



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Metodologia para Confecção de Mapas Potenciométricos em Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos: Estudo de Caso na Alta Bacia do Rio Corrente, Mambai, GO

Olavo Amancio de Oliveira¹, Drielly Souza Rodrigues², José Eloi Guimarães Campos³, Rogério Elias Soares Uagoda⁴

1. Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de Brasília. e-mail: olavotop@gmail.com. ORCID 0000-0003-0304-2700. 2. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. e-mail: driellysrodrigues@gmail.com. ORCID 0000-0001-7752-1400. 3. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. e-mail: eloi@unb.br. ORCID 0000-0003-2007-2223. 4. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de Brasília. e-mail: rogeriouagoda@unb.br. ORCID 0000-0002-9448-1313. *O artigo fará parte da tese de Doutorado do primeiro autor.

Artigo recebido em 24/04/2022 e aceito em 20/07/2022

RESUMO

O mapeamento da superfície potenciométrica em aquíferos cársticos e físsuro-cársticos, em muitos casos, pode ser complexo em função da anisotropia e heterogeneidade destes sistemas, que comumente ocorrem de forma compartimentada. O presente trabalho apresenta um método para a confecção de mapas de isopiezas em aquíferos hospedados em rochas carbonáticas, incluindo os seguintes passos: i) caracterização do modelo conceitual do aquífero e enquadramento das condições de contorno; ii) extração dos lineamentos estruturais regionais e locais; iii) avaliação dos dados potenciométricos pontuais e verificação de contrastes em poços situados em diferentes compartimentos; iv) interpolação dos dados de poços separadamente em cada compartimento e v) união dos diferentes blocos para recomposição da área original. O método foi testado em uma área de aquífero cárstico situada no alto curso da bacia do Rio Corrente na região nordeste do estado de Goiás. O produto final mostra diferentes comportamentos do fluxo hídrico subterrâneo quando se considera o mapa confeccionado como um sistema único e o mapa potenciométrico resultante da união dos diferentes blocos. Como resultado final da proposta, é possível afirmar que a confecção dos mapas a partir da separação dos blocos pode resultar em um produto mais coerente com a realidade e com maiores possibilidades de aplicação para os diferentes fins (estudo de divisores de bacias hidrogeológicas, comportamento de plumas de contaminação, direções regionais de fluxo etc.).

Palavras-chave: fluxo subterrâneo, carga hidráulica, interpolação.

Methodology for Drawing Potentiometric Maps in Karstic and Fissure-Karstic Aquifers: Case Study in the Upper Current River Basin, Mambai, GO

ABSTRACT

The mapping of the potentiometric surface in karstic and fissure-karstic aquifers, in many cases, can be complex due to the anisotropy and heterogeneity of these systems, which commonly occur compartmentally. The present work presents a method for the preparation of potentiometric maps in aquifers hosted in carbonate rocks, including the following steps: i) characterization of the conceptual model of the aquifer and framing of the boundary conditions; ii) extraction of regional and local structural lineaments; iii) evaluation of single point potentiometric data and verification of contrasts in wells located in different compartments; iv) interpolation of the well data separately in each compartment and v) union of the different blocks for composition of the original area. The method was tested in an area of karstic aquifer located in the high course of the Corrente River watershed in the northeastern region of Goiás State, Central Brazil. The final product shows different behaviors of the groundwater flow when considering the map made as a single system and the potentiometric map resulting from the union of the different blocks. As a final result of the proposal, it is possible to affirm that the mapping from the separation of blocks can result in a product more coherent with reality and with greater possibilities of application for the different purposes (study of hydrogeological basin dividers, behavior of contamination plumes, regional flow directions, etc.).

Keywords: groundwater flow, hydraulic head, interpolation.

Introdução

De acordo com o relatório das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos (UNESCO, 2018) a demanda mundial por água tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% ao ano na última década. Isso ocorre devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e às mudanças nos padrões de consumo.

Uma das questões hidrogeológicas mais importantes é o entendimento da origem da água, o caminho percorrido e o quanto desta permanece na bacia (Bowen et al., 2014). Dessa maneira, os aquíferos profundos ganharam importância significativa, pois são um recurso estratégico para mitigar a escassez da água.

Populações inteiras podem ser abastecidas por águas de aquíferos localizados em ambientes cársticos (Machiwal et al., 2018), como por exemplo o Aquífero da Flórida (EUA) com vazão de quase 40 mil m³/h (Ford e Williams, 2007) e a nascente Fíged (Síria) com descarga superior a 14 mil m³/h (Veni et al., 2001). No Brasil, poços construídos em aquíferos vinculados ao Grupo Bambuí podem fornecer vazões maiores que 200 m³/h (MME, 2009). O mesmo potencial é observado em reservatórios fissuro-cársticos, cuja relevância pode ser verificada nos inúmeros casos de abastecimento exclusivo ou complementar de núcleos urbanos, como, por exemplo: Paderborn, Alemanha; Burgundy, França; Cracóvia, Polônia; Sete Lagoas, MG; Lagoa Santa, MG e São Sebastião, DF.

Os mananciais cársticos apresentam espaços vazios compostos por cavidades e se desenvolvem em pacotes espessos e contínuos de rochas carbonáticas (Vieira et al., 2020). Os aquíferos fissuro-cársticos são reservatórios mistos representados por lentes carbonáticas associadas a rochas não carbonatadas (principalmente rochas pelíticas) que apresentam simultaneamente porosidade secundária planar e porosidade secundária por dissolução cárstica. Quando o carbonato é contínuo ou as lentes são muito espessas ou lateralmente amalgamadas (dezenas de metros de espessura e milhares de metros de extensão), os aquíferos devem ser tratados como sistemas fraturados e cársticos individuais (Fournillon et al., 2021).

