingue (1988), que tinha como principal objetivo a restituição hidrológica dos canais e bacias em modelos digitais. O modelo é baseado principalmente

na direção e acumulação de fluxo de cada pixel em processos computacionais de crescimento de regiões (técnicas de vizinhança espaciais iterativas). A definição das linhas de drenagens nos modelos é baseada na sucessão de células mais baixas (conforme altimetria de cada pixel) de forma que o fluxo seja sempre “drenado” para fora da cena analisada (raster). Ou seja, trata-se de uma simulação da drenagem baseada nos dados altimétricos de cada pixel em relação aos seus vizinhos. O procedimento de construção da drenagem nos modelos, no entanto, encontra percalços representados, em geral, por depressões unicelulares (*pits*), que não drenam água para canto algum, sendo considerados defeitos do modelo (artefatos, ou depressões espúrias) e que devem ser corrigidos. A correção se dá pelo preenchimento dos pixels da depressão até o nível a partir do qual possa haver a retomada da conexão com a drenagem, por meio da elevação “artificial” do valor de altimetria dos pixels inferiores a esse limite (Figura 3).

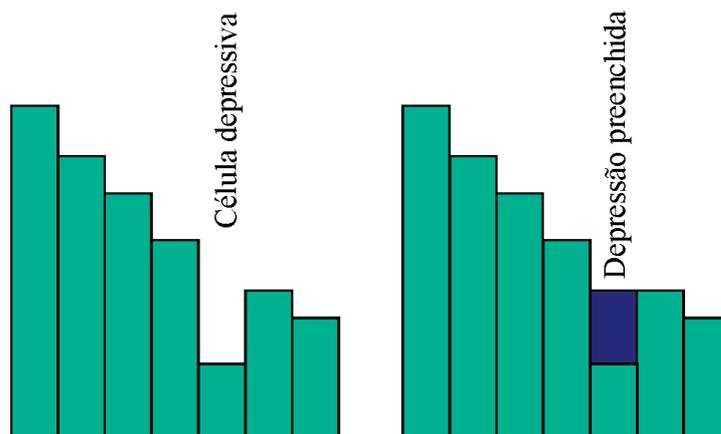


Figura 3 - Processo de preenchimento de pontos depressivos (*pit*) em um raster. Fonte: Adaptado de Guimarães et al. (2005).

Jenson e Domingue (1988) previam que durante esse processo, depressões autênticas, de origem cárstica ou glacial, pudessem ser preenchidas. Entretanto, essa ferramenta mostrou-se útil para a detecção de dolinas verdadeiras em áreas carstificadas, por meio da subtração do MDE sem depressões pelo MDE original. O resultado é uma base de dados contendo apenas depressões. O algoritmo é capaz de determinar as bacias de contribuição de cada ponto de absorção ou depressão unicelular (*pothole*, *sink* ou *pit* em inglês), permitindo também a aquisição de dados morfométricos (área e volume, p.ex.).

Contudo, esse procedimento de identificação de depressões não distingue feições eminentemente

cársticas (naturais) de outras artificialmente criadas, necessitando, portanto, de pré ou pós processamento. Depressões espúrias podem ser criadas pela interpolação em áreas muito planas (*loopings*), por exemplo. Por outro lado, podem ocorrer depressões antrópicas verdadeiras, como barragens, pontes, minas, diques em obras lineares (estrada, ferrovia), curvas de nível na agricultura, intervenções urbanas, entre outros (Figura 4). Grande parte dos trabalhos envolvendo o mapeamento de depressões cársticas em MDE dedica-se a encontrar maneiras de minimizar esse problema, com a utilização de bases de maior resolução espacial, aplicação de técnicas de suavização ou reamostragem e adoção de filtros, como será tratado adiante.

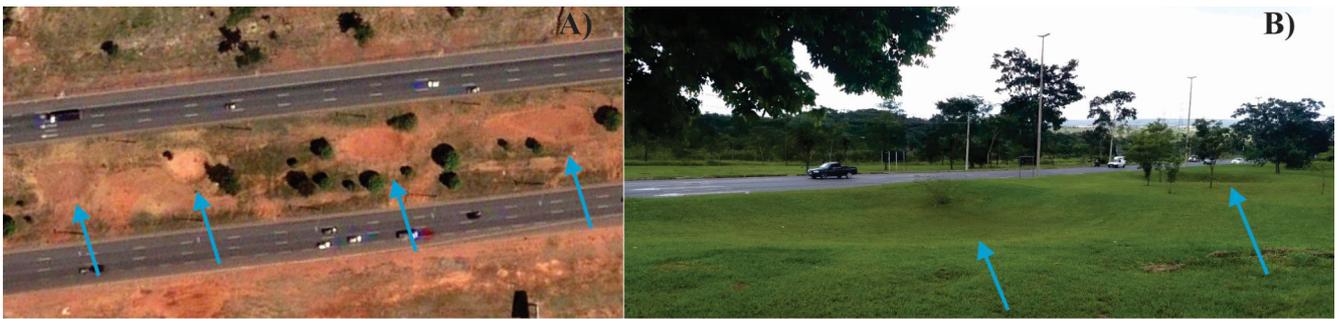


Figura 4 - Sequência de falsas dolinas associadas a rodovia, indicadas por setas azuis (sistema contra enchentes). A) imagem histórica ressaltando depressões em época seca; B) depressões em época chuvosa, sem contraste da vegetação. Fonte: Google Earth e foto do autor.

A maior parte dos trabalhos relacionados ao mapeamento de dolinas com o uso de aplicativos de geoinformação, novas bases de dados e MDE, utilizam técnicas de restituição hidrológica para identificação de depressões, variando algumas nuances em relação à delimitação e hierarquização das feições. As principais técnicas utilizadas para detecção e delimitação de dolinas por MDE são tratadas adiante.

3.1 Detecção de *pits* e delimitação de dolinas até o limite da bacia

A técnica de detecção de *pits* e delimitação das depressões a partir das células inferiores até o divisor topográfico segue os algoritmos propostos por Jenson e Domingue (1988). A principal diferença desse método com o uso de MDE em relação aos que serão tratados em sequência é a delimitação da área de contribuição hídrica para cada ponto mais profundo baseada nos divisores topográficos, similar ao realizado manualmente por meio de mapas topográficos ou fotografias aéreas (WILLIAMS, 1972). Cada ponto mais profundo sem alternativas laterais de fluxo é identificado de forma automática, assim como a delimitação da bacia, considerando os dados de direção e acumulação de fluxo de cada célula do raster. Esse procedimento não considera as quebras de relevo internas à bacia, realizada em análises visuais e tampouco a linha de contorno fechada mais externa, criada por interpolação em mapas topográficos. A profundidade da dolina é calculada a partir da diferença entre a elevação mínima (do *pit*) e a máxima, na cumeada (BAUER, 2015).

Siart *et al.* (2009) utilizaram o mesmo método para contabilizar as dolinas na Ilha de Creta, mas observaram que a baixa resolução das fontes utilizadas para gerar o

modelo (SRTM e ASTER) implicou em detecção apenas de feições grandes a médias, necessitando adicionar análises visuais e campo para construção do mapa geomorfológico local. Nesse trabalho, observa-se uma das primeiras tentativas de aplicação de filtros morfológicos de dolinas para eliminar o grande número de falsos positivos, ou seja, feições depressivas similares a dolinas, mas de origem artificial (antrópica ou por defeito na geração do MDE).

Telbisz *et al.* (2009) aplicaram a técnica em uma área cárstica croata com a utilização de um MDE construído a partir de mapa topográfico (1:25.000). Foi um dos primeiros trabalhos a notar discrepâncias entre a aplicação desse método quando comparado a outros, além de notar que é mais indicado para o carste poligonal, pela justaposição das depressões até o divisor topográfico, ocupando toda a área. Isso decorre do fato de que uma vez identificado o ponto mais profundo da dolina pelo método, o acúmulo de fluxo no raster busca de forma iterativa a bacia topográfica contribuinte para esse ponto de absorção. Cada *pit*, portanto, terá sua bacia delimitada, o que denota uma dimensão espacial superior para as dolinas.

Bases de dados com maior resolução espacial passaram a ser utilizadas para a identificação de dolinas com o critério de delimitação por bacia. Pardo-Igúzquiza *et al.* (2013) utilizaram um modelo a partir de fotos aéreas com cinco metros de resolução espacial e conseguiram identificar 324 depressões cársticas na Sierra de las Nieves (Espanha), muitas não identificadas em fotointerpretação ou campo. Os trabalhos de Miao *et al.* (2013) e Faulkner *et al.* (2013) inauguram o uso do LIDAR, ou “*Light Detecting and Ranging*”, com um metro de resolução espacial, para a delimitação das dolinas baseadas na bacia de contribuição. A grande vantagem dos modelos LIDAR,

além da sua alta resolução espacial, é a possibilidade de que os feixes ultrapassem o dossel em áreas vegetadas e consiga representar de forma mais fidedigna a superfície do terreno, indicando, portanto, o formato mais autêntico das dolinas ou depressões (Figura 5).

A adoção de filtros para reduzir a quantidade de retornos em estudos posteriores (falsos positivos) é utilizada na maioria dos trabalhos que usam bases de maior resolução espacial, combinadas com métodos automatizados de detecção de depressões. Os pré-requisitos

utilizados, dentre qualitativos (como proximidade) e especialmente morfométricos (área, profundidade, etc.), visam afunilar a amostra de depressões em direção ao mais próximo da realidade de cada local estudado. Nesse sentido, uma série de trabalhos de caráter metodológico foram realizados buscando comparar o uso de distintas bases de dados, o uso de levantamentos manuais prévios versus automatizado, e a adoção de outras técnicas de confirmação de dolinas (MIAO *et al.*, 2013; HIRUMA e FERRARI, 2014; CHEN *et al.*, 2018).

