

### Revista Brasileira de Geografia Física



Homepage: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe

## Localização de nascentes ameaçadas em áreas urbanas: Uma estratégia preventiva de conservação ambiental com auxílio de Modelo Digital do Terreno (MDT)

Barbara Fernanda da Cunha Tasca<sup>1</sup>, Fernanda Vieira Xavier<sup>2</sup>, Auberto José Barros Siqueira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engenheira Sanitarista e Ambiental e discente de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, n.°2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil. (65)3313-7306. E-mail: barbarafernandatasca@gmail.com (autor correspondente). <sup>2</sup>Doutora em Geociências e Meio Ambiente e pesquisadora no Instituto Nacional de Pesquisas do Pantanal – INPP/MPEG, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, n.°2367, Cidade Universitária, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil. E-mail: ferx.unesp@gmail.com. <sup>4</sup>Doutor em Sensoriamento Remoto e docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, n.°2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, 78060-900, Cuiabá-MT, Brasil. (65)3313-7306. E-mail: ajbsiqueira@gmail.com.

Artigo recebido em 27/10/2020 e aceito em 04/02/2021

#### RESUMO

Identificar nascentes urbanas para posterior delimitação de suas Área de Preservação Permanente (APP), é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental das cidades. No entanto, a escassez de ferramentas ou mecanismos facilitadores que atendam a essa finalidade, impede ou dificulta as ações de controle por parte das autoridades públicas. Como as nascentes ocorrem frequentemente nas proximidades do início de canais de drenagem de primeira ordem, supõe-se que a localização delas possa ser obtida por meio de modelos numéricos da superfície do terreno. Dessa forma, este estudo objetivou avaliar e demonstrar a aplicabilidade de Modelos Digitais de Terreno (MDT) como ferramenta auxiliar no processo de prospecção em campo de nascentes na área urbana de Cuiabá, MT. A metodologia empregada consistiu em extrair os canais de drenagem da área modelada, sendo possível indicar locais para prospecção correspondentes às regiões de cabeceiras dos canais de primeira ordem. Os resultados mostram que em 62,8% dos pontos indicados há nascente próximas no raio de até 300 metros. No entanto, em 28,6% dos locais não foi possível emitir uma avaliação conclusiva, em vista do alto nível de antropização. Ainda assim, somente 8,6% não apresentou nenhuma surgência no entorno, evidenciando que este método se mostrou eficaz para nortear a identificação de nascentes em campo. Concluímos que os procedimentos adotados neste trabalho são recomendáveis para cidades que disponham de levantamentos altimétricos detalhados, sendo especialmente úteis para as zonas de expansão urbana, onde o caráter preventivo de conservação de nascentes é essencial. Palavras-chave: Prospecção; nascente; Modelo Digital do Terreno; geoprocessamento; área urbana.

# Locating threatened urban headwaters: A preventive environmental strategy based on Digital Terrain Model (DTM)

#### ABSTRACT

Identifying urban headwaters and delimitating their Permanent Preservation Areas (PPA) before its inevitable degradation by the human occupation is essential to guarantee the long-term sustainability of the cities. However, the scarcity of tools for facilitating this purpose prevents public authorities from speeding up their control actions. As headwaters frequently occur near the beginning of first-order drainage channels, it is assumed that their location can be obtained by using numerical models of the land surface. Thus, this study aimed to evaluate and demonstrate the applicability of a Digital Terrain Model (MDT) as an auxiliary tool in the prospecting process in spring fields in the urban area of Cuiabá, MT, Brazil. The methodology consisted of extracting the drainage channels from the modeled area, making it possible to indicate locations for prospecting corresponding to the head regions of the first order channels. The results show that 62,8% of the occurrence of the headwaters were in a 300m radii from the first-order start points. However, it was not possible to issue a conclusive evaluation in 28,6% of the places due to the high level of anthropization. Nevertheless, only in 8,6% of them did not present any water emergence in the surroundings, indicating the effectiveness of this method in guiding the prospection of headwaters in field. We concluded that our procedures are worthful for cities that have detailed altimetric surveys, being especially useful in urban expansion areas, where the preventive character of headwaters conservation is essential.

Keywords: Prospection; headwater; Digital Terrain Model; geoprocessing; urban area.

#### Introdução

A crescente taxa de urbanização da população humana vem ocorrendo, em grande parte, em países tropicais de baixa a média renda, que não dispõem de recursos para enfrentar toda a gama de problemas ambientais decorrentes, incluindo segregação social, ocupação irregular, poluição do solo e das águas. É provável que este processo continue em ritmo descontrolado (United Nations, 2018).

Porém, de toda a pressão exercida sobre os recursos naturais, são os rios urbanos e suas nascentes os que mais facilmente se degradam em consequência da urbanização desordenada das cidades tropicais, constituindo-se em quadro de grande preocupação em escala global (Ramirez et al., 2009; Wagner e Zalewski, 2011; Teston et al., Frequentemente, 2017). nessas cidades urbanização avança sobre mananciais e suas nascentes dificultando ou mesmo impossibilitando sua função como fontes de abastecimento de água potável, da qual a crescente população urbanizada depende para sua sobrevivência (Zeilhofer e Miranda, 2012; Escobar, 2015; Marengo e Alves, 2015). Ademais, alterações climáticas como o aumento na frequência e intensidade de secas e de tempestades tropicais, concorrem à diminuição do volume dos reservatórios das cidades tropicais (Dai, 2011). As secas aumentam o déficit hídrico anual, e as tempestades assoreiam mananciais com sedimentos e/ou resíduos sólidos lancados em galerias, esgotos e canais dos rios urbanos (Nazareno e Laurence, 2015; Nobre et al., 2016).

Com a degradação sistemática de nascentes, as cidades, de modo geral, privam-se de serviços ambientais únicos: oferta de água limpa para a população humana e vida aquática, processamento e retenção de nutrientes, eliminação atenuação da poluição a iusante. autodepuração de poluentes trazidos escoamento superficial, proteção à contaminação e recarga de aquíferos (Foster, 2001; Foster et al., 2002; Elmore e Kaushal, 2008). Nos trópicos, é particularmente importante, o papel das nascentes e rios urbanos na atenuação de condicionantes microclimática como redução de altas temperaturas e manutenção da umidade, especialmente na estação seca, além de salvaguardar o bem-estar estético que nascentes preservadas introduzem na paisagem excessivamente construída do ambiente urbano (Duarte e Serra, 2002; Epstein et al., 2016). Como exemplo da degradação sistemática de nascentes em cidades tropicais sob forte expansão, Cuiabá, Mato Grosso, teve metade das nascentes remanescentes degradadas num período 08 anos

(2008-2016) (Figueredo et al., 2019). Tal fato mostra que para a prevenção da inevitável perda desses ativos ambientais, não basta o status legal que efetivamente desfrutam na legislação brasileira. É necessária uma estratégia efetiva, combinando esforços de localização e cadastramentos antecipados com ampla divulgação e interação com a população (MPE, 2020).

Mas, a despeito do crescente interesse mundial pela conservação das nascentes e suas zonas de recarga, elas ainda não têm sido adequadamente cartografadas (Jaeger et al., 2007). Todavia, o mapeamento de nascentes num cenário de expansão urbana acelerada, com movimentos especulativos e conflituosos pela posse de terras marginais (Gonçalves, 2002; Lwasa et al., 2014), é desafiador, pois, tanto a infraestrutura urbana, quanto ações deliberadas e delitivas são obstáculos concorrentes a ocultá-las e/ou dificultar-lhes o acesso. Portanto, o emprego de métodos previsionais indiretos na localização de nascentes em campo, tem valor estratégico no esforco da população urbana para a preservação desses recursos, antes da inevitável degradação.

Dentre OS métodos prospectivos disponíveis, os levantamentos geofísicos (aéreos e terrestres) e o imageamento por sensoriamento remoto se destacam por serem os mais tradicionalmente empregados em geociências. Alternativamente, neste trabalho, examinamos a aplicação dos modelos digitais (ou numéricos) da superfície da terra como um método indireto na prospecção de nascentes urbanas. Embora sejam utilizados exitosamente em vastos e significativos campos das geociências desde os anos 1970, podendo mesmo ser imprescindíveis em vários deles (Heil, 1979), esses produtos são ainda pouco explorados com tal objetivo. Além disso, podem ser empregados de forma sinergética com dados geofísicos tradicionais, como por exemplo, pela integração digital de dados multifontes, como já ocorre na prospecção mineral (Cunha, 2006; Ducart et al., 2016).

Em consequência do rápido desenvolvimento da tecnologia desses modelos, há atualmente relativa facilidade de sua obtenção e processamento. Muitos desses produtos são gratuitos, oferecidos por diversas agências governamentais, em diferentes escalas, modos de obtenção e nível de processamento (Wilson e Gallant, 2000; Chaplot et al., 2011). Essa disponibilidade é fator adicional de incentivo à maximização das suas potencialidades, pois podem ser acessados ou desenvolvidos a custos viáveis. por organizações públicas e/ou privadas, como as prefeituras municipais para o planejamento de ações preventivas para a preservação das nascentes urbanas. Mas, como consequência desse desenvolvimento, proliferaram-se conceitos e técnicas de processamento por vezes redundantes (Podobnikar, 2019) resultando em uma terminologia confusa, pelo que importa algumas definições básicas.