O ambiente cárstico é marcado pelos processos de dissolução das rochas carbonáticas que entram em contato com a água. Estes processos ocorrem em subsuperfície, sempre atrelados à espeleogênese epigênica e hipogênica (Ferreira e Uagoda, 2019), que resulta ou não em formatos superficiais que se ramificam em uma grande

variedade de padrões tridimensionais em massas rochosas, que exercem influências sobre sua organização, extensão e forma (Klimchouk, 2015).

Em ambientes cársticos clássicos feições como dolinas, uvalas, trechos longos de cursos d'água subterrâneos, anfiteatros, espeleotemas são amplamente desenvolvidos (Zorn et al., 2020).

No meio fissuro-cárstico, essas feições são mais raramente observadas. A limitação do desenvolvimento de características cársticas é devida a descontinuidade das camadas e pacotes de rochas calcárias, tanto vertical quanto lateralmente, que limita o fluxo que é o responsável pela dissolução e consequente desenvolvimento da paisagem cárstica considerada mais clássica (Vieira et al., 2020).

Devido à grande importância dos recursos hídricos subterrâneos, o estudo sobre a variação espacial do nível potenciométrico, principalmente nos aquíferos cársticos e fissuro-cársticos, demandam modelos conceituais complexos que necessitam melhor enquadramento.

A potencimetria pode ser definida como a energia mensurável da água, que é responsável pelo seu movimento e fluxo no interior do aquífero (Denham et al., 2020). A partir da avaliação das linhas isopiezas, o fluxo percola de um ponto de carga hidráulica maior para um de menor potencial (Peralta e Kowalski, 1986; Roy e Zahid, 2021).

A superfície potenciométrica também pode ser compreendida como o posicionamento geométrico dos pontos que indicam a altura da carga hidráulica (nível) da água em um aquífero (Monteiro, 2003; Hölting e Coldewey, 2019). Neste sentido, mapas potenciométricos são entendidos como a representação gráfica das isolinhas, ou linhas equipotenciais de contorno do potencial hidráulico que permite conhecer o traçado das linhas de fluxo de água e seus divisores subterrâneos, que define, também, a representação da provável área de recarga e descarga do aquífero (Hölting e Coldewey, 2019; Alves & Aranha, 2021).

O aumento da demanda por água para abastecimento humano requer a introdução de políticas públicas especializadas para regular e monitorar o uso dos recursos hídricos (Herreira & Pizella, 2020). E dessa maneira, preservar os reservatórios, minimizar o risco de contaminação e evitar a sobreexploração.

O uso não racional dos recursos hídricos tem causado a sobreexploração dos mananciais, além de colocar em risco a sua sustentabilidade. Essa questão é verificada principalmente em ambientes cársticos e fissuro-cársticos, uma vez que são mais sensíveis e naturalmente vulneráveis,

tanto com relação às ações antrópicas quanto às mudanças naturais do meio ambiente (Machiwal et al., 2018).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo propor um método para cartografia da potenciométrica em aquíferos cársticos e fissuro-cárstico, em função da sua natureza compartimentada. É importante ressaltar que o método tradicional aplicado a aquíferos intergranulares não alcança resultados satisfatórios para sistemas cársticos e fissuro-cársticos devido à existência de blocos que funcionam como reservatórios subterrâneos independentes.

A poligonal estudada está vinculada ao aquífero cárstico no alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente. Para tanto, foi realizada a coleta e organização de dados de poços tubulares, que inclui nível estático e cota topográfica da superfície no local em que o poço está instalado.

A poligonal considerada para aplicação desta proposta é o alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Corrente que inclui os limites com o estado da Bahia e Minas Gerais (Figura 1).

Trata-se de uma sub-bacia da bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia, distante 500 km

da capital do estado (Goiânia), situada entre as coordenadas UTM N-8437036.72 e E-337995.14 e UTM N-8348008.44 e E-402031.23, meridiano central (-45°), fuso (23), localizada no nordeste de Goiás. Inclui parcialmente sete municípios goianos: Alvorada do Norte, Buritinópolis, Damianópolis, Mambai, Posse, Simolândia e Sítio D'Abadia.

A bacia do alto curso do Rio Corrente está inserida na região geomorfológica denominada Vão do Paraná e ocupa mais de 3.700 km² de extensão superficial. Dentro deste contexto, encontra-se a unidade de conservação Área de Proteção Ambiental Nascente do Rio Vermelho com 176.324,33 hectares.

A região estudada situa-se no contato entre o Cráton São Francisco e a Faixa Brasília, recobertos parcialmente por sedimentos fanerozoicos da Bacia Sanfranciscana (Uhlein, 1991; Uhlein et al., 2016). Na poligonal delimitada são reconhecidas as exposições de litofácies dos grupos Bambuí, areado 00e Urucuia, além de coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas e depósitos colúvio-eluviais (SIEG, 2021) (Figura 2A).