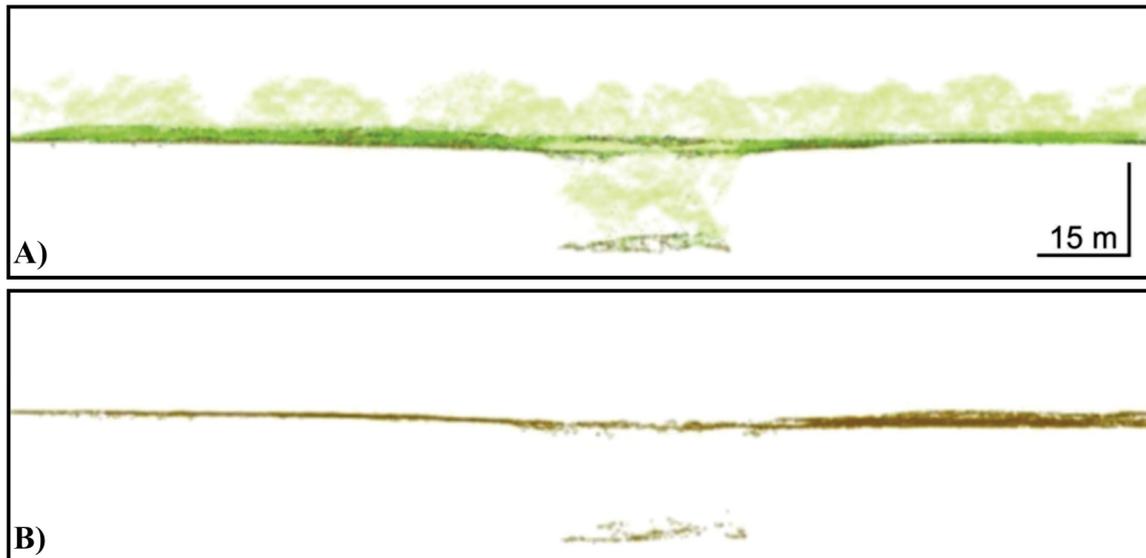


Figura 5 - Corte em modelo digital com dados LIDAR mostrando: A) nuvem de pontos com vegetação e solo, com dolina ao centro; B) nuvem de pontos filtrada, com apenas os dados do terreno, ressaltando melhor a dolina. Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2017).

3.2 Detecção e delimitação de dolinas por preenchimento até o nível de extravasamento

Outra possibilidade de detecção e delimitação de dolinas em modelos digitais é parcialmente similar ao descrito anteriormente, com base nos mesmos princípios de restituição hidrológica por meio de cálculos iterativos entre células adjacentes (direção e acúmulo de fluxo), porém com um delimitador diferenciado. Enquanto no método anterior o limite estabelecido automaticamente pelo programa utilizado era a bacia hidrográfica de contribuição desde o *pit* identificado (maior abrangência), no método por extravasamento o limite é dado pela isolinha virtual determinada a partir dos pontos de menor elevação na qual fluxo em superfície pode ser retomado a jusante, mesmo que seja para outra depressão adjacente (abrangência menor). Ou como na analogia de Wall *et al.* (2017), o limite da depressão seria relativo às margens de uma represa virtual de água em um ambiente SIG.

O conceito é similar ao uso da curva de nível fechada mais externa para definição do limite da dolina, em mapas topográficos, no qual todos os pontos delimitadores da feição possuem a mesma elevação. Porém, em um MDE é possível estabelecer com maior precisão esse limite de extravasamento utilizando as informações de cada pixel, não se limitando a um intervalo pré-estabelecido, como nas curvas de nível em mapas topográficos. As diferenças de profundidade e especialmente de área podem ser bastante significativas entre os métodos extravasamento e curva fechada mais externa, especialmente para áreas mais planas (Figura 6). Para determinar essa abrangência espacial é realizada, de forma similar, a subtração do MDE preenchido até o limite de extravasamento pelo original. A profundidade da dolina é calculada a partir da diferença entre a elevação mínima da depressão (*pit*) e a elevação do ponto de extravasamento, que é menor que o limite da bacia (BAUER, 2015).

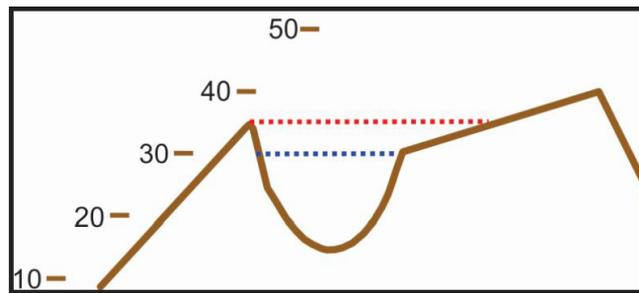


Figura 6 - Perfil simulando uma dolina: o pontilhado em azul correspondente à curva fechada mais externa em mapa topográfico (altitude 30m), com abrangência espacial inferior; e o pontilhado vermelho corresponde ao ponto de extravasamento (aproximadamente 36m altitude) passível de ser detectada em MDE, com maior abrangência.

Um dos primeiros esforços para identificação de depressões cársticas utilizando essa técnica automatizada foi realizada por Guimarães *et al.* (2005) na região de Lago Santa-MG. Utilizando dados de mapas topográficos (1:10:000) e ASTER (15m) para construção de modelos e, aplicando a técnica de preenchimento a partir dos *pits* e posterior subtração do MDE original, conseguiram ressaltar as depressões e aferir melhores resultados com os dados ASTER. Apesar de não terem realizado a contabilização das depressões e análises morfométricas, os autores aplicaram alguns filtros qualitativos (espectro fotossintético, proximidade a cavernas) e aplicação de suavização do MDE para destacar apenas depressões maiores.

Telbisz *et al.* (2009) simularam exatamente as três metodologias discutidas anteriormente, ou seja, a baseada na bacia, no ponto de extravasamento e no contorno fechado mais externo em mapas topográficos (Figura 7). Apesar de terem optado pelo método por bacia, por se tratar de carste poligonal na Croácia, os autores identificaram que muitas vezes o limite entre as outras metodologias restantes eram coincidentes, ou maior, nos resultados com o uso do método de extravasamento. Essas discrepâncias entre as formas de mapear dolinas podem alterar as análises morfométricas e comparativas com outras áreas cársticas.

Em estudo mais recente e com base de dados de maior resolução espacial (1m, LIDAR), Bauer (2015) chegou à conclusões similares a Telbisz *et al.* (2009), mostrando que discrepâncias significativas podem ser notadas conforme o método aplicado. No estudo, Bauer (2015) identificou que as dolinas mapeadas pelo método de preenchimento até o nível de extravasamento sempre superam em área as delimitadas por contorno

fechado mais externo, além do que, o primeiro método tende a coalescência de feições rasas. Por outro lado, o autor também identificou que o método até o limite da bacia superestima a área das dolinas. Tendo em vista a geografia da área estudada na Áustria, Bauer (2015) considerou o procedimento de extravasamento como sendo o mais adequado para representar as dolinas locais. O estudo conclui que a escolha do método deve levar em conta os propósitos (se estudos morfométricos ou hidrológicos) e qual tipo de carste em foco, se poligonal ou de dolinas isoladas.

Um dos estudos mais citados a utilizar a metodologia de delimitação por extravasamento é o de Doctor e Young (2013), que realizaram um trabalho comparativo entre a aquisição manual e automática de depressões cársticas na região de Virgínia (EUA), a partir de dados LIDAR (1m). Utilizando o MDE com sombreamento e com o auxílio de imagens de alta resolução espacial, geraram uma base de referência para comparação posterior e a definição de parâmetros morfométricos para a identificação automatizada. O volumoso número de respostas positivas, a maioria espúrias, demonstrou a necessidade de condicionamento adicional prévio no MDE. Para prevenir resultados equivocados, os autores realizaram a restituição manual da drenagem através de barreiras artificiais (barragens, diques e pontes em rodovias, p. ex.). Após esses procedimentos manuais, considerado trabalhosos, eles avaliaram o resultado como satisfatório, uma vez que até 99,5% das dolinas localizadas visualmente, com profundidade acima do filtro estabelecido, foram identificadas automaticamente. A contagem geral de dolinas com a utilização do método semiautomático adotado foi quase o dobro do método manual.

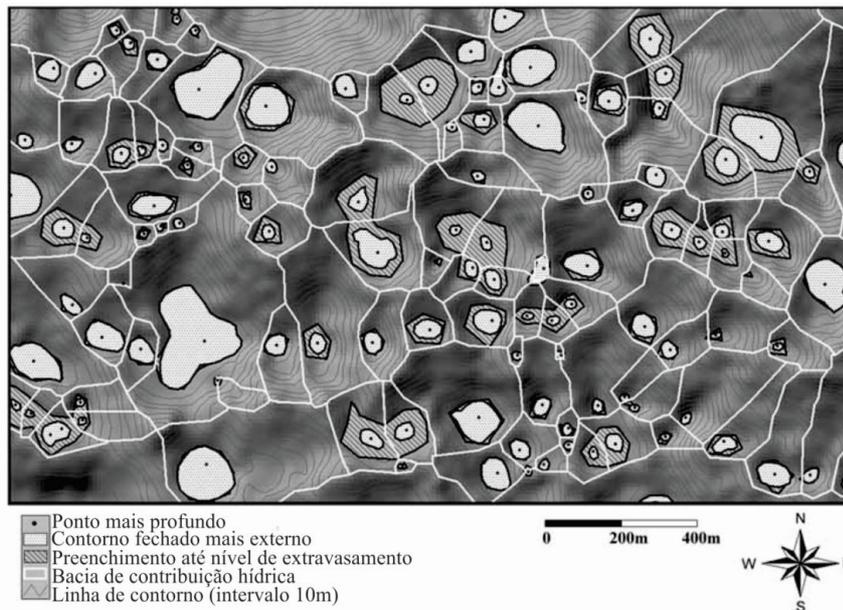


Figura 7 - Discrepâncias espaciais conforme metodologia de detecção/delimitação de dolinas. Fonte: Adaptado de Telbisz et al. (2009).