Assim, conceituamos o Modelo Digital de Terreno (MDT) como uma superfície modelada altitude geodésica, quando medida diretamente no terreno ("superfície nua do solo"), sem a interferência da cobertura (vegetação. prédios etc.), caso dos Modelos Digitais de Elevação (MDE). Diferentes métodos e abordagens possibilitam a conversão MDE → MDT, o que é um procedimento obrigatório para atenuar a interferência da cobertura do solo na altitude em análises morfométricas (Lindsay, 2016). Como obtivemos o MDT a partir de pontos cotados diretamente sobre o terreno, essa conversão tornouse desnecessária neste trabalho.

Os parâmetros dos MDTs podem ser classificados em duas categorias: parâmetros morfométricos de primeira ordem; e parâmetros derivados de segunda ordem (Wilson, 2012), e, em ambas encontramos propriedades que interessam aos objetivos desta pesquisa.

Por serem derivados diretamente da altitude (declividade, orientação e perfis curvaturas das geoformas, hipsometria quantificação de células contribuintes de fluxo de escoamento), parâmetros de primeira ordem são essenciais à análise tanto da geometria de bacias e delimitação acurada de seus divisores, quanto das depressões e elevações do terreno (Jaeger et al., 2007). A maioria desses parâmetros, considerados locais, é calculada por meio de uma janela móvel 3x3 pixels que percorre continuamente a imagem. Há que se observar, todavia, que a técnica é dependente da escala e dos tipos de algoritmos que executam essa análise. Atributos locais dos terrenos podem variar de acordo com os descritores matemáticos que cada algoritmo utiliza para essa finalidade. O tamanho dos pixels está relacionado com a acurácia horizontal e vertical, as quais ser adequadas para podem não capturar determinados níveis de detalhes que se quer investigar no terreno (Gallant, Hutchinson, 1997; Wilson. 2012). Assim. observando condicionantes, existe a possibilidade de encontrar nesta classe de parâmetros, não apenas o início do sistema de drenagem, mas também de identificar as formas erosivas às quais se associam.

Já os parâmetros de segunda ordem são de abrangência regional e devem ser integrados com outros fatores para derivarem informações úteis. Os parâmetros hidrológicos e da dinâmica superficial, bem como a modelagem da radiação solar enquadram-se nessa categoria. Wilson (2012), observa que, nesse sentido, os fundamentos teóricos subjacentes estão bem estabelecidos, assim como também estão os métodos computacionais de análise e a melhoria contínua na qualidade e resolução dos modelos ocorridos em mais de 20 anos de contínua evolução.

Na análise dos modelos digitais da superfície do terreno é possível relacionar indiretamente, com certo nível de incerteza, os parâmetros do escoamento superficial com o subsuperficial. Esses fluxos, primariamente governados pela força da gravidade, vão sendo modificados em função da sua interação com as propriedades dos materiais pelos quais escoa (superfície) e/ou permeia (subsuperfície). Nessa análise, supõe-se: (1) que o gradiente hidráulico piezométrico (cabeça hidráulica) que governa o fluxo subsuperficial é paralelo à superfície do solo; (2) que há um intervalo de tempo suficiente entre as chuvas e o momento em que o fluxo de subsuperfície atinge um estado estacionário e, (3) que os parâmetros derivados do MDT funcionam melhor quanto maior for importância da ação da força da gravidade na elaboração das geoformas em análise (Wilson, 2012).

No caso das cabeceiras (bem como das declivosas), estão presentes condições que fundamentam a aplicação do MDT no auxílio à localização de nascentes. Guerra (1993), no seu clássico Dicionário Geológico Geomorfológico, refere-se às cabeceiras como áreas onde "os olhos d'água, ou surgências, dão origem a um curso d'água e está no oposto da foz". Ele ainda enfatiza que não se deve apontar a cabeceira como um local bem definido: "Por vezes ela constitui uma verdadeira área, e neste caso, surge uma série de problemas não menos difíceis, como o da escolha de um critério para determinação do rio principal. [...] as cabeceiras são também denominadas de nascentes, fontes, minadouros, mina, lacrimal, pantanal, manancial".

Nos amplos domínios de relevos dissecados existentes nos planaltos e terrenos cristalinos na zona tropical, as cabeceiras instalamse em ressaltos topográficos que são áreas com declividade relativamente elevada. Nessas condições, o escoamento superficial, governado pela ação da gravidade, interagindo com diversos fatores dos meios físico (substrato geológico, solos,

clima) biótico e antrópico, acaba gerando incisões erosivas, geralmente lineares (ravinas), que dão origem aos canais de primeira ordem do sistema de drenagem. Dependendo da relação entre a acurácia vertical e a profundidade da incisão (entalhamento), tais feições podem ser detectadas por um MDT, possibilitando inferir a existência de nascentes próximo ao início delas.

Sob o ponto de vista hidrológico, nascentes ocorrem quando o nível do lençol freático (Water Table) intercepta a superfície do solo, dando origem a um fluxo d'água que se forma em uma zona de cabeceira (Allaby e Allaby, 1991). Tratase de um sistema ambiental integrado (Felippe, 2009) que o Art. 2º da Resolução CONAMA nº 303 (BRASIL, 2002), define como o local onde a água subterrânea aflora naturalmente, mesmo que intermitentemente.

Assim, a água armazenada subsuperficialmente entre a zona insaturada (vadosa) e o nível freático, surge naturalmente em superfície com uma nascente, de modo que, dependendo das condições morfodinâmicas locais, pode haver uma ou mais nascentes em uma zona de cabeceira. Todavia, enquanto as zonas de cabeceiras apresentam uma situação relativamente estável e detectável no terreno (já que existem formas de relevo a elas associadas), as nascentes em si, são dinâmicas, isto é, sua exata localização,

dinâmica de vazão, regimes hidrológicos, variam ao longo do ciclo hidrológico (Christofoletti, 1974; Guerra, 1993). Desse modo, ainda que o MDT possa, com base nas suposições aqui elencadas, indicar áreas favoráveis (maior probabilidade) de se encontrarem as nascentes de um sistema de drenagem natural, somente investigações em campo podem efetivamente demarcá-las e estudarlhes o funcionamento hidrológico.

Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de um MDT como ferramenta auxiliar no processo de prospecção em campo de novas nascentes e demonstrar os procedimentos metodológicos de processamento digital empregados na obtenção de produtos para essa finalidade. Para tanto, o estudo foi aplicado em uma região de baixa densidade de ocupação na cidade tropical de Cuiabá, Mato Grosso, na qual o MDT não sofre as severas distorções verticais que ocorrem nas zonas mais edificadas da cidade.

#### Material e métodos

**Área de Estudo -** Este estudo foi aplicado em uma área da cidade de Cuiabá, capital de Mato Grosso, localizada na região Centro Oeste no sul do estado.

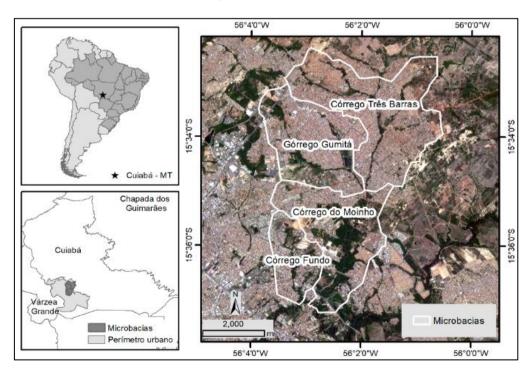


Figura 1: Localização da área de estudo.

Escolhemos uma área de 3.300 ha (Figura 1), com baixa densidade ocupacional, situada próximo ao

limite nordeste do perímetro urbano de Cuiabá. Essa área é parte das microbacias dos córregos do Moinho, Córrego Fundo, Gumitá, e Três Barras. Ela encontra-se parcialmente ocupada por cerca de 40 assentamentos consolidados a partir de ocupações irregulares, os quais estão parcialmente inseridos na malha urbana, apresentando baixa densidade de ocupação e espaços aptos para expansão muitos em áreas ambientalmente vulneráveis ou de risco ambiental (Zeilhofer e Miranda, 2012).

A expansão rápida e desordenada de Cuiabá ocorreu principalmente a partir da década de 1970. Em consequência a cidade apresenta atualmente baixíssima densidade urbana de 250 habitantes/ha, com 98% dos aproximados 612.000 habitantes do município vivendo em sua área urbana, conforme estimativas do IBGE e IPDU (2008). Devido ao crescimento exponencial da taxa de urbanização, da ausência de planejamento territorial e da contínua ampliação do perímetro urbano motivado pela especulação mobiliária, uma cidade de médio porte como Cuiabá, passou a apresentar problemas de deterioração dos recursos hídricos típicos das megacidades brasileiras. Com efeito, em termos de recursos hídrico, estudos recentes mostram que 46% das nascentes urbanas foram degradadas entre 2008-2016, um período de 08 anos que coincide com alta da atividade imobiliária (Figueredo et al., 2019).