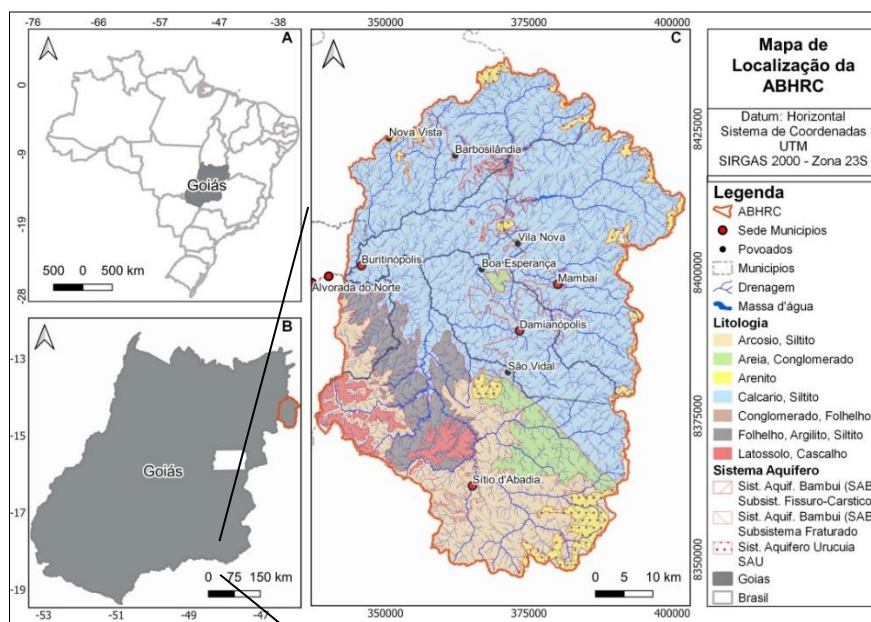


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. A direita observa-se a simplificação hidrogeológica e litológica da poligonal estudada, que foi baseada em dados do SIEG.

O Grupo Bambuí é caracterizado pelas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade, e Três Marias. A Formação Lagoa do Jacaré abrange a porção oeste e a área central da bacia, com cotas altimétricas entre 500-720 m (Figura 2C), caracterizada por calcarenitos, siltitos e margas (Dardenne, 1978). A Formação Serra da Saudade estende-se por parte do médio e

do baixo curso da bacia, com cotas entre 500-750 m (Figura 2C), representadas também por siltitos, argilitos, arenitos finos e raras camadas delgadas de calcários (Campos e Dardenne, 1997). A Formação Três Marias ocupa a faixa sul e oeste da bacia, entre cotas 750-1010 m (Figura 2C) constituídos por arcóseos, siltitos e folhelhos.

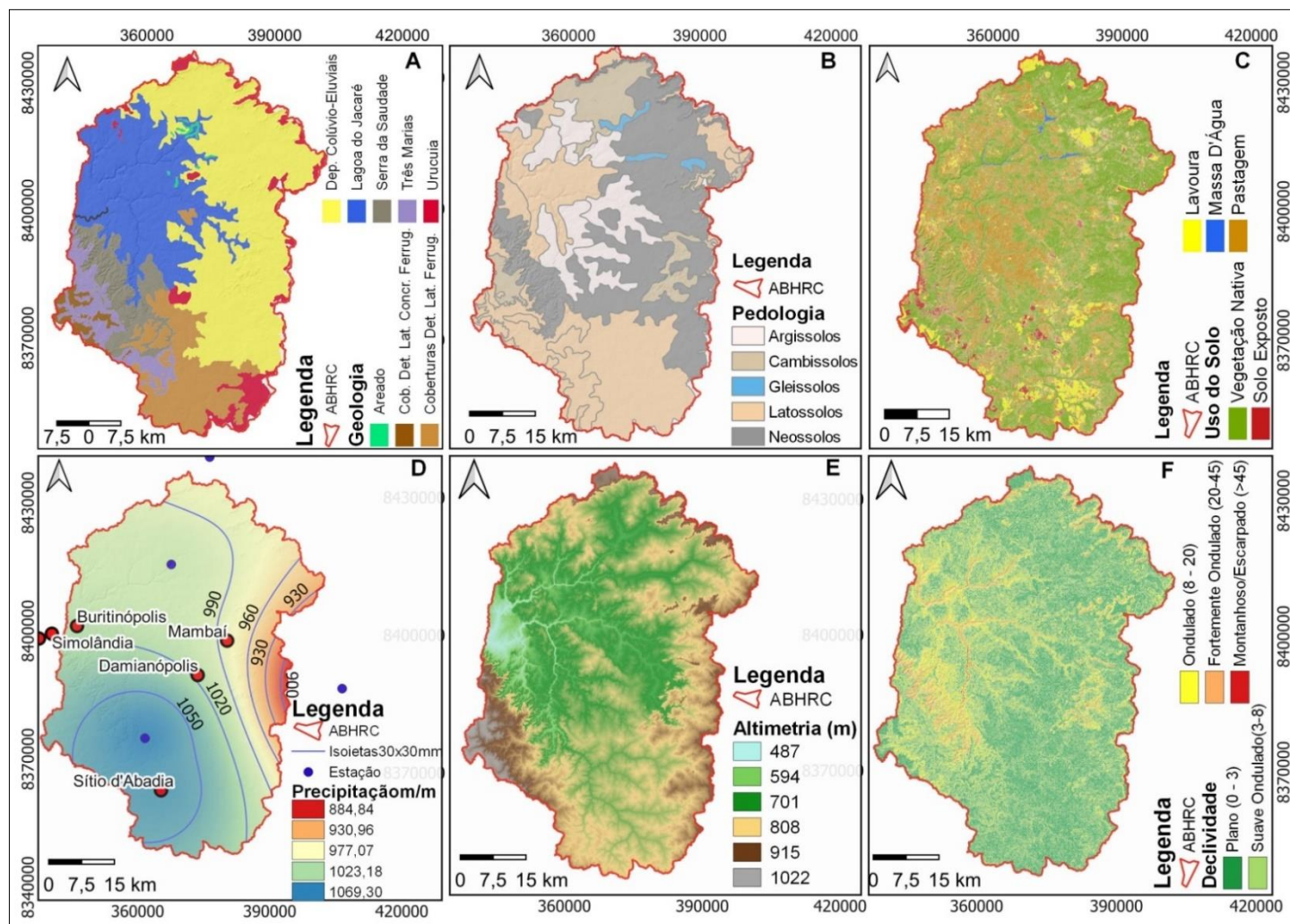


Figura 2 - (A) Mapa geológico; (B) Mapa pedológico; (C) Mapa de uso e ocupação do Solo; (D) Mapa de isoietas; (E) Mapa hipsométrico e (F) Mapa de declividade.