Após a publicação de Doctor e Young (2013), muitos outros trabalhos utilizaram a técnica de extravasamento, alguns deles apresentando refinamentos metodológicos. Diferente de outros estudos que estabeleceram apenas filtros mínimos, Zhu *et al.* (2014) também utilizaram um filtro máximo de profundidade para as dolinas de sua área de estudo, além de realizar uma classificação entre feições “prováveis”, “suspeitas” e “não dolinas”, para posterior checagem em campo. Kobal *et al.* (2015) realizaram um ranqueamento das dolinas (1^a, 2^a, 3^a ordem) baseado na sequência de coalescência de feições com a continuidade do preenchimento em uma depressão composta.

Após levantamento automatizado com o uso de filtros morfométricos, Jeanpert *et al.* (2016) classificaram dolinas automaticamente conforme a declividade e área, identificando quatro tipos principais de feições (colapso, bacia, fundo chato: pequenas ou grandes). O estudo de Zhu e Pierskalla (2016) testou técnicas de aprendizagem de máquina (*random forest*) para separar automaticamente dolinas verdadeiras das demais depressões espúrias ou falsas. Wu *et al.* (2016) utilizaram o conceito de contorno semente (linha fechada mais interna) para distinguir de forma mais ágil a hierarquia de depressões (quando compostas). Já Hofierka *et al.* (2018) individualizaram as dolinas com base na capacidade de armazenamento de água nas depressões em eventos extremos de precipitação simulados uniformemente no MDE, a partir de medidas meteorológicas reais de longo

termo (taxa de excesso chuva/infiltração de 50mm/h; pastagem; 2h de evento). Em abordagens combinadas, alguns estudos utilizaram imagens históricas do Google Earth para distinguir dolinas, contando com diferenças nas resoluções das imagens e sazonalidade (ZHU *et al.*, 2014; CAHALAN e MILEWSKI, 2018).

3.3 Outros procedimentos automatizados

O procedimento apresentado por Obu e Podobnikar (2013) é tido como uma metodologia específica de detecção e delimitação de dolinas por alguns autores (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2014; WU *et al.*, 2016; HOFIERKA *et al.*, 2018). Nesse trabalho, os autores propõem que a detecção das depressões seja baseada em uma abordagem combinada entre determinação da direção de fluxo, identificação dos pontos mais deprimidos (*pits*), com subsequente projeção da bacia de contribuição e a utilização de uma janela móvel (kernel 3 x 3) para reconhecimento do contorno da feição baseado no ponto de extravasamento. Em outras palavras, em adição ao algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988), Obu e Podobnikar (2013) incluem técnicas de filtragem de imagem com janela kernel utilizando funções focais. Na prática, a abrangência espacial e morfológica na delimitação das dolinas é a mesma daquela do método de extravasamento, sendo, por isso, assim classificada.

No entanto, o trabalho de Obu e Podobnikar (2013) foi pioneiro ao estabelecer o ranqueamento de

depressões com o uso de modelos digitais, identificando cada sub depressão menor (1ª ordem) contida em depressões maiores (compostas), conseguindo identificar em quantidades decrescentes dolinas da primeira a quinta ordem em uma área cárstica da Eslovênia

(Figura 8). Essa proposta de ranqueamento foi seguida por trabalhos subsequentes (KOBAL *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2016), sendo útil para estabelecer comparações mais adequadas entre áreas cársticas e dimensionar de forma relativa o nível de segmentação da carstificação.

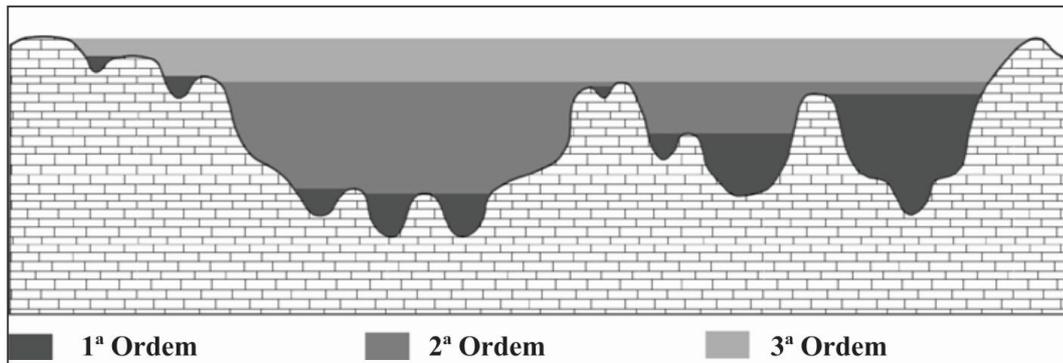


Figura 8 - Esquema de ordenamento de dolinas em situação de depressão composta. Fonte: Adaptado de Obu e Podobnikar (2013).

Outro procedimento metodológico de automação na identificação e delimitação de dolinas a partir de MDE foi apresentado por Filin e Baruch (2010), posteriormente aplicado e melhor detalhado por Rahimi e Alexander (2013). Tal método foge à lógica utilizada até então, baseada principalmente em técnicas de acumulação de fluxo, preenchimento e subtração em MDE. São dois os passos principais na técnica: o primeiro relacionado à detecção dos chamados pontos semente, e o segundo, à delimitação da depressão a partir deles. Os pontos sementes são equivalentes aos *pits*, ou seja, pontos mais profundos em uma depressão, e a sua localização no método se dá a partir da caracterização geométrica no modelo com o uso de ferramentas morfológicas. Com o uso da janela kernel (qualquer tamanho) é possível comparar os valores de cada pixel da imagem de entrada com seus vizinhos, assinalando como saída valores mínimos para a célula analisada (ferramenta “*erosion*”, MATLAB, p.ex.). O tamanho da matriz kernel influencia a precisão ao identificar os pontos sementes, sendo que quanto maior, menor a detecção de pequenas possíveis dolinas.

Determinados os pontos sementes, o limite da depressão é identificado por imagem a partir do procedimento contorno ativo (*snake*), baseado na mudança de gradiente do fluxo, ou seja, na linha de maior inclinação, com base nos dados de elevação dos pixels. Conforme Rahimi e Alexander (2013), ao aplicar um processamento conhecido por “vetor de

gradiente de fluxo”, cada célula passa a indicar a direção para o ponto de maior energia, ou seja, inclinação. Com isso, é possível identificar a linha de ruptura de relevo (curva fechada), indicada pela convergência da direção dos vetores, tanto internos (a partir do ponto semente), como externos à dolina, uns apontando em direção aos outros. Esse último processo é iterativo e sua inicialização se dá a partir do ponto semente, por isso, a necessidade prévia de sua identificação correta. O método é uma forma automatizada de identificação de quebras de relevo, e, portanto, necessita que estas estejam aparentes de acordo com a resolução espacial do MDE. Dolinas suaves podem não ser corretamente detectadas pela falta de um limite abrupto. Vale ressaltar que o método foi apresentado e testado a partir de dados LIDAR (1m), sendo eficiente para detectar as dolinas da região estudada (Winona, EUA), com 91% de acertos sem filtragem (com muitos falsos positivos) e 82% de acertos após filtragem. Apesar da aparente eficiência, os próprios autores recomendam a sua utilização sob supervisão humana, para aumentar a precisão.

3.4 Detecção visual em MDE

Modelos digitais de elevação também permitem a identificação visual de depressões. Apesar de significar maior dispêndio de tempo e exigir cuidado para o escrutínio de grandes áreas, essa possibilidade é bastante utilizada, tanto como fonte principal, como fonte alternativa, para construção de base de dados de referência,

por exemplo. Uma das formas de identificação se dá com a geração de curvas de nível e posterior busca por linhas fechadas mais externas em depressões, como feito tradicionalmente em mapas topográficos analógicos. A vantagem em relação aos mapas analógicos é a possibilidade de utilizar, caso disponível, de MDE com maior resolução espacial, capaz de gerar curvas com equidistância de um metro, por exemplo, ou ajustar configurações

mais apropriadas conforme cada caso. Porém, o aumento de resolução espacial, sobretudo por reamostragem em ambiente computacional, pode levar ao aumento de ruído, gerando artefatos (Figura 9). Tais falsos positivos, decorrentes do processamento do modelo (erros de interpolação), se somam a possíveis depressões artificiais, sendo difícil discerni-las das reais sem o uso de outras fontes combinadas, como imagens aéreas.

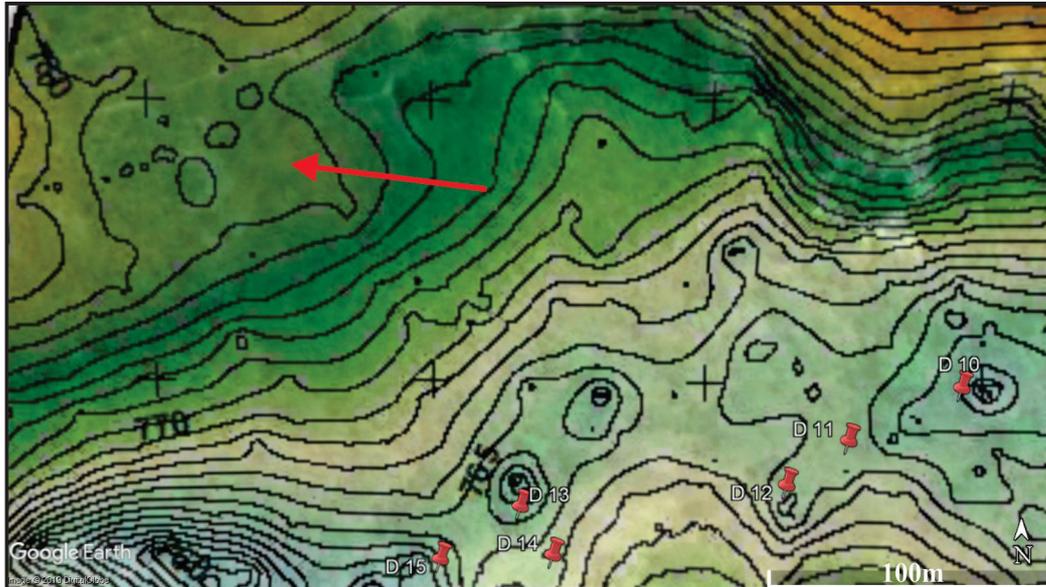


Figura 9 - A seta vermelha aponta artefatos em um topo plano. Na parte inferior, à direita da imagem, ocorre um vale seco com a inserção de algumas dolinas (seis ao todo) marcadas em vermelho. As curvas fechadas entre tais dolinas são artefatos associados a drenagem ou áreas planas, pois toda a área foi checada em campo. Notar também que o modelo não foi suavizado, por esse motivo as linhas de contorno (intervalo de um metro) estão bastante irregulares. Modelo digital de terreno construído a partir de imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado, curvas geradas com a ferramenta contour no ArcMap 10.3 e projetadas no Google Earth.