Em termos hidrográficos, a área urbana, com 20,6 mil hectares é entrecortada por uma rica rede de pequenos córregos, a maioria dos quais intermitentes, afluentes diretos ou indiretos da margem esquerda rio Cuiabá, importante contribuinte do Pantanal Mato-grossense.

Graças à abundância da oferta hídrica superficial, formada pelos rios perenes do Coxipó da Ponte e Cuiabá, a cidade conta com um sistema de abastecimento com captação a fio d'água ainda eficiente, sem necessidade de construção de reservatórios (Moraes et al., 2018).

O substrato geológico da cidade de Cuiabá é constituído principalmente por rochas metassedimentares do Grupo Cuiabá (subunidades litológicas 5 e 6), com ocorrência de filitos e metarenitos fortemente dobrados, foliados, fraturados, cortados por veios de quartzo ao longo dos planos de foliação, com direção preferencial NE/SW. Por essa razão, constitui-se em aquífero fissural, de baixa potencialidade hídrica (CPRM, 2006).

Em escala regional, a expressão geomórfica desses terrenos se faz por um relevo aplainado, com rochas muito alteradas superficialmente (saprolitos). Por vezes sobrepostos por depósitos de cascalhos oriundos da

desagregação de veios de quartzo e interflúvios tabulares geralmente sustentados por couraças lateríticas. Esses relevos se inserem na unidade morfológica conhecida como Depressão Cuiabana, que apresenta formas de relevo com dissecação média a forte e declividade média a alta. O entalhamento de vales tectonicamente controlados é o principal fator associado à modelagem geomórfica dessa unidade que se compõem de "colinas, morrotes e morros residuais, com diferentes intensidades de aprofundamento de drenagem" (CPRM, 2006). Associadas aos relevos residuais, ocorrem também formas de agradação por acumulações fluviais em fundos de vales e planícies flúvio-lacustres (rios meandrantes), diques marginais, terraços aluviais, dentre outros (IPEM, 2008).

O clima de Cuiabá é classificado como Tropical Úmido, com temperaturas elevadas e alto índice pluviométrico. A temperatura média mensal é de aproximadamente 27°C nos meses de outubro a março. No entanto, a temperatura atinge os 40° C nesse período. frequentemente Temperaturas médias menores ocorrem no mês de junho e julho, ficando em torno de 22°C, período em que podem cair a menos de 10°C por influência de frentes frias vindas do sul. O total de precipitação anual é de aproximadamente 1350 mm, ocorrendo em maior quantidade durante o verão (SONDA, 2020). O período de estiagem, que coincide com o inverno, se inicia em abril e termina após sete meses, em outubro, sendo agosto e setembro os meses mais secos do ano. A chuva retorna em outubro, porém o período de excedente hídrico se inicia apenas em janeiro, após ser disponibilizada a quantidade de água necessária à saturação dos solos secos IPEM (2008).

Essa característica de regime pluviométrico tipicamente tropical, com dois períodos sazonais bem definidos, um de estiagem e outro de excedente hídrico, favorece a intermitência e a oscilação do local das nascentes, conforme a variação da saturação do nível freático ao longo do ano hidrológico.

**Procedimentos** - O trabalho seguiu as seguintes etapas (Figura2):

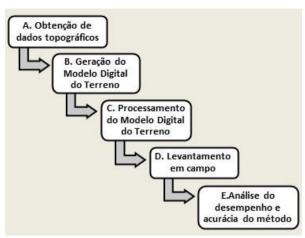


Figura 2: Etapas do estudo

A Obtenção dos dados topográficos: Os dados altimétricos de entrada para elaboração do MDT foram a malha irregular de pontos cotados **ENGEFOTO** gerados pela (http://www. engefoto.com.br/sobre/), contratada pela Prefeitura Municipal de Cuiabá para a elaboração do mapa planialtimétrico da cidade em 2006. Esses pontos foram obtidos por aerofotogrametria digital e corrigidos por pontos de controle no terreno. Para a aerotriangulação foram empregados instrumento transferidor de pontos e estereocomparador de 1<sup>a</sup> ordem e estações digitais que garantiram a obtenção dos padrões de precisão e exatidão exigidos para cartas classe A, na escala de restituição 1:1.000. A altimetria foi representada por curvas de nível equidistantes de um metro, e pontos cotados à 0,5 metro de precisão. Isso permitiu que a planialtimetria atingisse o nível A de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) A, pois a precisão altimétrica correspondeu à metade da equidistância da curva de nível. As coordenadas do aerolevantamento foram referenciadas no Sistema Geodésico Brasileiro, com datum SAD-69 (South American Datum) e origem no vértice Chuá/MG. As coordenadas altimétricas, apresentadas na forma de cota ortométrica, foram referenciadas ao datum vertical do marégrafo de Imbituba/SC. A área do aerolevantamento foi subdividida em 17 folhas articuladas abrangendo quase todo o perímetro urbano. Neste trabalho, utilizamos os pontos cotados das folhas D e F da região nordeste da cidade. Esses dados foram disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Cuiabá para o Projeto Água para **Futuro** (https://aguaparaofuturo.mpmt.mp.br/) em formato DWG. Posteriormente, os convertemos para o formato vetorial shapefile por meio do SIG ArcGIS Desktop 10.7 (licença ESU255736906). O sistema de coordenadas de referência do nosso projeto foi o WGS84 UTM, Zona 21 Sul.

B - Geração do Modelo Digital do Terreno: Para a geração do MDT hidrologicamente condicionado, utilizamos o algoritmo "Topo to Raster", que é baseado no ANUDEM (Australian National University's Digital Elevation Model) (Hutchinson, 1989), cuja versão atual usada no ArcGIS é a 5.3 (ESRI CORP. 2020). Tal ferramenta é otimizada para ter a eficiência computacional de métodos de interpolação local, sem perder a continuidade da superfície de modo a resultar em uma rede de drenagem conectada, com representação correta de cristas e córregos.

O procedimento de interpolação com o ANUDEM utiliza informações e características conhecidas das superfícies de elevação para diminuir possíveis erros cometidos pelo método. A otimização da resolução do MDT ocorre por meio da utilização de dados adicionais como curvas de nível, pontos cotados, delimitações de rios ou lagos, entre outros (Hutchinson, 1989).

O tamanho do pixel é o parâmetro mais crítico na obtenção do MDT. Para defini-lo, contrapusemos a resolução da grade de pixels em função da amostragem (número e distribuição dos pontos cotados) com as ondulações topográficas do modeladas no terreno nas zonas de cabeceiras (veia-se, por exemplo, Gallant e Hutchinson, 1997 sobre o assunto). Isso é particularmente importante quando a delimitação de divisores de água é realizada com base na computação da acumulação do fluxo em células adjacentes. Nesses casos, o tamanho das células altera as redes de conexões utilizadas para a delimitação dos canais de drenagem e interflúvios. Consequentemente, alteram-se as linhas divisoras entre bacias. Por essa razão, adotamos como referência a densidade da malha irregular dos pontos cotados na área de estudo que foi de 1 ponto por 26,76 m<sup>2</sup>, pelo que estabelecemos o tamanho do pixel em 5 x 5 m (25 m<sup>2</sup>). Esse tamanho revelou-se, posteriormente compatível com as ondulações do relevo nas zonas de cabeceiras da área de estudo.

C - Processamento do MDT: O processamento do MDT obtido na etapa anterior teve como objetivo final a identificação das coordenadas do início dos canais de escoamento, nas imediações de onde há maior probabilidade da ocorrência das nascentes. O processamento seguiu a sequência de procedimentos usuais em estudos desse tipo (Figura 3), conforme as abordagens de Jenson e Domingue (1988); e Tarboton, Bras e Rodriguez–Iturbe (1991), algumas das mais utilizadas nos SIGs.



Figura 3: Etapas do processamento do MDT.

O primeiro passo (I - Preenchimento de depressões) consistiu em remover imperfeições no MDT, como áreas de fluxos interrompidos por depressões artificiais ("sinks" ou "pits"). Estes artefatos podem resultar em inconsistências do fluxo hidrológico por induzir a quebra de continuidade de escoamento ao longo do MDT. Trata-se, portanto, de uma etapa praticamente obrigatória do processamento do MDT. principalmente quando se trata de derivar, a partir deles, atributos do terreno como áreas de bacias e rede hidrográfica. Todavia, até o momento nenhuma abordagem produziu resultados satisfatórios. As alternativas totalmente algoritmos incluem: os filtros suavizantes, os rompedores de depressões e os preenchedores de depressões (Liu et al., 2017; Wang et al., 2019). Esta última, a mais amplamente utilizada em SIGs, é implementada no ArcGIS por meio da ferramenta "Fill". Na aplicação, não especificamos um limiar de altitude mínima, pelo que todas as áreas planas foram consideradas depressões artificiais. Em seguida estas foram preenchidas com valores de altitude mínima na vizinhança D8, fazendo com que o fluxo fosse forçado ininterruptamente para jusante.