O Grupo Areado é verificado na faixa central e mais ao norte da bacia, depositado no Eocretáceo, constituído por rochas pelíticas, psamíticas e conglomerados (Campos e Dardenne, 1997).

O Grupo Urucuia situa-se no extremo leste compondo a divisa dos estados de Goiás, Bahia e Minas Gerais. É considerado de idade Neocretácea, sendo constituído por arenitos eólicos, arenitos fluviais e raras camadas de conglomerado e pelito.

Os depósitos coluvionares de idade cenozoica situam-se no leste e na faixa central até o extremo norte da bacia. São provenientes da parte mais elevada do relevo situado no oeste da Bahia, onde os arenitos do Grupo Urucuia ocorrem *in situ*. Os divisores de águas ou divisores topográficos se caracterizam como limites políticos entre os estados de Goiás e Bahia. Formam depósitos de areia, cascalho e argila logo abaixo das escarpas da Serra Geral (Campos e Dardenne, 1997).

As faixas de coberturas detrito-lateríticas ferruginosas são verificadas na porção sul da bacia e também na faixa central. De idade cenozoica, são formadas por sedimentos aluviais e se apresentam sob a forma de conglomerados, areias, argilas e lateritas pouco consolidadas ou inconsolidadas (Latrubesse et al., 2005).

Na poligonal utilizada para aplicação do método proposto para cartografia potenciométrica, predominam cinco classes de solos: Argissolo, Cambissolo, Gleissolo, Latossolo e Neossolo (Figura 2B). Os argissolos estão distribuídos pela faixa central da bacia, basicamente formados por material mineral, caracterizados pelo horizonte B textural (Bt), com argila de atividade baixa, ou atividade alta combinada com saturação de bases ou com caráter aluminico (Embrapa, 2013).

Os cambissolos são encontrados em pequenas porções na parte norte, leste e oeste da bacia. São solos jovens, composto por materiais minerais, bem drenados, álicos, pouco profundos e que se caracterizam pelo horizonte diagnóstico B incipiente (Bi).

Os gleissolos são solos minerais, hidromórficos, apresentam horizonte glei, com profundidades maiores que 0,50 cm e inferiores a 1,50 m. Periodicamente estes tipos de solos são saturados por água (Embrapa, 2013), na poligonal estão distribuídos entre a parte norte e leste da bacia.

Os neossolos estendem-se pela faixa central da bacia, logo abaixo da escarpa da Serra Geral de Goiás. São formados por material mineral ou material orgânico pouco espesso e não apresentam alterações consideráveis em relação ao

material originário devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos (Lepsch, 2016).

Os latossolos estão distribuídos em maior quantidade na parte sul e oeste da bacia, sendo encontrados também em pequenas porções na parte norte e leste da bacia. São constituídos por material mineral, apresentam horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer horizonte A. São solos com profundidades maiores que 2 m, com aspecto maciço, são macios quando secos e muito friáveis quando úmidos. Devido a suas características são susceptíveis a erosão, principalmente quando ocorrem junto a curso de água e nas bordas das chapadas (Lepsch, 2016).

O clima da região é característico de regiões savânicas, caracterizados por inverno seco que ocorre entre os meses de junho a setembro e verão úmido, com período chuvoso entre outubro a maio. A precipitação média varia de 884 mm/ano a 1.609,30 mm/ano (Figura 2D). A precipitação ocorre com maior intensidade no norte da bacia e na faixa central. As partes com menores taxas de precipitação situam-se no leste da bacia, limitado com o oeste do estado da Bahia.

A hipsometria é irregular com constantes e significativas variações altimétricas (Figura 2E), circundada pelo front da Serra Geral. As partes mais movimentadas do relevo situam-se junto à escarpa da serra, na região das nascentes do Rio Corrente e toda sua rede de drenagem.

O relevo é movimentado (Figura 2F) com superfície entalhada em função da densidade hidrográfica, densidade de drenagem (Figura 1C) e pela organização das vertentes do Rio Corrente e seus tributários.

Devido à movimentação do relevo (Figura 2F), há incidência de elevações abruptas na bacia. A amplitude altimétrica do relevo é bem significativa, com 535 m de variação, observada entre as partes mais baixas com 487 m e as porções mais elevadas com 1022 m, onde se situam os divisores de água, na Serra Geral de Goiás.

O relevo é constituído por unidades agradacionais, onde predominam as planícies fluviais, terraços e faixas aluviais. Há incidência também de unidades denudacionais com forte dissecação com relevos irregulares e movimentados e superfície de aplainamento, além de morros e colinas que ocorrem de forma isolada (Latrubesse et al., 2005).

O uso da terra (Figura 2C) é caracterizado por extensas áreas ocupadas por pastagens, lavouras, adensamentos urbanos, solos expostos e exploração mineral, principalmente calcário dolomítico.

A bacia do alto curso do Rio Corrente e a APA das Nascentes do Rio Vermelho situam-se no domínio morfoclimático do cerrado, com flora diversificada em fitofisionomias, controlada pelo relevo, clima e aspectos químicos e físicos do solo (Ab'Saber, 1977). Na poligonal encontram-se formações savânicas, cerrado ralo, formações campestres, grande área de mata seca e resquícios de campo rupestre (Ribeiro e Walter, 2008).

Materiais e métodos

Para o processamento dos dados com intuito de caracterizar a alta bacia do Rio Corrente e consequente elaboração dos *layouts*, foram utilizados os softwares QGIS 3.16.5 e ArcGIS 10.5 para delimitação e cartografia da área de estudo.

Foi utilizado o algoritmo ODR_Hidro, proposto por Oliveira et al., (2020), acessado através do terminal plataforma Python do QGIS 2.18.19 que processou os dados do satélite ALOS PALSAR com resolução de 12,5 metros para delimitação da bacia e extração da rede de drenagem e elementos geomorfométricos.