Bauer (2015) utilizou esta técnica combinada (contorno fechado e imagens) para comparar os resultados com outros métodos automáticos de detecção de dolinas (por bacia e por extravasamento). Seale *et al.* (2008), por outro lado, realizaram o levantamento via MDE baseado somente na identificação visual de contornos fechados e alertavam para o risco de análises automatizadas incorporarem depressões antrópicas, especialmente em áreas urbanizadas. Nesse último trabalho, os autores compararam a identificação de dolinas a partir do LIDAR “puro”, ou seja, somente com curvas de nível (contornos fechados), com a detecção por método combinado, com o auxílio de fotointerpretação, notando discrepâncias substanciais. Seale *et al.* (2008) demonstram que o grande número de artefatos e demais características da aquisição dos dados LIDAR, como a reflectância na água e bloqueio parcial do retorno pela

vegetação, a detecção de dolinas unicamente por essa fonte é suspeita, mesmo tendo gerado curvas de 30cm de intervalo. O estudo sugere, portanto, o uso da análise combinada com outras fontes, como fotos aéreas recentes, para dirimir feições ambíguas.

Outro método de identificação de depressões a partir de modelos digitais é com a aplicação do sombreamento no relevo, tendo sido utilizada de forma combinada a outros métodos em diversos trabalhos baseados em dados LIDAR (DOCTOR e YOUNG, 2013; RAHIMI e ALEXANDER, 2013; ZHU *et al.*, 2014; BAUER, 2015; FRAUSTO-MARTÍNEZ, *et al.*, 2018; HOFIERKA *et al.*, 2018). Esse método valoriza a quebra de relevo, destacando o ponto de inflexão da depressão de forma mais evidente que a partir de uma linha topográfica fechada, mesmo com baixo intervalo. Entretanto, também é passível de interpretação subje-

tiva, como afirmam Čeru *et al.* (2017). Eles utilizaram somente do modelo LIDAR sombreado, para detectar dolinas em conglomerados carbonáticos na região central da Eslovênia (bacia de Ljubljana), tendo alcançado resultados bastante significativos (até 238 dolinas/km²).

Um método pouco utilizado é a partir da aplicação de índices topográficos no processamento no MDE para ressaltar as áreas deprimidas das elevações adjacentes. Lyew-Ayee *et al.* (2007) utilizaram dessa técnica em um MDE (2m) construído a partir de mapa topográfico (1:12.500) e altitudes coletadas em campo para delimitar e realizar análises morfométricas dos *cockpits*, em seis áreas da Jamaica. Considerando tratar-se de uma área de carste poligonal, sem a recorrência de depressões abertas, o método mostrou-se eficiente ao ressaltar dolinas. Possibilitou ainda, segundo os autores, a delimitação de feições de forma mais precisa do que quando utilizadas a interpretação de imagens ou MDE sombreado. Mais recentemente, outros trabalhos utilizaram o índice de posição topográfica para análises visuais combinadas, buscando aumentar a precisão na identificação de dolinas, com a finalidade da construção de base de dados referência, para posterior comparação com métodos automatizados (DOCTOR e YOUNG, 2013; CHEN *et al.*, 2018).

4. Síntese dos métodos de mapeamento de dolinas

Com a revisão de trabalhos relacionados ao mapeamento de depressões cársticas a partir de modelos digitais, observou-se a recorrência no uso de determinadas técnicas automatizadas, porém sem o abandono de formas tradicionais de identificação visual de dolinas.

Em uma tentativa de classificação dessas metodologias, foram arroladas as opções mais utilizadas, conforme fontes de dados. A numeração indicada está expressa na tabela a seguir (Tabela 2), no campo “método”, conforme o interpretado em cada artigo analisado. Muitos trabalhos utilizam mais de um método, seja para aferição, seja para comparação metodológica.

Métodos de detecção/delimitação automática (MDE):

- 1 - Delimitação a partir do pixel mais baixo da depressão (*pit*) até a bacia topográfica de contribuição hídrica;
- 2 - Preenchimento a partir do pixel mais baixo da depressão (*pit*) até o limite de extravasamento;

- 3 - Contorno ativo, a partir do ponto semente, baseado na mudança de gradiente de fluxo;

Método de detecção/delimitação manual:

- 4 - Análise de mapas topográficos analógicos ou digitais (MDE) para identificação de curva de nível fechada mais externa (A) ou bacia de contribuição (B);
- 5 - Fotointerpretação estereoscópica, análise de imagens de alta resolução espacial (ortofotos, satélite), mapas sombreados (inclusive próprio MDE), com o critério de delimitação por quebra de relevo (A); por bacia de contribuição (B); ou apenas validação de outros métodos (C);
- 6 - A- Topografia em campo (GPS, bússola, clinômetro, trena, teodolito); B- Validação (ponto).

5. Análise das publicações sobre detecção de dolinas por MDE

Entre 2001 e 2011 apenas oito trabalhos de mapeamento de dolinas a partir de MDE foram identificados, representando 23,5% dos 34 analisados. Os demais trabalhos (76,5%) foram realizados após 2013, de forma ininterrupta, o que demonstra a crescente estratégia do uso de modelos digitais para detecção de depressões e aquisição de demais informações, como dados morfométricos (Figura 10A). Essa tendência pode ser explicada pela maior disponibilidade e precisão das bases de dados, bem como a disseminação do uso de ferramentas de geoprocessamento. A maioria dos trabalhos analisados (64,7%) utilizou modelos baseados no LIDAR, que apesar do alto custo, tem sido usado para imageamento sistemático em alguns países e possui vantagens relacionadas a alta resolução espacial e a capacidade de representar mais corretamente o nível da superfície do terreno (Figura 10B). Entretanto, muitos outros tipos de bases foram utilizados para gerar modelos e inclusive realizar análises comparativas. Considerando os trabalhos analisados e a quantidade total de MDE gerados (54), pode-se observar a predominância dos dados LIDAR (37% em formato puro e 16,6% sombreado), seguidos por modelos digitais baseados em dados de mapas topográficos (14,8%), SRTM (11,1%), ASTER (9,3%), fotos aéreas (7,4%) e ALOS (3,7%).

Tabela 2: Publicações com levantamento de dolinas/depressões via MDE, destacando-se as fontes de dados, os métodos de identificação, os filtros utilizados e a acurácia calculada. Métodos automáticos: 1-limite da bacia; 2-extravasamento; 3- contorno ativo. Métodos manuais: 4-mapa topográfico com o critério curva de nível fechada mais externa (A) ou bacia (B); 5- fotointerpretação, análises de imagens e mapas sombreados por critério de quebra de relevo (A), bacia (B) ou apenas validação (C); 6- trabalho de campo para topografia (A) ou validação (B).