O passo seguinte (II – Codificação do sentido do escoamento) é o estabelecimento do sentido do fluxo do escoamento que deve ser executado no MDT, após a eliminação das depressões artificiais que nele possa haver. O sentido do fluxo define relações hidrológicas entre pontos diferentes em uma bacia hidrográfica, porquanto modela a direção para onde a água escoará após atingir cada pixel (Sobrinho et al. 2010). Para tal fim, há muitos métodos disponíveis, a maior parte dos quais define um código de direção de fluxo que aponta para a declividade máxima em uma vizinhança definida como D8 (O'Callaghan e Mark, 1984; Jenson e Domingue, 1988) ou D∞, quando o algoritmo atua em todas as

direções (Al-Muqdadi e Merkel, 2011). Esses apontadores ("pointers") indicam para qual das células o escoamento seguirá, gerando assim, uma direção de fluxo única para todo o MDT. A primeira é a implementada pelo ArcGIS, por meio da ferramenta "Flow Direction".

Na etapa III – Cálculo da acumulação de escoamento, aplicamos para cada pixel, a ferramenta "Flow Accumulation" no raster com as direções de fluxo, momento em que é calculado o número de células que contribuem para que o escoamento chegue até cada pixel. Este processo compara cada pixel com seus oito vizinhos próximos e determina, por meio da direção do fluxo, quantas células drenam para a célula a jusante, acumulando os dados para cada pixel do raster (Bosquilia, 2014).

O objetivo da próxima operação (IV – Definição do limiar do número de células contribuintes à rede hidrográfica) é selecionar as células do MDT que irão participar da extração da rede hidrográfica. Para isso os algoritmos utilizam a acumulação de fluxo da etapa anterior. Entretanto, como a cada célula é assinalado um valor de fluxo, todas aquelas com fluxo não nulo poderiam integrar uma rede hidrográfica.

Assim, o algoritmo não distinguiria os canais reais, vinculados às linhas de talvegue ("caminho das águas"), de pequenas depressões do terreno não pertencentes a rede de drenagem. Para evitar essa inconsistência com a realidade, nos algoritmos D8, uma célula do MDT precisa satisfazer a condição de receber um fluxo acumulado acima de um dado limiar para que possa integrar-se à rede de drenagem. Esse limiar apresenta uma relação inversa com a densidade de drenagem extraída, ou seja, quanto maior for o seu valor, menor o número de canais de drenagem e vice e versa.

A escolha desse limiar é uma decisão crucial, pois todas as análises hidrológicas posteriores são afetadas pelo número de células contribuintes à rede hidrográfica, para a qual inexistem regras objetivas, válidas para todas as situações possíveis. É recomendável, portanto, levar em conta aspectos geomórficos locais e os obietivos de cada investigação. particularmente relevante quando se busca aspectos singulares como o início de canais de drenagem em bacias com pequena área de contribuição, localizadas em terrenos planos (Jaeger et al., 2007; Nicoll e Brierley, 2017; Liu, Wang e Chu, 2017; Wang, Qin e Zhu, 2019; Ågren e Lidberg, 2019).

Como referência para o limiar, adotamos o tamanho das Áreas de Preservação Permanentes -APP de nascentes urbanas. Em zonas urbanas elas correspondem às áreas circunscritas por um raio de 50m (0,750 ha) em torno do local da surgência do lençol freático (BRASIL, 2012), a qual equivale a 314 pixels de 5x5m do MDT. Todavia, nos domínios dos relevos dissecados de Cuiabá, a formação de nascentes requer, normalmente, uma área adicional de captação e concentração de fluxos superficiais, a qual integra à rede hidrográfica como canais efêmeros de primeira ordem (Figura 4). Portanto, para saber qual seria o valor mais representativo dessa área, multiplicamos o limiar mínimo por 2, 5, 10, 15 e 20 vezes e comparamos os resultados das respectivas extrações da rede drenagem com uma imagem de satélite de alta resolução espacial. Desse modo, o limiar de 20 vezes o mínimo (15,7 ha) foi o que melhor retratou as linhas de talvegue do terreno, não sofrendo a influência de pequenas diferenças de declividades em locais, sem presença de canais de drenagem. Essa operação é realizada por meio de algoritmos de análise condicional a qual no ArcGIS é feita pela ferramenta COM.

O arquivo gerado anteriormente ainda se encontra em formato matricial que é indicado para representação de variáveis de campos contínuos e não para objetos espaciais, caso de canais de drenagem. No ArcGIS a conversão entre esses formatos (V — Vetorização dos canais de escoamento) foi realizada pelo algoritmo "Stream to Feature" o qual utiliza a codificação sentido do escoamento (etapa II) para delinear o traçado dos talvegues com maior fluxo acumulado de acordo com o limiar definido na etapa III.

Em posse das redes de drenagem vetorizadas como polilinhas, passamos identificação da ordem hierárquica dos canais com o principal objetivo de encontrar os de primeira ordem (VI - Identificação do início dos canais de escoamento), e, em seguida, localizar seus respectivos pontos iniciais. Cabe ressaltar que as coordenadas destes pontos foram consideradas como o início dos canais por estarem localizados mais próximos aos divisores de água, ou seja, nas áreas de cabeceiras, conforme já descrito, e conforme pode ser visto na Figura 5. A operação foi realizada com a ferramenta "Stream Order" que ambém utiliza o sentido do escoamento, seguida pela ferramenta "Feature Vertices to Points".

D - Levantamento em campo: Em campo os trabalhos foram realizados pelos técnicos do Projeto Água para o Futuro (https://aguaparaofuturo.mpmt.mp.br/), com o

objetivo de investigar in loco a existência de nascentes no entorno dos pontos previstos pelo MDT. Foram classificados como validados os pontos com surgências do lençol freático e não validados na ausência delas. Em campo, os pontos foram localizados utilizando-se receptor GPS de navegação.

Ao encontrá-los a equipe realizava uma investigação com os seguintes procedimentos principais (MPE, 2020): (i) análise macroscópica; (ii)furos com trado manual, (iii) coleta de amostras do corpo hídrico e/ou da biota local e, (iv) posicionamento preciso do local das surgências. A análise macroscópica, consistiu na detecção visual surgências, avaliação das condições de preservação/ conservação do local em termos de uso do solo, biota (flora e fauna), qualidade visual da água da surgência e classificação das geoformas presentes. A tradagem manual permitiu examinar propriedades dos solos como, condições de porosidade/permeabilidade, saturação, hidromorfismo, espessura alterações intempéricas do substrato (saprolitização). Amostras da água e/ou efluente (caso de alta contaminação por lançamento de esgoto) foram coletadas para análise físico-química bacteriológica. A equipe obteve coordenadas precisas do posicionamento das surgências por meio de receptor GPS geodésico. O procedimento foi documentado oficialmente pelo memorial de homologação, de acordo com as normas do Manual Técnico de Posicionamento do INCRA. Além da análise de desempenho, o procedimento permitirá, futuramente, implantar marcos geodésicos nos locais, para definição precisa de zonas tampão de proteção (APP) em torno das nascentes. levantamentos ocorreram preferencialmente entre o final da estação das chuvas (abril) e início da estação seca (agosto) em que há major facilidade de acesso e é possível observar o tipo funcionamento hidrológico (perenidade/intermitência) na transição entre ambos. Após a homologação, as nascentes têm sido monitoradas pelo menos duas vezes ao ano (período chuvoso e seca) desde 2016, quando começaram os trabalhos.

E: Análise de desempenho e acurácia do método previsional: Analisamos o desempenho do modelo previsional por meio da relação: número de pontos previstos sem nascentes / número pontos previstos com nascentes. Avaliamos a acurácia posicional do modelo, identificando intervalos de distâncias mais frequentes em que as nascentes distavam dos locais previstos. Para tanto,

construímos zonas tampão (*buffers*) múltiplas e concêntricas em torno dos pontos previstos em faixas de 40, 80, 120 e 300 m. Sobrepondo-se os pontos validados a estas faixas, construímos histogramas de frequência com os números de

pontos de nascentes encontradas em cada faixa de distância dos pontos previstos. As operações foram realizadas por meio dos algoritmos "Multiple Ring Buffer", seguida por "Tabulate Intersection" para a construção do histograma.

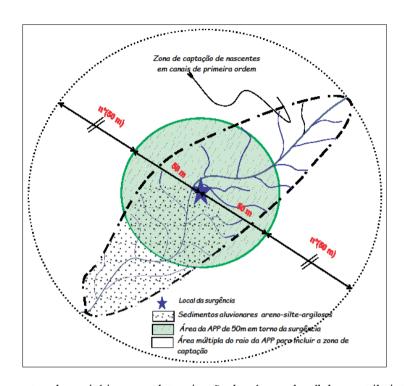


Figura 4: Diagrama mostrando o critério para a determinação do número de células contribuintes para a formação de uma rede de drenagem nos relevos dissecados do Grupo Cuiabá. Elaboração: Siqueira, 2020.