Os mapas geológico, pedológico e dos sistemas de aquíferos foram compilados a partir de dados baixados do Sistema Estadual de Geoinformação do estado de Goiás (SIEG) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Destes órgãos, também foram baixados dados de poços tubulares e dados hidrogeológicos.

O mapa de uso e ocupação do solo foi compilado através de imagens de satélites CBERS 4A, cenas 131 e 132 da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM). As imagens foram adquiridas gratuitamente pelo catálogo do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), e correspondem ao dia 24 de agosto de 2020.

As imagens da câmera WPM contam com cinco bandas, quatro das quais são multiespectrais, com resolução espacial de oito metros, e uma banda Pancromática de dois metros de resolução. As imagens foram agrupadas e fusionadas para extrair ao máximo da sua representação espacial, chegando a 2 m de resolução.

Posteriormente aplicou-se a classificação supervisionada com o classificador MAXVER (*Maximum Likelihood Classification*) e a partir desta classificação foram obtidas seis classes de uso e ocupação, representadas por: vegetação nativa, solo exposto, lavoura, pastagem e massa de água.

O mapa de isoietas foi elaborado a partir dos dados extraídos do site Hidroweb da Agência Nacional das Águas e Saneamento (ANA) com

base nas estações pluviométricas 1445005 - Coba 1446004; Sítio D'Abadia 1446008; Flor da Serra I 1446010 e PCH Riachão 1 com dados disponibilizados dos anos de 2015 a 2020.

Os mapas hipsométricos e de declividade foram elaborados utilizando o MDE Alos-Palsar. O mapa de lineamentos foi elaborado utilizando dados do SIEG e extração via MDE do Alos Palsar.

Os mapas potenciométricos foram elaborados a partir de dados dos poços tubulares existentes na área ou nas proximidades da área de estudo. Para a confecção do mapa foram utilizadas ferramentas de interpolação, respeitando a divisão da compartimentação do aquífero, previamente determinada.

Resultados

Proposta de método para a confecção de mapa potenciométrico

Um mapa potenciométrico é confeccionado a partir da interpolação de dados de um número significativo e distribuído de poços instalados em um aquífero. Por isso estes mapas são também denominados de mapas de isopiezas, por representarem a variação lateral da carga hidráulica em cada poço, expressa em linhas de mesma elevação da carga hidráulica.

Inicialmente para se determinar a carga hidráulica pontual e instantânea em cada poço deve-se subtrair a cota da superfície do terreno no local em que o poço está instalado da medida da superfície do terreno até o nível da água do poço.

Os dados a serem aplicado à confecção do mapa devem ser obtidos em um mesmo período, ou serem parte de um mesmo conjunto quando são utilizados dados de monitoramento de níveis. Isto significa que os mapas piezométricos representam o momento em que as medições foram realizadas e podem mudar no tempo, em função de bombeamentos prolongados, inversões de fluxo, ou mudanças nas condições de recarga dos aquíferos.

É fundamental que os perfis geológicos e construtivos dos poços em que as medidas são realizadas sejam conhecidos. A informação sobre os perfis dos poços é importante, pois o mapa piezométrico deve ser confeccionado para cada aquífero. Quando há aquíferos superpostos, a existência de seções de filtros nas diferentes unidades hidroestratigráficas pode resultar em uma carga hidráulica média, que não represente nenhum dos aquíferos interceptados.

Quando há aquíferos confinados, a cota medida no poço representa a carga hidráulica total, isto é, a carga por pressão mais a carga por elevação (Fetter, 1994). Em aquíferos livres a cota

medida é a própria carga por elevação, pois a carga por pressão no topo da zona saturada não existe.

Após realizar a avaliação e depuração dos dados, faz-se a interpolação com auxílio de um software específico (ArcGis, Surfer, Geosoft, entre outros).

Os procedimentos enumerados anteriormente são aplicados para aquíferos intergranulares e fraturados, os quais apresentam maior continuidade lateral e superfícies potenciométricas mais suaves e também contínuas.

Os aquíferos cársticos e fissuro-cársticos, por outro lado, por serem muito anisotrópicos e em muitos casos heterogêneos, não apresentam continuidade lateral, sendo comum a medição em campo de poços com carga hidráulica rasa, próximos a poços com carga profunda ou muito profunda.

As variações laterais da superfície potenciométrica em aquíferos associados a rochas carbonáticas são decorrentes da compartimentação lateral a que estes aquíferos podem estar vinculados. Os compartimentos são comumente associados a blocos falhados, mas também podem ser condicionados aos mecanismos de carstificação que podem causar o rebaixamento instantâneo do nível d'água em locais com elevada taxa de dissolução em comparação com porções pouco carstificadas.

Assim, para a confecção de mapas potenciométricos nestes aquíferos, os lineamentos estruturais regionais e locais devem ser traçados antes de se proceder a interpolação dos dados de níveis d'água dos poços. O traçado dos lineamentos deve priorizar cursos d'água retilíneos, mas também pode incluir quebras de relevo retilíneas, dolinas alongadas e alinhadas, cristas alongadas, dentre outras. A extração dos lineamentos estruturais pode ser feita sobre imagens impressas de forma analógica, mas é mais eficiente em formato digital diretamente em tela, pois permite a rápida mudança da escala de observação.

Após o traçado dos lineamentos em escala regional, deve-se ampliar a escala de observação no interior da área de interesse. Importante verificar se existe algum lineamento regional que adentra a área de interesse.

Em seguida, devem-se avaliar os dados potenciométricos pontuais para verificação de contrastes laterais em poços próximos, separados por algum lineamento levantado na etapa anterior. Caso seja confirmada a existência de blocos compartimentados o tratamento dos dados deverá ser realizado de forma independente em cada

bloco, em que o conjunto de dados deve ser separado em função do número e blocos considerados.