Trabalho	Aquisição/resolução espacial	Métodos	Filtros	Acurácia
Cahalan e Milewski (2018)	LIDAR (1-10m); Imagens aéreas (1-2m); Google	2; 5C	Profundidade > 1,55m; excentricidade < 0,96; área > 3m ² ; buffer recobrando acima de 50% das feições: 5m drenagem; 15m rodovias; 3m edificações	
Chen et al. (2018)	MDE Mapa topográfico (3m); SRTM (30-90m); ASTER (30m); Foto aérea (2,5m)	1; 5A; 6B	área > 60m ² ; elipsidade < 0,2; TPI ≤ 0; buffer de 90m dos principais cursos d'água; somente rochas calcárias;	78-95%
Frausto-Martínez et al. (2018)	LIDAR Sombreado (5m)	5A; 6B	Visual Sombreado; elevação e declividade	
Harris et al. (2018)	LIDAR (3,8 pés); Foto aérea (<1m)	5A; 6B	Visual	
Hofierka et al. (2018)	LIDAR (5m); LIDAR sombreado + ortofoto	2*; 4A; 5A e C; 6B	Suavização MDE; Excesso chuva/infiltração de 50mm/h; 120 minutos de evento (em pastagem); ângulo de inclinação < 15° para grandes depressões; rochas carbonáticas; *chuva simulada determina o limite da depressão, e não necessariamente o ponto de extravasamento (limite ≤ ao método 2)	95%
Theilen-Willige (2018)	ALOS-PALSAR (12,5m); SRTM (30m); ASTER (30m); Imagens: Sentinel; RapidEye; Landsat; Bing; e Google	2*; 5A; 6B	Filtro de imagem (passa alta-passa/baixa) para ressaltar súbita mudança de gradiente (borda dolina); Feições circulares/ovais; maior umidade do solo, e índice de vegetação (mais verde); rochas solúveis; *Extração automática serviu de filtro para análise visual	
Calligaris et al. (2017)	LIDAR (1m); foto aérea	5A; 6B	Visual	
Ceru et al. (2017)	LIDAR sombreado (1m)	5A; 6B	Visual; qualquer tamanho e profundidade	
Wall et al. (2017)	LIDAR (2m); LIDAR sombreado; mapa topográfico (1:24.000); foto aérea	2; 4A; 5C; 6B	Profundidade > 0,73 m; área > 40m ² (local 1) e > 119m ² (local 2)	85-93%
Jeanpert et al. (2016)	LIDAR (1m); Ortofoto	2; 5C; 6B	Área ≥ 1m ² ; perímetro ≥ 4m; profundidade ≥ 0,2m;	
Pardo-Igúzquiza et al. (2016)	MDE Foto Aérea (5m)	1	Área > 25m ² (limite inferior do pixel) e < 0,85km ²	
Telbisz et al. (2016)	LIDAR (2,5m); mapa topográfico (1:10.000); MDE mapa topográfico (10m)	2; 4A; 6B	Suavização (filtro radial 5 células- "focal statistics"); Profundidade > 1m (MDE Topográfico) e > 0,5 (MDE LIDAR)	
Wu et al. (2016)	LIDAR (1m); LIDAR Sombreado; ortofoto visível+infravermelho (0,5m)	2; 5C	Suavização (3x3 median morphological operator); Filtro preliminar: Profundidade > 0,5m; área > 100m ² ; perímetro base (contorno semente) > 39m. Filtro posterior: área < 4000m ² ; profundidade > 0,5m; desvio padrão de elevação > 0,18m; alongamento < 2,54; e CI > 0,31	
Zhu e Pierskalla (2016)	LIDAR (1,5m)	2; 6B	Área > 46m ² ; profundidade > 0,3m e < 6m; buffer: 6m drenagens; 3m corpos hídricos; 6m rodovias; separação automática via aprendizagem de máquina (Random Forest)	73,96-89,95%
Bauer (2015)	LIDAR (1m); LIDAR Sombreado	1; 2; 4A; 5C; 6B	Retirada manual de feições não cársticas (análise visual); remoção automática de erros de duplicação de pixel mais profundo	
Kakavas et al. (2015)	ASTER (30m); SRTM (90m); Foto aérea (1:40.000); MDE Foto aérea (1m; 5m); mapa topográfico (1:50.000); MDE topográfico (20m)	2; 4A; 5A; 6B	Visual (3d)	ASTER 56,1%; SRTM 64,8%
Kobal et al. (2015)	LIDAR (1m)	2	Profundidade > 2m; diâmetro > 10m	
Carvalho Júnior et al. (2014)	ALOS PRISM (2,5m); SRTM (90m); imagens Google	2; 5A e C; 6B	SRTM: profundidade > 2m; área > 16.200 m ² ; e IC > 0,3; ALOS/PRISM: profundidade > 2m; área > 13.125m ² ; e IC > 0,3;	0,53
Hiruma e Ferrari (2014)	SRTM (30 e 90m); MDE fotos aéreas (10m); Foto Aérea (<1m); mapas topográficos	1; 4B; 5B; 6B	Sem aplicação de filtros. Dolinas falsas somente fora da área carbonática.	77-80% área/perímetro
Zhu et al. (2014)	LIDAR (1,5m); LIDAR Sombreado; imagens Google; Bing	2; 5A e C; 6B	Área > 46m ² ; profundidade > 0,3m e < 6m; relevo sombreado com exagero de 5x	88%
Doctor e Young (2013)	LIDAR (1m); LIDAR Sombreado; ortofotocartas (1m)	2; 5A; 6A e B	Visual Sombreado + TPI; IC < 1,7; elipse ≤ 0,98; área ≥ 9m ² ; profundidade > 18cm; buffer de construções e drenagem (2m)	99,50%
Faulkner et al. (2013)	LIDAR (1m)	1	Profundidade > 0,275m; buffer 20m corpos d'água; 5m cursos hídricos por acúmulo de fluxo no raster; 20m rodovias; áreas degradadas ou rocha exposta; somente rochas carbonáticas	
Miao et al. (2013)	LIDAR (1m); Mapa topográfico (1:24.000); Foto aérea	1; 4A; 5C; 6B	Suavização (Wiener-AWF) de 10m; profundidade > 0,5; separação automática via aprendizagem de máquina (random forest)	87,90%
Obu e Podobnikar (2013)	LIDAR (3m); MDE Mapa topográfico (12,5)	2; 6B	Profundidade > 2m; diâmetro > 10 metros	
Pardo-Igúzquiza et al. (2013)	MDE Foto Aérea (5m); Foto Aérea (2m)	1; 5B; 6B	Área > 250m ²	
Rahimi e Alexander (2013)	LIDAR (1m); LIDAR Sombreado; Google; Bing	3; 5A; 6A e B	Profundidade > 90% da dolina mais rasa mapeada manualmente; Relação profundidade/área > 90% dessa menor relação mapeada manualmente; Buffer de rodovias (não informada metragem)	82-91%
Li et al. (2011)	LIDAR (1m); Foto aérea	2; 5C; 6B	Suavização de 10 a 20 vezes do MDE; área > 200m ² ; profundidade > 0,1m	
Filin e Baruch (2010)	LIDAR (0,5m)	3; 6B	Parâmetros relativos de área e compactação; profundidade > 20cm	98%
Siart et al. (2009)	SRTM (90m); ASTER (15m); Quickbird (0,61m)	1; 5A; 6A e B	Suavização prévia do MDE; profundidade > 5m; área > 150m ² ; altitude: 800-1600; declividade até 7%; buffer de 150 metros dos cursos d'água; classificação de uso da terra e unidade petrográfica mais propícia a depressões	50%
Telbisz et al. (2009)	Mapa topográfico 1:25.000; MDE mapa topográfico (10m)	1; 2; 4A; 6B	Sem filtros. Comparação entre métodos	
Seale et al. (2008)	LIDAR (2,13m); Foto aérea	4A; 5A; 6B	Contorno fechado mais externo + visual	
Lyew-Ayee et al. (2007)	MDE mapa topográfico (2m)	5B; 6B	Limpeza manual de artefatos de interpolação; índice topográfico composto (CTI de 1,8) para diferenciar visualmente depressões de topos.	
Guimarães et al. (2005)	ASTER (15m); MDE mapa topográfico (10m)	2	Suavização prévia do MDE; caracterização do espectro fotossintético da vegetação úmida em dolinas; correlação com pontos de cavernas conhecidas	
Antonic et al. (2001)	MDE mapa topográfico (10m)	2	Sem filtros. Dolinas identificadas para análises de ecologia vegetal	

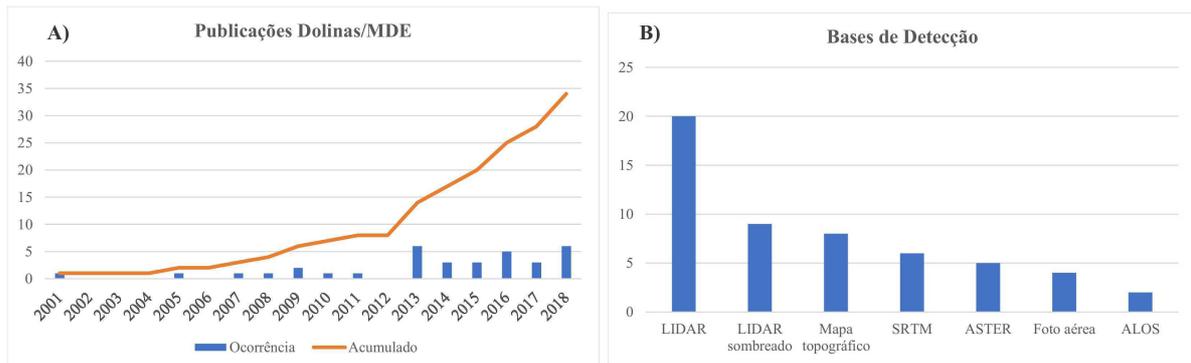


Figura 10 - Evolução de estudos sobre detecção de dolinas com MDE (A) e bases de dados mais utilizadas (B).

Essas informações chamam a atenção, para uma aparentemente maior adequação dos dados LIDAR para a detecção e delimitação de dolinas, ao passo que os dados ALOS foram pouco utilizados (em apenas dois trabalhos) e assim mesmo sendo considerado tão ou menos efetivo na tarefa se comparado com a base SRTM. Deve-se ressaltar também a menor utilização de fotos aéreas para construção de modelos e extração de dolinas, apesar dos avanços recentes com novas possibilidades de aquisição de imagens via Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). A possível causa dessa pouca utilização de fotos aéreas talvez se explique pelo maior custo de aquisição dos equipamentos, operação em campo, e necessidade de correções dos modelos por meio de pontos de controle no terreno, o que pode ser dispendioso de tempo e recursos. Essa dificuldade está expressa no trabalho de Hiruma e Ferrari (2014), que mesmo utilizando fotos aéreas disponíveis em bases públicas, necessitaram realizar uma série de procedimentos, incluindo a aquisição de pontos

de controle em campo, em uma área de difícil acesso, para resultar no modelo digital.

Entretanto, imagens e fotografias aéreas foram bastante utilizadas para a tarefa de validação visual de análises automatizadas via MDE. Os métodos de detecção e delimitação (apresentados na Tabela 2) demonstram claramente uma maior tendência para a automação, porém com a quase constante necessidade de verificações, sejam em imagens ou campo (Figura 11A). Se por um lado, 82,4% dos trabalhos analisados utilizaram alguma forma automatizada para detecção, em contraposição aos 17,6% restantes, que utilizaram apenas análises visuais em MDE, é possível observar que 70,6% dos estudos utilizam de imagens/fotos para checagens adicionais e validação em algum momento do processo. A validação em campo chega a 79,4% dos trabalhos e 14,7% não realizaram qualquer tipo de validação (campo ou imagens), talvez por confiarem em seus métodos automáticos (Figura 11B).