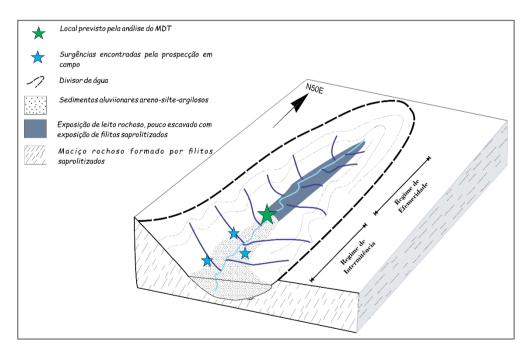


Figura 5: Local indicado pelo MDT associado às cabeceiras, ou seja, ao início do sistema de drenagem. Elaboração: Siqueira, 2020.

#### Resultados

O MDT, gerado a partir da interpolação de 1.699.234 pontos cotados (Figura 6), com tamanho de pixel de 5 x 5 m, apresentou uma variação de altitude entre o mínimo de 141,80 m e máximo de 258,56 m, o que não difere muito dos pontos cotados originais, que possuem altitude mínima de 140,83 metros e altitude máxima de 258,61 metros.

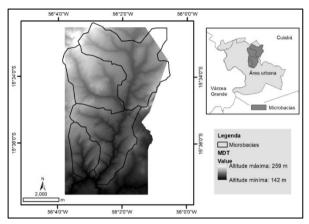


Figura 6: Modelo Digital de Elevação.

Os desvios padrões, no entanto, foram desiguais, pois o MDT apresentou o valor de 22,12 metros, enquanto os pontos cotados que serviram de entrada ao processamento do MDT apresentaram valores de 18,87 metros (NE-D) e 14, 90 metros (NE-F).

Conforme mencionado, o objetivo do processamento do MDT foi identificar o início dos canais de drenagem, supondo as nascentes estariam localizadas nas suas proximidades como é frequente nas regiões de cabeceiras.

Assim sendo, este estudo possibilitou a identificação de 44595,42 m de linhas de talvegue e indicou a localização de 35 pontos de prováveis início de canais de drenagem sugeridos para a prospecção de nascentes (Figura 7).

De posse das coordenadas geodésicas dos 35 pontos indicados pela análise do MDT, a equipe do Projeto Água para Futuro, começou as investigações em campo, sendo constatada a presença de nascentes em 22 deles (62,8%), os quais foram classificados como validados. Em 3 locais não foi registrada a ocorrência de afloramento hídrico (8,6%),sendo classificados como "não validados". Em 10 locais (28,6%) não foi possível emitir uma avaliação conclusiva, em vista do alto nível de degradação e/ou intermitência, portanto foram considerados como pontos "não avaliados" (Quadro 1).

Quadro 1: Validação em campo dos 35 pontos indicados pelo MDT.

Pontos indicados pelo MDT	Número	%
Pontos validados	22	62,8
Pontos não validados	3	8,6
Não avaliados	10	28,6
Total	35	100

Na Figura 8, os números representados no mapa, dizem respeito à quantidade de nascentes identificadas em campo, associadas a cada ponto indicado pelo MDT. O detalhamento pode ser visto nas Tabelas de 1 a 4.

Ressalta-se que estudos adicionais são necessários para validar ou não os locais que não puderam ser acessados, o que pode ocorrer por meio de métodos geofísicos e/ou escavações. Além disso, cabe destacar que em alguns destes pontos indicados pelo MDT existe mais de uma nascente.

Deste modo, o Projeto Água para o Futuro identificou em campo um total de 36 nascentes nos 22 pontos constatados anteriormente na área estudada.

Como pode ser visto na Figura 8, as 36 nascentes identificadas localizam-se nas proximidades dos pontos indicados pela análise do MDT, com exceção da nascente nº 5, da microbacia do Córrego Três Barras, que foi considerada um outlier, pois ficou fora do limite do MDT. Observase que essa nascente (nº5) não foi considerada na análise das distâncias.

Para analisar a eficiência do método, realizamos a análise de proximidade entre as nascentes encontradas pelos levantamentos em campo e os pontos indicados pelo MDT. Para tanto, sobrepusemos os pontos indicados a faixas de distâncias concêntricas de 40, 80,120 e 300 m, (Figura 9). Com base nessa análise construímos histogramas frequência (Figura demonstrando graficamente a relação entre o número de nascentes encontradas nessas faixas de proximidade em cada microbacia. Nas Tabelas 1, 2, 3, 4, é possível observar com maior detalhe a relação de distâncias entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes de cada microbacia.

Essa análise demonstrou que as nascentes foram encontradas há uma distância média de aproximadamente 160m dos pontos previstos nas três microbacias estudadas, variando entre um mínimo de 41 m na microbacia do córrego Três Barras a um máximo de aproximadamente 280m no córrego Gumítá. A investigação em campo nas proximidades dos pontos indicados pelo MDT, possibilitou um aumento de 18 nascentes (50%) em

relação às encontradas em levantamento de campo realizado por IPEM, 2008. Todas as microbacias estudadas obtiveram incremento no número de nascentes (Figura 11), sendo a microbacia do Córrego Gumitá a que apresentou o maior incremento relativo (75%), e a microbacia do Córrego Três Barras a que apresentou o menor incremento (33%).

De um modo geral, foi possível constatar a ocorrência de nascentes nas vizinhanças de 22

dentre os 25 pontos que puderam ser avaliados pela prospecção em campo, mostrando uma probabilidade de 88% de confirmação das nascentes em relação a inexistência delas.

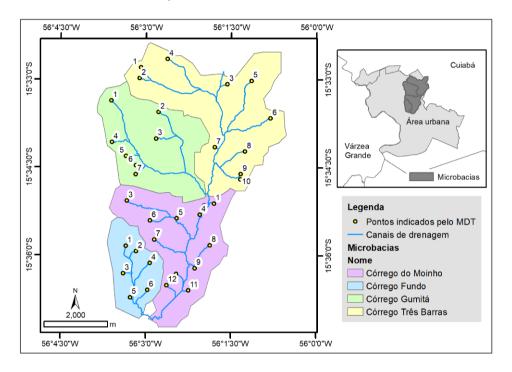


Figura 7: Mapa com a vetorização da rede de drenagem e pontos relacionados ao início dos canais. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

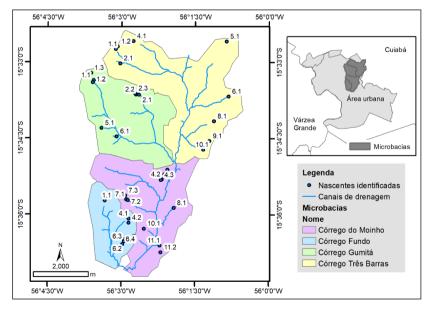


Figura 8: Espacialização das nascentes identificadas e pontos indicados de acordo com a validação em campo. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

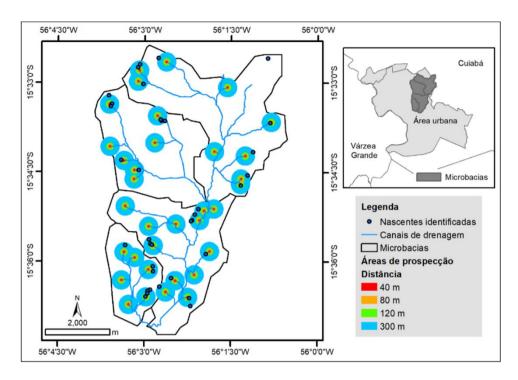


Figura 9: Buffers indicando as áreas de cabeceiras onde foram realizadas as prospecções das nascentes e espacialização das nascentes identificadas no entorno dos pontos indicados pelo MDT. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

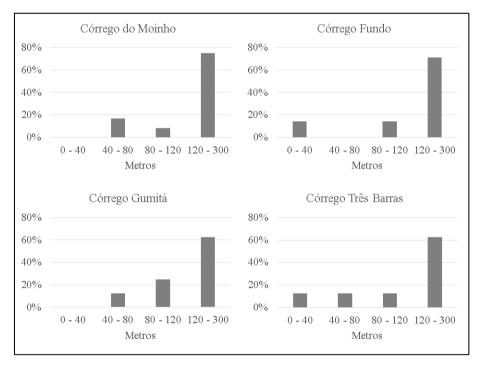


Figura 10: Frequência de ocorrência de nascentes em classes de distâncias a partir do ponto indicado pela análise do MDT. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

#### Revista Brasileira de Geografia Física v.14, n.04 (2021) 2186-2203.

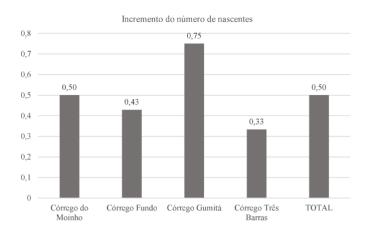


Figura 11: Incremento do número de nascentes por microbacia. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