Para a confecção do mapa de isolinhas, deve-se escolher um interpolador adequado à natureza dos dados e à sua distribuição. Usualmente a Krigagem Ordinária tem sido utilizada para dados de natureza geológica e hidrogeológica, contudo, para dados com forte concentração espacial, outros interpoladores devem ser considerados. O método de interpolação pelo “vizinho mais próximo” também é uma opção que de forma geral alcança resultados adequados, principalmente para conjuntos de dados com distribuição espacial irregular.

Dada a facilidade alcançada pelos softwares disponíveis, os mapas podem ser confeccionados com diferentes interpoladores e o usuário poderá avaliar o melhor produto com comparação direta dos mapas resultantes.

Após a interpolação nos diferentes blocos, devem-se unir as porções para compor um mapa de toda a área de interesse, de forma a se obter o mapa potenciométrico e possibilitar suas diversas aplicações.

Quando a análise da compartimentação do aquífero cárstico ou fissuro-cárstico a partir do traçado dos lineamentos regionais não demonstra a existência de blocos individualizados, o fluxo metodológico proposto fica limitado aos passos tradicionais para aquíferos não cársticos. Isto é, deve-se apenas avaliar se o conjunto de dados representa a mesma unidade hidroestratigráfica e proceder com sua interpolação lateral.

Discussão

Os lineamentos obtidos a partir do SIEG, foram mesclados aos lineamentos estruturais extraídos do MDE Alos Palsar (Figura 3), o que possibilitou uma visão com características mais amplas da região. Observa-se que os grandes lineamentos que circundam a área (Figura 3B) têm alinhamentos gerais N60E, outros menores com direção geral NE/SE e ainda alinhamentos NW/SE.

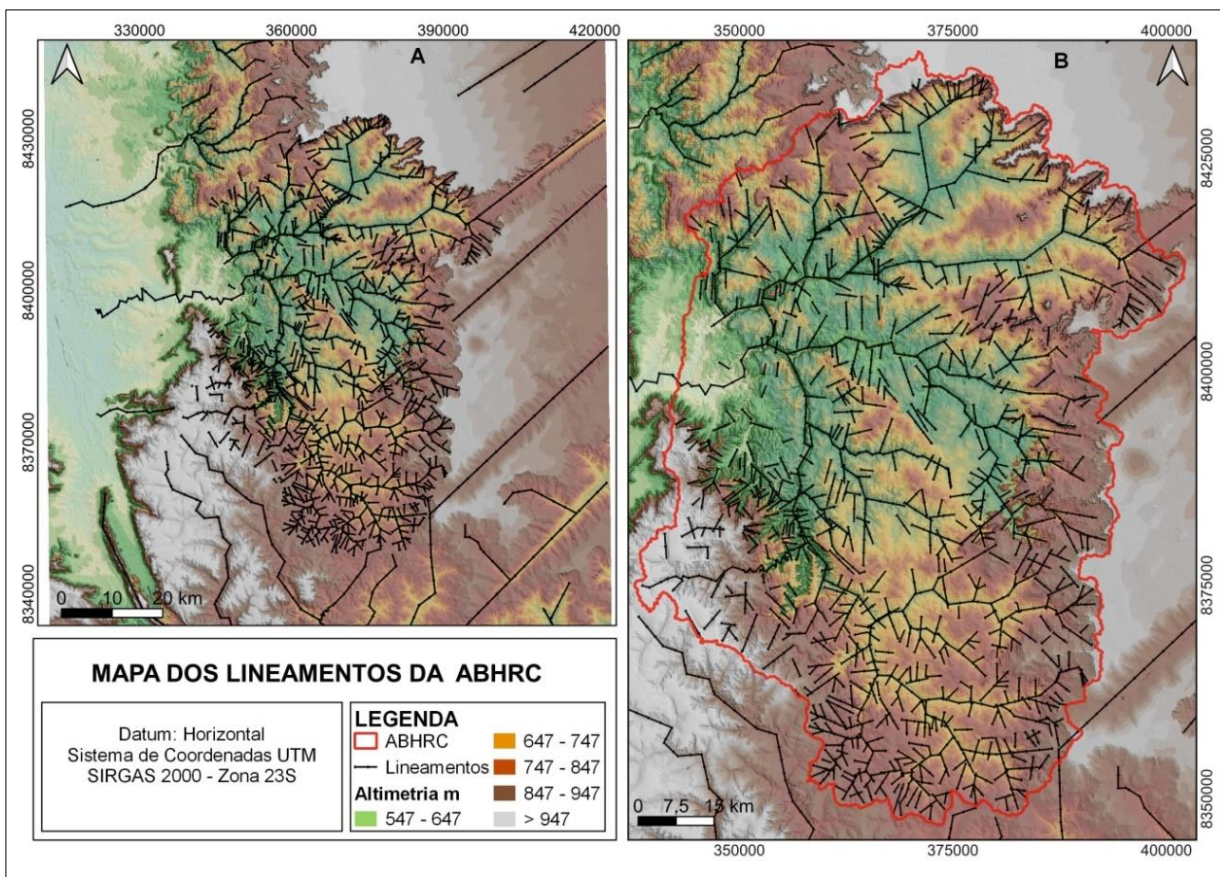


Figura 3 - (A) Representação de lineamentos estruturais regionais; (B) Representação de lineamentos da bacia do Alto Rio Corrente.

No interior da área da bacia do Alto Rio Corrente observam-se lineamentos em diferentes direções (Figura 3A), que caracteriza o relevo movimentado, o que corrobora com a grande densidade de drenagem presente na região, com relevo bastante dissecado. No entanto, há certa predominância dos alinhamentos de rumos SE/NW e NE/NW.