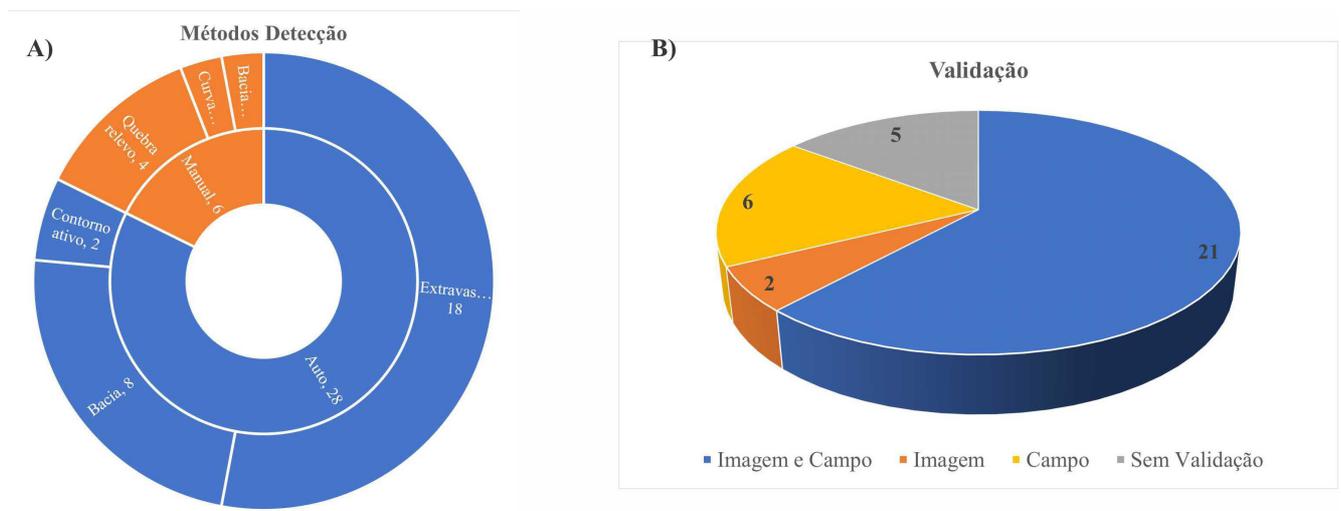


Figura 11 - Métodos de detecção entre abordagens automáticas e manuais (A), e tipos de validação nos estudos (B).

Quanto ao uso de métodos automatizados, foram analisados 28 estudos no total, dois deles, de caráter metodológico, com a testagem de mais de uma técnica (TELBISZ *et al.*, 2009; BAUER, 2015). Para efeito de comparação adotou-se para esses dois trabalhos metodológicos a técnica considerada mais adequada para suas respectivas áreas de estudo. Nesse sentido, a maior parte dos 28 trabalhos adotou o método de preenchimento até o nível de extravasamento, via ferramentas hidrológicas (64,3%), seguido pelo método de preenchimento até o limite da bacia de contribuição (28,6%). Apenas dois trabalhos (7,1%) adotaram o método baseado em contorno ativo.

Foram poucos os trabalhos que utilizaram de MDE para mapeamento visual/manual de dolinas como única fonte (6), a maioria deles a partir da análise de imagens derivadas, no critério de quebra de relevo. Entretanto, é possível observar diversos trabalhos que mesmo utilizando técnicas automatizadas, também realizaram análises visuais para mapeamento de dolinas. Nesses casos, o uso de imagens serviu para estabelecimento de bases de referência para obter parâmetros morfométricos no intuito de auxiliar o trabalho de filtragem automática de falsos positivos, e para comparações entre metodologias. Nesse sentido, foram contabilizadas 14 ocorrências do uso do critério quebra de relevo contra três por divisor topográfico na análise de fotos aéreas ou imagens (derivadas de MDE). De forma semelhante, foram identificadas oito ocorrências do uso de contornos fechados mais externos contra uma baseada no divisor de bacias em mapas topográficos (Figura 12A). O uso prioritário das técnicas de quebra de relevo em fotos áreas/imagens e contornos fechados mais externos em mapas topográficos condiz com a prática mais tradicional da geomorfologia cárstica, utilizada há décadas.

Levando-se em consideração toda a análise realizada, verifica-se que os trabalhos de mapeamento de dolinas por meio de MDE foram se avolumando, especialmente pós 2013, a partir da disponibilidade de bases de dados mais adequadas, especialmente LIDAR, e de resolução espacial maior (0,5m a 10 m). O uso de técnicas automatizadas é uma forte tendência desde os primeiros trabalhos analisados, em função das novas possibilidades que as ferramentas SIG proporcionam em ambiente computacional, principalmente relacionadas à restituição hidrológica. Entretanto, a utilização de bases combinadas e análises tanto automáticas como manuais continua sendo o caminho mais seguido pelos autores (82,4%). Mais recentemente, parece haver uma tendência de retorno da utilização dos modelos somente com análises visuais, sem o uso de técnicas automatizadas (ČERU *et al.*, 2017; CALLIGARIS *et al.*, 2017; FRAUSTO-MARTÍNEZ *et al.*, 2018; HARRIS *et al.*, 2018). Há um intervalo significativo de tempo desde as primeiras publicações a se utilizarem principalmente dessa técnica (LYEW-AYEE *et al.*, 2007; SEALE *et al.*, 2008), que é mais adequada para pequenas áreas. A quantidade de publicações analisadas a partir de 2017 é equivalente no uso de estratégias prioritariamente automáticas ou somente visuais, indicando a retomada da última técnica.

Dadas às especificidades de cada região cárstica, parece que dificilmente haverá um método único, totalmente automático e preciso para mapeamento de dolinas. Apesar das altas taxas de acurácia observadas em alguns trabalhos (acima de 80% na maioria dos que realizaram essa medição), a necessidade de controle de dados falsos ou omissões continua sendo exigida, requerendo, por vezes, muito trabalho manual, mesmo quando incluídos filtros prévios baseados em amostras de dolinas reais ou típicas das áreas de estudo.

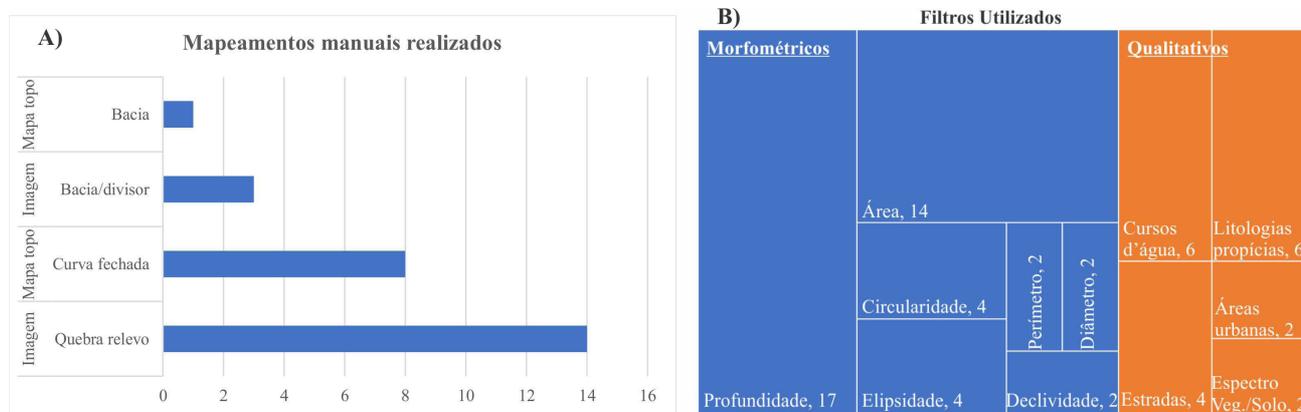


Figura 12 - Métodos por mapeamentos manuais realizados (A) e filtros mais utilizados nas abordagens automatizadas (B).

A coluna “filtros” na tabela síntese (Tabela 2) foi destacada visando identificar as estratégias mais utilizadas pelos estudos para aumentar a acurácia na identificação de feições verdadeiras e servir de referência para trabalhos similares, no intuito de diminuir a necessidade de ajustes manuais. Os mais utilizados foram os de cunho morfométricos, seja a partir de bases de dados referência, ou pela experiência dos autores em suas áreas de estudo (Figura 12B). Desses, os mais empregados foram: profundidade (em 17 estudos), área (14); elipsidade (4); circularidade (4); perímetro (2);

diâmetro (2); declividade (2). Dentre os filtros de cunho qualitativo são muito utilizados os de distância (*buffer*) em relação a fontes de feições artificiais ou espúrias (artefatos), como cursos d’água (6), estradas (4) e áreas urbanizadas (2). Outros relacionam a correspondência de litologias propícias (6) e espectro de vegetação/solo (2) mais relacionado a dolinas. O uso de tais filtros deve ser bem avaliado conforme a realidade de cada área de estudo, pois podem induzir a omissão de feições verdadeiras, como, por exemplo, dolinas suaves (menor que a profundidade limite) ou de menor tamanho (Figura 13).