	Microbacia Córrego Três Barras								
Coordenadas dos pontos indicados pelo MDT			Coord	enadas dos pontos	Diferença de distância entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes encontradas				
Pontos	$X_{i}$	$Y_i$	$Z_{i}$	Nascentes	Xn	Yn	Zn	$D_{m}$	
1	560 2' 5 612" W	15° 32' 47,715" S	221,98	1.1	56° 3' 7,180" W	15° 32' 44,823" S	231,07	100,38	
1	30 3 3,013 W	13 32 47,713 3	221,90	1.2	56° 3' 5,017" W	15° 32' 41,663" S	234,10	186,81	
2	56° 3' 6,821" W	15° 32' 58,785" S	216,68	2.1	56° 3' 1,742" W	15° 33' 1,679" S	213,40	175,50	
3	56° 1' 34,142" W	15° 33' 4,727" S	190,84	-	-	-	-	-	
4	56° 2' 37,539" W	15° 32' 39,214" S	215,02	4.1	56° 2' 45,792" W	15° 32' 35,390" S	229,02	272,51	
5	56° 1' 8,814" W	15° 33' 1,198" S	193,71	5.1	56° 0' 52,050" W	15° 32' 35,404" S		-	
6	56° 0' 48,490" W	15° 33' 39,589" S	195,03	6.1	56° 0' 49,417" W	15° 33' 40,430" S	195,13	37,83	
7	56° 1' 47,435" W	15° 34' 9,383" S	178,04	-	-	-	-	-	
8	56° 1' 15,354" W	15° 34' 13,553" S	188,33	8.1	56° 1' 7,326" W	15° 34' 9,658" S	200,47	267,39	
9	56° 1' 19,777" W	15° 34' 36,678" S	185,78	9.1	15° 34' 33,113" S	56° 1' 12,889" W	193,19	232,56	
10	56° 1' 20,254" W	15° 34' 42,131" S	185,21	10.1	56° 1' 20,021" W	15° 34' 43,455" S	186,89	41,29	
Distância média								164,28	

Tabela 1: Relação entre os pontos indicados pelo MDT e os locais onde foram encontradas as nascentes na microbacia do Córrego Três Barras. Xi;Yi;Zi – coordenadas dos pontos indicados pelo MDT; Xn;Yn;Zn – coordenadas das nascentes; Dm – distância euclidiana entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020. Tabela 2: Relação entre os pontos indicados pelo MDT e os locais onde foram encontradas as nascentes na

	Microbacia Córrego Gumitá								
Coordenadas dos pontos indicados pelo MDT			Coord	lenadas dos pontos	Diferença de distância entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes encontradas				
Pontos	$X_{i}$	$Y_i$	$Z_{i}$	Nascentes	Xn	Zn	$D_{m}$		
				1.1	56° 3' 34,230" W	15° 33' 21,447" S	217,109	76,46	
1	56° 3' 36,761" W	15° 33' 21,856" S	216,01	1.2	15° 33' 24,029" S	56° 3' 35,196" W	214,913	81,44	
				1.3	15° 33' 12,949" S	56° 3' 37,449" W	224,197	274,48	
				2.1	56° 2' 39,001" W	15° 33′ 38,540″ S	202,57	279,58	
2	56° 2' 46,772" W	15° 33' 33,438" S	220,75	2.2	56° 2' 42,686" W	15° 33' 38,475" S	207,01	196,90	
				2.3	56° 2' 43,586" W	15° 33' 37,169" S	207,04	148,83	
3	56° 2' 49,416" W	15° 34' 0,623" S	203,26	-	-	-	-	-	
4	56° 3' 36,065" W	15° 34' 4,322" S	212,75	-	-	-	-	-	
5	56° 3' 21,228" W	15° 34' 18,577" S	203,19	5.1	56° 3' 24,402" W	15° 34' 18,043" S	205,31	95,95	
6	56° 3' 10,610" W	15° 34' 27,969" S	195,70	6.1	15° 34' 28,000" S	56° 3' 6,000" W	190,29	137,30	
7	56° 3' 10,904" W	15° 34' 37,082" S	197,11	-	=	-	-	-	
Distância média								161.37	

microbacia do Córrego Gumitá. Xi;Yi;Zi – coordenadas dos pontos indicados pelo MDT; Xn;Yn;Zn – coordenadas das nascentes; Dm – distância euclidiana entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

	Microbacia Córrego Fundo								
Coordenadas dos ponto indicados pelo MDT			Coord	lenadas dos pontos	Diferença de distância entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes encontradas				
Pontos	$X_{i}$	$Y_i$	$Z_{i}$	Nascentes	Xn	$D_{m}$			
1	56° 3' 21,060" W	15° 35' 50,510" S	178,04	1.1	56° 3' 20,024" W	15° 35' 43,600" S	189,053	214,58	
2	56° 3' 10,038" W	15° 35' 56,076" S	178,62	-	-	-	-	-	
3	56° 3' 23,701" W	15° 36' 18,752"	166,39	-	-	-	-	-	
4	56° 2' 55,712" W	15° 36' 8,137" S	171,24	4.1 4.2	56° 2' 51,164" W 56° 2' 50,918" W	,	175,85 179,08	164,01 153,22	
5	56° 3' 16,285" W	15° 36' 43,372" S	156,32	-	-	-	-	-	
	6 56° 2' 58,104" W 15° 36' 35,646" \$		S 163,59	6.1	56° 2' 53,862" W	15° 36' 28,517" S	175,31	252,87	
6		150 261 25 646" 9		6.2	56° 2' 56,435" W	15° 36' 29,607" S	177,35	192,09	
0		15 50 55,040 8		6.3	56° 2' 56,700" W	15° 36' 32,100" S	170,96	116,70	
				6.4	56° 2' 58,500" W	15° 36' 35,400" S	165,66	14,01	
Distância média								158,21	

Tabela 3: Relação entre os pontos indicados pelo MDT e os locais onde foram encontradas as nascentes na microbacia do Córrego Fundo. Xi;Yi;Zi – coordenadas dos pontos indicados pelo MDT; Xn;Yn;Zn – coordenadas das nascentes; Dm – distância euclidiana entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020.

Microbacia Córrego do Moinho								
Coordenadas dos pontos indicados pelo MDT				Coord	enadas dos pontos	Diferença de distância entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes encontradas		
Pontos	$X_{i}$	Yi	$Z_{i}$	Nascentes	Xn	Yn	Zn	$D_{m}$
1	56° 1' 47,836" W	15° 35' 7,067" S	165,96	-	-	-	-	-
2	56° 1' 58,067" W	15° 35' 8,983" S	164,88	2.1	56° 2' 3,747" W	15° 35' 7,303" S	176,62	176,88
3	$56^{\circ}$ 3' 20,012" W	15° 35' 4,295" S	193,13	-	-	-	-	-
				4.1	56° 2' 7,429" W	15° 35' 12,666" S	177,73	227,10
4	56° 2' 2,891" W	15° 35′ 18,604″ S	164,50	4.2	56° 2' 10,498" W	15° 35' 18,557" S	173,33	226,57
				4.3	56° 2' 11,628" W	15° 35' 19,485" S	174,65	261,63
5	$56^{\circ}$ 2' 27,216" W	15° 35' 22,290" S	167,97	-	-	-	-	-
6	56° 2' 55,577" W	15° 35' 24,610" S	189,41	-	-	-	-	-
7	56° 2' 50,787" W	15° 35' 43,952" S	176,08	7.1 7.2 7.3	56° 2' 52,077" W	15° 35' 42,169" S 15° 35' 43,349" S 15° 35' 37,705" S	185,84 179,44 190,09	107,33 42,66 233,83
8	56° 1' 52,168" W	15° 35' 49,798" S	174,39	8.1	56° 1' 56,058" W	15° 35' 52,509" S	169,14	142,70
9	56° 2' 8,091" W	15° 36′ 13,299″ S	156,24	-	-	-	-	-
10	56° 2' 27,790" W	15° 36′ 19,324" S	165,25	10.1	56° 2' 32,100" W	15° 36' 16,947" S	171,83	147,67
11	560 21 14 705" W	15° 36' 36,027" S	158,55	11.1	56° 2' 13,102" W	15° 36' 36,773" S	164,88	55,10
11	30 2 14,783 W	15 50 50,027 5	130,33	11.2	56° 2' 11,900" W	15° 36' 44,800" S	171,36	282,96
12	56° 2' 37,811" W	15° 36' 30,758" S	165,79	12.1	56° 2' 44,202" W	15° 36' 25,548" S	177,84	248,72
Distância média								179,43

Tabela 4: Relação entre os pontos indicados pelo MDT e os locais onde foram encontradas as nascentes na microbacia do Córrego do Moinho. Xi;Yi;Zi – coordenadas dos pontos indicados pelo MDT; Xn;Yn;Zn – coordenadas das nascentes; Dm – distância euclidiana entre os pontos indicados pelo MDT e as nascentes. Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

#### Discussão

Este trabalho partiu da suposição de que as nascentes, definidas como áreas ou zonas que originam um curso d'água, geralmente ocorrem em depressões lineares do terreno (linhas de talvegue), mais precisamente nas proximidades do início de canais de drenagem de primeira ordem (DE Blij et al., 2004; Goudie, 2004). Trata-se de uma concepção consistente com a legislação brasileira vigente (BRASIL, 2012). Sendo assim, com a identificação desses canais a partir da análise de um

MDT, seria então possível inferir o início dessas feições como os locais mais prováveis para ocorrerem nascentes em uma rede hidrográfica.