A análise da orientação dos lineamentos, utilizando a rede hidrográfica, tendo como referência os cursos de maior ordem, permitiu particionar a área de estudo em três compartimentos (Figura 4) para que seja efetuada de forma separada a análise da carga potenciométrica e o mapeamento do nível potenciométrico do aquífero cárstico na área do alto curso da bacia do Rio Corrente.

A compartimentação hidrogeológica em três blocos distintos na área da bacia (Figura 5), permite verificar com maior detalhe e percepção clara, tanto a direção do fluxo, quanto as linhas equipotenciais da zona saturada do aquífero cárstico. A Figura 5A evidencia quatro direções de fluxos, observando logicamente a direção preferencial do fluxo da água subterrânea das cotas mais elevadas para as mais baixas, tanto do relevo natural quanto do nível potenciométrico.

Tem-se claramente, a direção de fluxo a partir da cota potenciométrica 870 metros para a cota 720 metros, ou seja, partindo da direção leste rumo à direção central do bloco. Da mesma forma, há outro direcionamento do fluxo saindo do centro-oeste, cota potenciométrica 840 metros, indo também em direção a faixa central do bloco, onde está posicionada a cota potenciométrica 720 metros, ou seja, conduzindo a transmissão da água para um patamar mais baixo na porção norte deste bloco.

Há também outro direcionamento de fluxo que sai da mesma região centro-oeste, onde situa a cota potenciométrica 840 metros, rumo à direção noroeste, onde situa a cota potenciométrica 600 metros, ou seja, a cota potenciométrica mais baixa do bloco que representa o modelo de fluxo hidrogeológico da bacia.

No bloco sul, ainda se tem outro indicativo de fluxo que sai da parte norte, cuja cota potenciométrica mensurada é de 660 metros que vai em direção à cota 600 metros, localizada no noroeste do bloco, com clara indicação da parte mais baixa, evidenciando também a estratificação em diversos níveis equipotenciais e a localidade onde a água subterrânea provavelmente escoar para fora da bacia (Figura 5A).

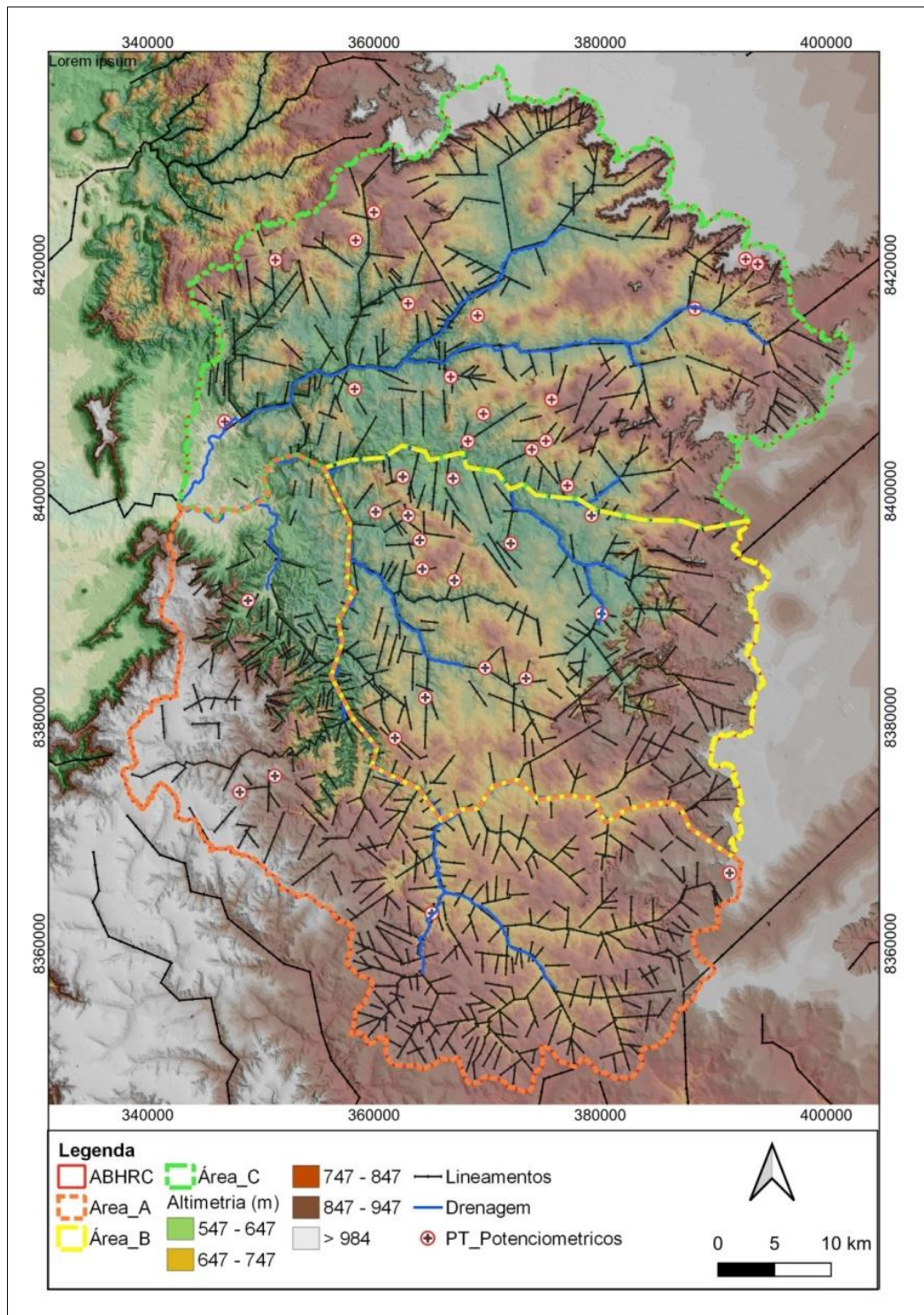


Figura 4 - Representação da compartimentação hipsométrica da bacia do alto curso do Rio Corrente.