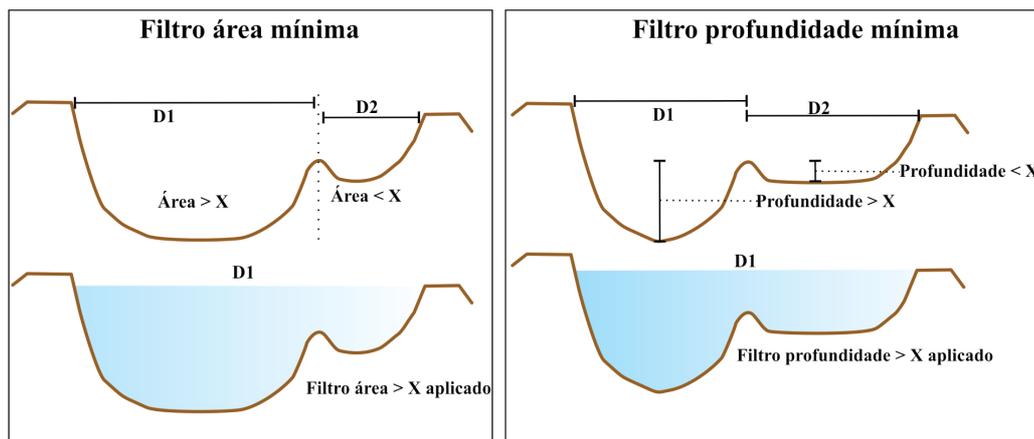


Figura 13 - A aplicação de filtros mínimos de área e profundidade podem resultar na junção de feições ou omitir feições menores ou pouco profundas. Por outro lado, são úteis para eliminar artefatos ou depressões pouco expressivas, muitas vezes de origem artificial.

O pré-processamento dos MDE também visa reduzir erros, especialmente relacionados ao aumento irreal de feições detectáveis. Nesse sentido, procedimentos de suavização, especialmente para modelos de alta resolução espacial, foram observados em sete trabalhos. Esse procedimento visa reduzir a quantidade de artefatos gerados na construção do modelo, geralmente relacionados aos cursos de água encaixados, voçorocas ou áreas planas, que criam uma série de *pits* duplicados ou falsos, induzindo a identificação errônea de possíveis dolinas. Uma medida testada em poucos trabalhos (2) foi a reamostragem da resolução espacial dos modelos, porém não tendo sido observadas melhorias na acurácia. Por fim, um procedimento utilizado em três trabalhos foi a aplicação de índices topográficos, visando ressaltar as áreas deprimidas das áreas de relevo positivo, no intuito de facilitar a identificação e delimitação de dolinas.

6. Discussão

O mapeamento de dolinas é utilizado como ferramenta de interpretação geomorfológica e ambiental há

bastante tempo. Os desafios inerentes à tarefa recaem principalmente nos procedimentos e técnicas de identificação e delimitação, bem como a fonte de obtenção de dados, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Levantamentos em campo são, em geral, extremamente trabalhosos e demorados, especialmente em grandes áreas ou naquelas com acesso limitado. A interpretação visual de mapas topográficos ou de fotos aéreas pode ser mais ágil, mas depende de boa resolução e pode sofrer com a falta de precisão altimétrica ou dar margem a análises subjetivas.

As possibilidades surgidas com o desenvolvimento de ferramentas geoespaciais em ambiente computacional, com a obtenção de modelos digitais de elevação, permitiram novas incursões ao tema, com testes e aplicações no mapeamento de depressões em diversos estudos ao longo dos últimos anos. Apesar das facilidades criadas no processamento, organização e resolução das bases de dados, o uso de MDE não elimina por completo os aspectos de tempo, esforço, subjetividade e custo para mapeamentos de dolinas. Continuam sendo necessários o uso de outras bases cartográficas

ou fontes com abordagens visuais/manuais. A utilização de procedimentos automáticos pode resultar em dados não confiáveis, demandando um certo gasto de tempo em pós-processamento (Tabela 3).

As metodologias tradicionais de delimitação de dolinas, via curvas fechadas mais externas em mapas topográficos (I), quebra de relevo em encostas regulares (II), ou a identificação dos divisores topográficos de contribuição hídrica (III) encontram paralelo com as novas formas de mapeamento, por processos automatizados. Os novos algoritmos identificam de forma objetiva os pontos deprimidos mais profundos (pits) nas imagens

raster, mas não discernem entre artefatos (erros do sistema), feições artificiais (depressões não cársticas) e potenciais pontos naturais de absorção do carste. Já na delimitação automatizada permanecem os problemas de discrepância, que resultam em diferenças de formato e abrangência nas metodologias por ponto de extravasamento (i), ruptura de declive por contorno ativo (ii) e por limite da bacia (iii). Essas diferenças mostram que a aplicação da técnica de identificação/delimitação de dolinas deve variar conforme os objetivos propostos, as bases de dados disponíveis e especialmente as características da área cárstica sob investigação (Figura 14).

Tabela 3: Prós e contras da detecção automatizada de dolinas por MDE

Detecção automatizada MDE	
Prós -	- Contras
Mais rápido -	- Requer várias etapas de processamento
Direciona a detecção -	- Grandes quantidade de objetos espúrios
Quanto maior resolução mais dolinas -	- Maior resolução muito mais objetos falsos
Abrange maiores áreas -	- Eventuais ajustes nos MDE
Não requer uma mapoteca (arquivos digitais) -	- Exige máquinas com boa capacidade
Repetibilidade facilitada com o tempo -	- Não elimina análises manuais/visuais/campo
Menor subjetividade -	- Requer conhecimento das dolinas da região
Delimitação objetiva (com critério) -	- Filtros para limpar objetos espúrios
	- Pode não representar corretamente a dolina
	- Pode coalescer feições adjacentes

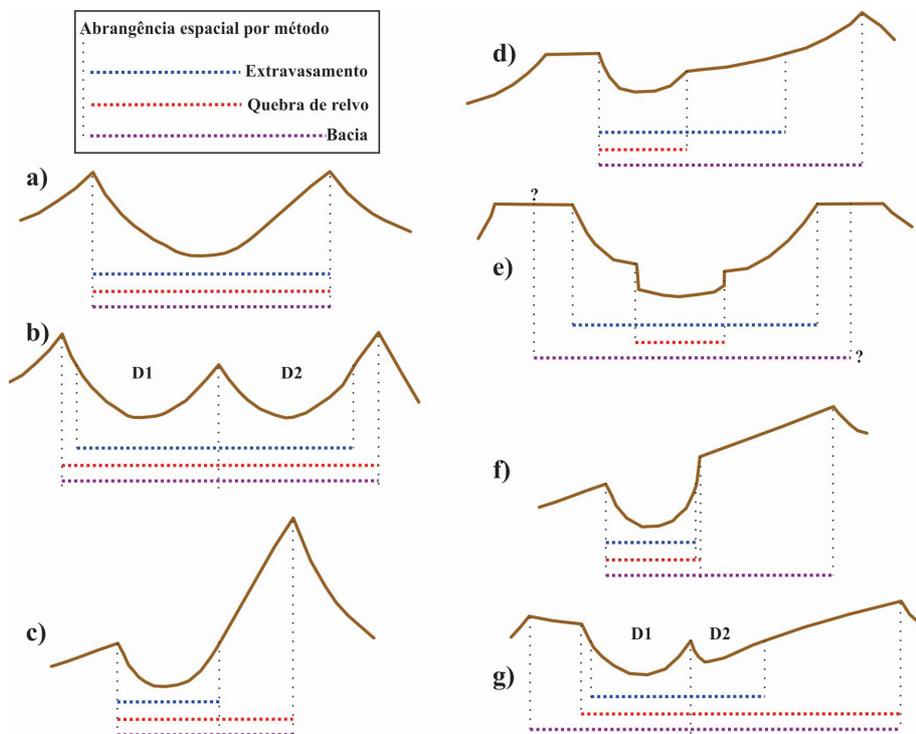


Figura 14 - Abrangências de projeção superficial simuladas por métodos de delimitação em diferentes contextos. A) sem discrepâncias; B) dois sumidouros (pits) definindo duas dolinas com extravasamento inferior aos demais métodos; C) extravasamento bem inferior aos demais; D) quebra de relevo bem inferior que demais; E) depressão composta com dificuldade de determinar limite topográfico no método por bacia (área plana); F) método por bacia bem superior aos demais; G) duas dolinas de formato assimétrico em uma situação de depressão composta.

Nesse sentido, os métodos baseados nos divisores topográficos podem ser aplicados ao carste poligonal ou para análises ligadas à possíveis contribuições hídricas em um evento de contaminação, como em análises de vulnerabilidade. O limite dado pelo ponto de extravasamento também carrega um fator hidrológico que pode ser interessante para análises ligadas a possíveis problemas de inundações. A delimitação baseada na quebra de relevo ressalta os processos gravitacionais de encosta, podendo representar com mais exatidão os limites de feições de colapso e ser utilizada em avaliações de risco potencial. Em uma situação heterogênea, comum em áreas cársticas tropicais em que as feições são frequentemente obliteradas por outros fatores, como a erosão superficial, a adoção de mais de um método de delimitação ou a junção de dois pode ser necessária.

Conclusões

O mapeamento de dolinas tem muitas aplicações no campo das geociências, seja para análises de evolução das paisagens cársticas, seja relacionada a aspectos ambientais, podendo representar uma tarefa complexa a depender das estratégias utilizadas e da base de dados. Após a investigação de uma série de trabalhos relacionados ao tema, foram identificadas as principais metodologias utilizadas para mapeamento de dolinas, seja a partir de técnicas visuais/manuais, como análise de fotografias, mapas topográficos e campo, ou a partir de técnicas automatizadas via MDE. Identificaram-se, nos trabalhos analisados, três tipologias principais de mapeamento automatizado, sendo duas baseadas em ferramentas hidrológicas e uma na identificação de rupturas do relevo em imagens. Destaca-se que o uso de técnicas tradicionais (interpretação de foto aérea, imagens, mapas topográficos e campo) permanece necessário para a validação, mesmo com os avanços tecnológicos.

Foi possível sistematizar algumas estratégias principais nos trabalhos analisados, para o mapeamento mais adequado das feições, como: o uso combinado de diversas fontes de dados em abordagens manuais e automatizadas; a utilização de filtros morfométricos prévios (principalmente profundidade e área); filtros qualitativos baseados no afastamento ou interseção com fontes de feições artificiais (principalmente cursos d'água, rodovias e rochas não carstificáveis); e a sua- zização dos modelos para evitar excesso de artefatos.