Nesse sentido, o método se mostrou eficaz para nortear a prospecção de nascentes em campo. O procedimento de prospecção no entorno dos pontos indicados no início dos canais de primeira ordem vetorizados a partir do MDT revelou uma eficiência de 62,8%, sendo encontradas surgências num raio de até 300 metros, com predominância na zona acima de 120 metros (68,6% do total de nascentes identificadas). Em apenas 8,6% dos

casos a equipe não encontrou indícios de afloramento do nível freático num raio de raio de 300 metros dos pontos indicados. Quanto ao sentido do deslocamento em relação ao local indicado. considerando as 36 nascentes identificadas em campo, exceto a nascente nº 5 da microbacia do Córrego Três Barras (outlier) 65,7% (23 nascentes) ocorreram a montante; 25,7% (9 nascentes) ocorreram a jusante; e 8,6% (3 lateralmente. Considerando nascentes). nascentes previamente mapeadas em 2008 (IPEM, 2008), este estudo possibilitou um incremento de 50% (18 nascentes) nas 04 microbacias estudas. Os procedimentos em campo foram agilizados. permitindo que todos os locais indicados fossem vistoriados no mesmo período sazonal, a partir de maio de 2017, diminuindo custos e facilitando a caracterização de nascentes ao longo do ano hidrológico.

É importante observar que o MDT não é uma imagem de sensoriamento remoto sensível à detecção da assinatura espectral da água, mas uma superfície contínua de dados altimétricos (Valeriano, 2009). Assim, seu emprego trata-se de um método indireto de prospecção que indica o início dos canais de primeira ordem como locais mais prováveis para encontrar nascentes. Esses locais dependem fortemente de uma complexa interação entre parâmetros do MDT e parâmetros do meio físico do terreno local. No primeiro caso, os parâmetros mais relevantes são a acurácia vertical dos pontos cotados, que depende da qualidade dos dados altimétricos, da frequência (densidade amostral) e dispersão espacial desses pontos na área de estudo e do limiar de células de contribuição. Em relação aos parâmetros do terreno, áreas declivosas tendem a favorecer a deteccão dos canais de primeira ordem. distinguindo-os das irregularidades topográficas não diretamente ligadas ao sistema de drenagem natural. O inverso é esperado em terrenos planos, caso do presente estudo, o que pode explicar, em parte, o deslocamento entre os locais indicados e as nascentes encontradas.

Por outro lado, as microbacias em estudo se encontram em domínios de relevo dissecado (CPRM, 2006; Figueredo et al., 2019), nos quais rochas metamórficas impermeáveis saprolitizadas (filitos/metadiamictidos) são entalhadas por incisões lineares, praticamente ravinas naturais, que se comportam como canais efêmeros. Nesses casos, os pontos iniciais dos canais de primeira ordem correspondem ao começo de uma incisão no relevo e não necessariamente a uma surgência, justificando o fato de a localização das nascentes

não corresponderem exatamente ao início desses canais. Por essa razão, é importante considerar a parte efêmera dos canais de primeira ordem ("ravinamentos") na modelagem do limiar de células de contribuição. Várias tentativas, com diferentes valores de limiar são necessárias até se chegar ao mais adequado, comparando a rede drenagem extraída a observada em uma imagem de satélite com resolução espacial compatível com o MDT. Há ainda o deslocamento do local natural das surgências ao longo do ano em função da alternância sazonal dos períodos seco e úmido ao longo do ano hidrológico. No primeiro caso, com a menor saturação dos solos, as nascentes tendem a se deslocar mais para jusante, enquanto no segundo para montante. Entretanto, esse deslocamento é também influenciado por ações antrópicas, sendo a impermeabilização das superfícies, o aterramento, a remoção da cobertura vegetal e o lançamento de esgotos na área de captação as mais relevantes delas (Figueredo et al., 2019). Desse modo, salienta-se que no longo intervalo de 10 anos entre a obtenção dos pontos altimétricos do MDT e os trabalhos em campo em 2016, podem ter ocorrido importantes alterações, tanto nos locais das surgências como no regime hidrológico. São razões que mostram a necessidade do monitoramento contínuo dos locais com nascentes.

A escolha de uma área de estudo com baixa densidade de ocupação foi uma decisão adequada, uma vez que os processos de antropização (aterramento e canalização, por exemplo) podem promover o desaparecimento de nascentes. Além disso, os constituem-se, normalmente em obstáculos que impedem o acesso para investigação em campo, como ocorreu em 10 locais indicados (28,6%).

#### Conclusão e Recomendações

Este estudo demonstrou a viabilidade do MDT como ferramenta auxiliar na prospecção de nascentes em áreas urbanas, com baixa densidade ocupação. abordagem Α procedimentos consagrados para a geração e análise de MDT, amplamente implementados tanto em SIGs comerciais quanto abertos. São, portanto, procedimentos robustos, porem relativamente acessíveis, e de fácil execução. Nesse sentido, é possível empregá-los de forma rápida e eficiente pela sociedade, principalmente pelos órgãos públicos, no mister de encontrar nascentes ameaçadas pela expansão urbana desordenada e adotar medidas para salvaguardá-las. disponibilidade de levantamentos aerofotogramétricos de precisão, é um prérequisito essencial, o que pode não ser o caso de muitas cidades, devido ao custo relativamente elevado deles. A existência de uma equipe técnica multidisciplinar capacitada, não apenas em termos de processamento, mas, principalmente, com amplo domínio do meio natural (parâmetros físicos e bióticos) e antrópico local, e habilitada à execução dos levantamentos em campo, é outra condição crítica para o êxito do método.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Projeto "Água Para o Futuro", desenvolvido por meio de uma parceria entre o Ministério Público Estadual de Mato Grosso, a Universidade Federal de Mato Grosso e o Instituto Ação Verde, sob coordenação geral do Promotor de Justiça Gerson Natalício Barbosa (17ª Promotoria de Justiça de Defesa da Ordem Urbanística e do Patrimônio Cultural de Cuiabá), por nos disponibilizar os dados e estrutura necessários para desenvolver esta pesquisa; e ao CNPq pela bolsa concedida por meio dos Institutos de Pesquisa: INPP – Instituto Nacional de Pesquisa do Pantanal e Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG.

#### Referências

- Ågren, A. M.; Lidberg, W. 2019. The importance of better mapping of stream networks using high resolution digital elevation models-upscaling from watershed scale to regional and national scales. Hydrology and Earth System Sciences Discussions (online) 4 February. Disponível: <a href="https://doi.org/10.5194/hess-2019-34">https://doi.org/10.5194/hess-2019-34</a>. Acesso: 9 março 2020.
- Allaby, A.; Allaby, M. 1991. The concise oxford dictionary of earth sciences. Oxford: Oxford University.
- Al-Muqdadi, S. W.; Merkel, B. J. 2011. Automated Watershed Evaluation of Flat Terrain. Journal of Water Resource and Protection (online) 3. Disponível:
  - http://www.scirp.org/journal/jwarp. Acesso: 9 março 2020.
- Bosquilia, R. W. D. 2014. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de drenagens e nascentes. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba.
- BRASIL, 2002. Resolução nº 303, de 20 de março. BRASIL, 2012. Lei nº 12.651, de 25 de maio.
- Chaplot, V.; Darboux, F.; Bourennane, H.; Leguédois, S.; Silvera, N., & Wilson, J. P. 2011. Digital terrain modeling. Geomorphology (online) 137. Disponível:

- http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03. 012. Acesso: 3 agosto 2020.
- Christofoletti, A. 1974. Geomorfologia. Ed. Edgard Blucher Ltda e EDUSP. 149p.
- Cunha, E. R. S. P. da; Santos, A. R. dos; Paradella, W. R.; Barros, C. E. D. M.; Veneziani, P. V.; Vale, A. G. do. 2006. Integração de Dados de Radar, Aerogamaespectrométricos e Geológicos nos Domínios do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás. Revista Brasileira de Geociências (online) 36. Disponível: <a href="https://doi.org/10.25249/0375-7536.2006362327335">https://doi.org/10.25249/0375-7536.2006362327335</a>. Acesso: 3 agosto 2020.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 2006. Sistema de Informação Geoambiental de Cuiabá, Várzea Grande e Entorno. Goiânia.
- Dai, A. 2011. Drought under global warming: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change (online) 2. Disponível: <a href="http://dx.doi.org/10.1002/wcc.81">http://dx.doi.org/10.1002/wcc.81</a> Acesso em: 20 de novembro de 2020.
- De Blij, H. J.; Muller, P. O.; Williams, R. S. 2004. Physical geography: the global environment. 3 ed. New York: Oxford University Press.
- Duarte, D. H. S.; Serra, G. G. 2003. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e propostas de um indicador. Ambiente Construído 3, 7-20.
- Ducart, D. F.; Silva, A. M.; Toledo, C. L. B.; de assis, L. M. 2016. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. Brazilian Journal of Geology (online) 46. Disponível: <a href="https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160023">https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160023</a>. Acesso: 24 agosto 2020.
- lmore, A. J.; Kaushal, S. S. 2008. Disappearing headwaters: Patterns of stream burial due to urbanization. Frontiers in Ecology and the Environment (online) 6. Disponível: <a href="https://doi.org/10.1890/070101">https://doi.org/10.1890/070101</a> Acesso: 27 março 2020.
- Epstein, D. M.; Kelso, J. E.; Baker, M. A. 2016. Beyond the urban stream syndrome: organic matter budget for diagnostics and restoration of an impaired urban river. Urban Ecosystems 21, 209.
- Escobar, H. 2015. Drought triggers alarms in Brazil's biggest metropolis. Science, Washington 347, 812-812.
- Marengo, J. A.; Alves, L. M. 2015. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online) 19.