Com base nos dados sistematizados nesta pesquisa é possível acessar de forma mais imediata as possibilidades de uso e alternativas encontradas na literatura diante de problemas reais, o que é útil para eventuais aplicações em futuros trabalhos. O mapeamento de dolinas deve ser precedido de interpretações quanto à tipologia do carste, verificando a configuração mais usual das depressões e a aquisição de dados teste para estabelecer os parâmetros mais adequados para a extração automatizada via MDE. A utilização visual de imagens de maior resolução espacial possível, pode auxiliar na tarefa de limpeza, ajuste e validação final, em associação com trabalhos de campo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Além disso, os autores agradecem ao ICMBio pelo apoio institucional.

Referências Bibliográficas

- ANGEL, J. C.; NELSON, D. O.; PANNO, S. V. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 66, n. 1, p. 9–17, 2004.
- ANTONIC, O.; HATIC, D.; PERMAR, R. DEM-based depth in sink as an environmental estimator. **Ecological Modelling**, v. 138, p. 247–254, 2001.
- BAUER, C. Geomorphology Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. **Geomorphology**, v. 250, p. 78–88, 2015.
- BONDESAN, A.; MENEGHEL, M.; SAURO, U. Morphometric analysis of dolines. **International Journal of Speleology**, v. 21, p. 1–55, 1992.
- CAHALAN, M. D.; MILEWSKI, A. M. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. **Catena**, v. 165, p. 333–344, 2018.
- CALLIGARIS, C.; DEVOTO, S.; ZINI, L. Evaporite sinkholes of the Friuli Venezia Giulia region (NE Italy). **Journal of Maps**, v. 13, n. 2, p. 406–414, 2017.
- 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 Sensing**, v. 6, p. 330–351, 2014.
- ČERU, T.; ŠEGINA, E.; GOSAR, A. Geomorphological dating of pleistocene conglomerates in central Slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and Ground Penetrating Radar. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1213, 2017.
- CHEN, H.; OGUCHI, T.; WU, P. Morphometric analysis of sinkholes using a semi-automatic approach in Zhijin County, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 15, 2018.
- DENIZMAN, C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanee River basin, Florida. **Journal of cave and karst studies**, v. 65, n. 1, p. 29–35, 2003.
- DOCTOR, D. H.; YOUNG, J. A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data. In: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 449–458.
- FAULKNER, M. G. S.; STAFFORD, K. W.; BRYANT, A. W. Delineation and classification of karst depressions Using LIDAR: Fort Hood Military Installation, Texas. In: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 459–467.
- FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Um panorama sobre mapeamentos de dolinas no Brasil, feições elementares do carste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 01, p. 302–321, 2020.
- FILIN, S.; BARUCH, A. Detection of Sinkhole Hazards using Airborne Laser Scanning Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 5, p. 577–587, 2010.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p.
- FRAUSTO-MARTÍNEZ, O.; ZAPI-SALAZAR, N. A.; COLIN-OLIVARES, O. Identification of karst forms using LiDAR technology: Cozumel Island, Mexico. In: ABDALLA, Rifaat (Org.). **Trends in Geomatics - An Earth Science Perspective**. [s.l.]: IntechOpen, 2018, p. 11.
- GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, O. A.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Detection of karst depression by aster image in the Bambuí Group, Brazil. **SPIE**, v. 5983, p. 328–339, 2005.
- GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; DE WAELE, J.; JOURDE, H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. **Earth Science Reviews**, v. 138, p. 61–88, 2014. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.
- HARRIS, P. M.; PURKIS, S.; REYES, B. Statistical pattern analysis of surficial karst in the Pleistocene Miami oolite of South Florida. **Sedimentary Geology**, v. 367, p. 84–95, 2018.
- HIRUMA, S. T.; FERRARI, J. A. Análise comparativa da extração automatizada de dolinas a partir de modelos digitais de terreno. **Revista do Instituto Geológico**, v. 34, n. 2, p. 1–11, 2014.
- HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; BANDURA, P.; ŠAŠAK, J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. **Geomorphology**, v. 308, p. 265–277, 2018.
- JEANPERT, J.; GENTHON, P.; MAURIZOT, P.; FOLIO, J.; VENDÉ-LECLERC, M.; SÉRINO, J.; JOIN, J.; ISEPPI, M. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, p. 1854–1868, 2016.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.
- KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 274p. DOI:10.11606/T.44.1994.tde-22042013-163755.
- KAKAVAS, M. P.; NIKOLAKOPOULOS, K. G.; ZAGANA, E. Karst features detection and mapping using airphotos, DSMs and GIS techniques. **SPIE**, v. 96440, 2015.
- KESKIN, I.; YILMAZ, I. Morphometric and geological features of karstic depressions in gypsum (Sivas, Turkey). **Environmental Earth Science**, v. 75, n. 1040, p. 1–14, 2016.
- KLIMCHOUK, A. Karst morphogenesis in the epikarstic zone. **Cave and Karst Science**, v. 21, n. 2, p. 45–50, 1995.
- KOBAL, M.; BERTONCELJ, I.; PIROTTI, F.; DAKSKOBLER, I.; KUTNAR, L. Using Lidar Data to Analyse Sinkhole

- Characteristics Relevant for Understory Vegetation under Forest Cover — Case Study of a High Karst Area in the Dinaric Mountains. **Plos One**, v. 10, n. 3, p. 1–19, 2015.
- LI, S.; MACMILLAN, R. A.; LOBB, D. A.; MCCONKEY, B. G.; MOULIN, A.; FRASER, W. R. Geomorphology Lidar DEM error analyses and topographic depression identification in a hummocky landscape in the prairie region of Canada. **Geomorphology**, v. 129, n. 3–4, p. 263–275, 2011.
- LYEW-AYEE, P.; VILES, H. A.; TUCKER, G. E. The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 165–179, 2007.
- MIAO, X.; QIU, X.; WU, S.; LUO, J.; GOUZIE, D. R.; XIE, H. Developing efficient procedures for automated sinkhole extraction from Lidar DEMs. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 6, p. 545–554, 2013.
- OBU, J.; PODOBNIKAR, T. Algoritem za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reliefa. **Geodetski Vestnik**, v. 57, n. 2, p. 260–270, 2013.
- PALMER, A.N. **Cave Geology**. Dayton: Cave Books, 2007. 454 p.
- PARDO-IGÚZQUIZA, E.; DURÁN, J. J.; DOWD, P. A. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. **Acta Carsologica**, v. 42, n.1, p. 17–24, 2013.
- PARDO-IGÚZQUIZA, E.; PULIDO-BOSCH, A.; LÓPEZ-CHICANO, M.; DURÁN, J. J. Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean karst massif. **Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography**, v. 98, n. 3, p. 247–263, 2016.
- RAHIMI, M.; ALEXANDER, E. C. Locating sinkholes in LIDAR coverage of a glacio-fluvial karst, Winona County, MN. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 469–481.
- RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de cavernas: guia prático**. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 92p.
- SALLES, L. Q.; GALVÃO, P.; LEAL, L. R. B.; PEREIRA, R. G. F. A.; PURIFICAÇÃO, C. G. C.; LAUREANO, F. V. Evaluation of susceptibility for terrain collapse and subsidence in karst areas, municipality of Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 16, p. 593, 2018.
- SEALE, L. D.; FLOREA, L. J.; VACHER, H. L.; BRINKMANN, R. Using ALSM to map sinkholes in the urbanized covered karst of Pinellas County, Florida - 1, methodological considerations. **Environmental Geology**, v. 54, n. 5, p. 995–1005, 2008.
- ŠEGINA, E.; BENAC, Č.; RUBINIĆ, J.; KNEZ, M. Morphometric analyses of dolines — the problem of delineation and calculation of basic parameters. **Acta Carsologica**, v. 47, n. 1, p. 23–33, 2018.
- SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Geomorphology 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**, v. 112, n. 1–2, p. 106–121, 2009.
- SILVA, O. L.; BEZERRA, F. H.R.; MAIA, R. P.; CAZARIN, C. L. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. **Geomorphology**, v. 295, p. 611–630, 2017.
- ŠUŠTERŠIČ, F. Classic dolines of classical site. **Acta Carsologica**, v. 23, p. 123–154, 1994.
- TELBISZ, T.; DRAGUŠICA, H.; NAGY, B. Doline morphometric analysis and karst morphology of Biokovo Mt (Croatia) based on field observations and digital terrain analysis. **Hrvatski geografski glasnik**, v. 71, n. 2, p. 5–22, 2009.
- TELBISZ, T.; LÁTOS, T.; DEÁK, M.; SZÉKELY, B.; KOMA, Z.; STANDOVÁR, T. The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. **Acta Carsologica**, v. 45, n. 1, p. 5–48, 2016.
- THEILEN-WILLIGE, B. Detection of karst features in the Black Hills area in south Dakota/Wyoming, USA, based on evaluations of remote sensing data. **Geosciences**, v. 8, n. 6, p. 192, 2018.
- WALL, J.; BOHNENSTIEHL, D. R.; WEGMANN, K. W.; LEVINE, N. S. Morphometric comparisons between automated and manual karst depression inventories in Apalachicola National Forest, Florida, and Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA. **Natural Hazards**, v. 85, n. 2, p. 729–749, 2017.
- WILLIAMS, P. W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, n. 3, p. 761–796, 1972. DOI: 10.1130/0016-7606(1972)83
- WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 61, p. 45–67, 1983.

WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2008.

WU, Q.; DENG, C.; CHEN, Z. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. **Geomorphology**, v. 266, p. 1–10, 2016.

ZHU, J.; TAYLOR, T. P.; CURRENS, J. C.; CRAWFORD, M. M. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR

techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 207–216, 2014.

ZHU, J.; PIERSKALLA, W. P. Applying a weighted random forests method to extract karst sinkholes from LiDAR data. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 343–352, 2016.

ZWAHLEN, F. **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report (COST action 620)**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 297p.