- ESRI. Environmental Systems Research Institute. 2020. Disponível: How Topo to Raster Works. <a href="https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-topo-to-raster-works.htm">https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-topo-to-raster-works.htm</a>. Acesso: 30 março 2020.
- Felippe, M. F. 2009. Caracterização e tipologia de nascentes em unidades de conservação de Belo Horizonte com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais.
- Figueredo, R. R. D. Subtil, L. P. Tasca, B. F. Neves, R. A. Campos, P. A. S. Xavier, F. V. siqueira, A. J. B. 2019. Expansão urbana e degradação de nascentes: identificando padrões espaço-temporais de um processo crônico em Cuiabá, MT. Nativa 7, 396-406. Disponível: <a href="https://doi.org/10.31413/nativa.v7i4.7051">https://doi.org/10.31413/nativa.v7i4.7051</a>
  Acesso em 5 de janeiro de 2020.
- Foster, S. S. D. 2001. The interdependence of groundwater and urbanization in rapidly developing cities. Urban water 3, 185-192.
- Foster, S. et al. 2002. Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank. Washington, DC. Disponível: <a href="https://www.researchgate.net/publication/2804">https://www.researchgate.net/publication/2804</a> 93781 Acesso em 25 de maio de 2020.
- Gallant, J. C.; Hutchinson, M. F. 1997. Scale dependence in terrain analysis. Mathematics and Computers in Simulation (online) 43. Disponível: <a href="https://doi.org/10.1016/s0378-4754(97)00015-3">https://doi.org/10.1016/s0378-4754(97)00015-3</a>. Acesso: 31 agosto 2020.
- Gonçalves, J. C. A, 2002. Especulação imobiliária na formação de loteamentos urbanos: um estudo de caso. 2002. 146p. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas, SP. Disponível em: <a href="http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/285856">http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/285856</a> Acesso em 30 e outubro de 2019.
- Goudie, A. 2004. Encyclopedia of geomorphology. Routledge, Londres.
- Guerra, A. T. 1993. Dicionário Geológico-Geomorfológico. 8 ed. IBGE, Rio de Janeiro.
- Heil, R. J. 1979. The digital terrain model as a data base for hydrological and geomorphological analyses. Proceedings, Auto Carto 4, 132–138.
- Hutchinson, M. F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology 106, 211-232.
- IPEM. Instituto de Pesquisa Matogrossense. 2008. Caracterização e Delimitação Cartográfica Das Áreas de Preservação Permanente (App's) e de

- Zonas De Interesse Ambiental (Zia's) na Área Urbana de Cuiabá. (Relatório Técnico). Cuiabá.
- Jaeger, K. L.; Montgomery, D. R.; Bolton, S. M. 2007. Channel and perennial flow initiation in headwater streams: Management implications of variability in source-area size. Environmental Management (online) 40. Disponível: <a href="https://doi.org/10.1007/s00267-005-0311-2">https://doi.org/10.1007/s00267-005-0311-2</a>. Acesso: 27 abril 2020.
- Jenson, S. K.; Domingue, J. O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54, 1593–1600.
- Lindsay, J. B. 2016. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. Hydrological Processes (online) 30, Disponível: <a href="https://doi.org/10.1002/hyp.10648">https://doi.org/10.1002/hyp.10648</a>. Acesso: 14 setembro 2020.
- Liu, X.; Wang, N.; Shao, J.; Chu, X. 2017. An automated processing algorithm for flat areas resulting from DEM filling and interpolation. ISPRS International Journal of Geo-Information (online) 6. Disponível: <a href="https://doi.org/10.3390/ijgi6110376">https://doi.org/10.3390/ijgi6110376</a>. Acesso: 21 abril 2020.
- Lwasa, S.; Mugagga, F.; Wahab, B.; Simon, D.; Connors, J.; Griffith, C. 2014. Urban and periurban agriculture, and forestry: Transcending poverty alleviation to climate change mitigation and adaptation. Urban Climate 7, 92–106.
- Nazareno, A. G.; Laurance, W. F. 2015. Brazil's drought: Beware deforestation. Science 347, 1427.
- Nicoll, T.; Brierley, G. 2017. Within-catchment variability in landscape connectivity measures in the Garang catchment, upper Yellow River. Geomorphology (online) 277. Disponível: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X16301040">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X16301040</a>. Acesso: 21 setembro 2020.
- Nobre, C. A.; Marengo, J. A.; Seluchi, M. E.; Cuartas, L. A.; Alves, L. M. 2016. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. Journal of Water Resource and Protection 8, 252.
- O'callaghan, J. F.; Mark, D. M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 28, 323-344.
- Podobnikar, T. 2016. Relevant Quality of Digital Elevation Models in Earth and Environmental Studies? International Journal of Earth &

- Environmental Sciences (online) 1. Disponível: <a href="https://doi.org/10.15344/2456-351x/2016/106">https://doi.org/10.15344/2456-351x/2016/106</a>. Acesso: 22 setembro 2020.
- Ramírez, A.; de Jesús-Crespo, R.; Martinó-Cardona, D. M.; MArtínez-Rivera, N.; Burgos-Caraballo, S. 2009. Urban streams in Puerto Rico: what can we learn from the tropics? Journal of the North American Benthological Society. 28, 1070–1079.
- SONDA Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. 2020. Estação de Cuiabá Climatologia Local. Disponível: <a href="http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/cuiaba\_clima\_html">http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/cuiaba\_clima\_html</a>. Acesso: 18 maio 2020.
- Sobrinho, T. A. Oliveira, P. T. S. Rodrigues, D. B. B. Ayres, F. M. 2010. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. Eng. Agrícola 30, 46-57.
- Ministério Público do Estado de Mato Grosso. 2020. Roteiro básico para implantação do Projeto Água para o Futuro nos municípios de Mato Grosso. Centro de Apoio à Execução Ambiental CAEX Ambiental. Coord. Vachiano, M. C.; Barbosa, G. N.; Pereira, J. A. B.; Scaloppe, L. A. E. 1ª edição. Cuiabá, MT. Disponível:
  - https://aguaparaofuturo.mpmt.mp.br/publicaco es Acesso 29 de dezembro de 2020.
- Tarbotton, D.G.; Bras, R.L.; Rodriguez-Iturbe, I. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. Hydrological Processes 5, 81-100.
- Teston, A.; Colasio, B. M.; Ghisi, E. 2017. State of the Art on Water Savings in Buildings in Brazil:A Literature Review. Water Savings in Buildings 2, 1–61.
- United Nations, 2018. The Speed of urbanization around the world. Population Facts. Disponível:

- https://population.un.org/wup/Publications/File s/WUP2018-PopFacts 2018-1.pdf. Acesso: 15 julho 2020.
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F.; Albuquerque, P. C. G. 2009. TOPODATA: desenvolvimento da do dados primeira versão banco geomorfométricos locais em cobertura nacional. Anais Simpósio Brasileiro de XIV. Sensoriamento Remoto (online) Disponível:
  - http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%40 80/2008/11.14.21.06/doc/5499-5506.pdf. Acesso: 24 setembro 2020.
- Wagner, I.; Zalewski, M. 2011. System solutions in urban water management: The Lodz (Poland) perspective. In: Howe, C., Mitchel, C. (Eds). Water Sensitive Cities. IWA, Publishing, London, p. 231–245.
- Wang, Y. J.; Qin, C. Z.; Zhu, A. X. 2019. Review on algorithms of dealing with depressions in grid DEM. Annals of GIS (online) 25. Disponível:
  - https://doi.org/10.1080/19475683.2019.160457 1. Acesso: 20 abril 2020.
- Wilson, J. P.; Gallant, J. C. 2000. Terrain Analysis: principles and applications, n. 1988, p. 1–21.
- Wilson, J. P. 2012. Digital terrain modeling. Geomorphology (online) 137. Disponível: <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.">http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.</a>
  A012. Acesso: 9 setembro 2020.
- Zeilhofer, P. Miranda, C. S. 2012. Proposta de parcelamento e infraestrutura em bacias urbanas: estudo de caso Córrego do Moinho, Cuiabá, MT. GEOUSP Espaço e Tempo (online) 16. Disponível: <a href="http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/74251">http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/74251</a>. Acesso: 15 junho 2020.