Em relação à Figura 5B, nitidamente há indicação de apenas duas direções de fluxos, sendo uma direção saindo da parte sudoeste, onde situa a cota potenciométrica 750 metros para a faixa central do bloco hidrogeológico.

Da faixa central do bloco, há apenas uma única direção, ou seja, de leste para oeste, onde provavelmente a água subterrânea escoará para patamares com estratificação menos elevada,

podendo também ficar confinada nesta porção da bacia hidrogeológica.

A Figura 5C, demonstra a existência de apenas uma direção do fluxo, iniciando nas cotas potenciométricas mais alta 780 metros na parte leste do bloco hidrogeológico e direcionando para sudoeste. Há outra indicação de fluxo na parte noroeste e indo em direção oeste do bloco, onde situam as cotas potenciométricas de menores altitudes.

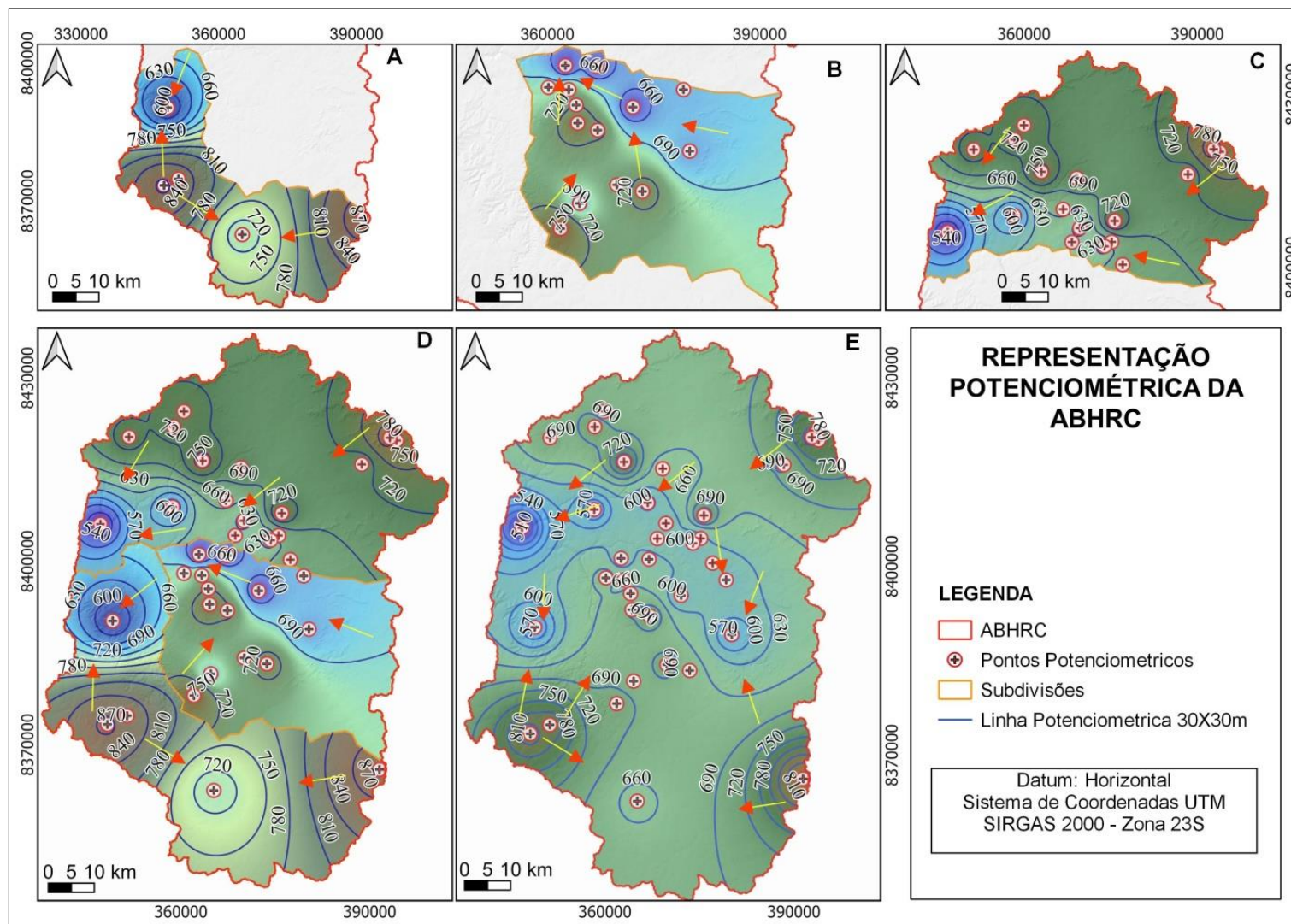


Figura 5 - (A) Bloco Sul; (B) Bloco central; (C) Bloco norte; (D) Mapa potenciométrico da junção dos 3 blocos; (E) Mapa potenciométrico generalizado, confeccionado a partir da premissa de que o sistema seja um único bloco.

Ha também uma estratificação dos níveis equipotenciais, que indica mais uma vez que se trata de um relevo movimentado. Suas características são refletidas também na parte hidrogeológica, onde as cotas potenciométricas da porção mais elevada da bacia rumam em direção oeste, onde situam as cotas topográficas e potenciométricas de baixas altitudes (Figura 5C). Isso indica visivelmente tratar-se neste bloco de aquífero livre que possivelmente irá desaguar em outro nível de base regional com cotas inferiores.

A união das Figuras 5A, 5B e 5C gera a Figura 5D, onde as características hidrogeológicas e litológicas da área estudada representam uma possível divisão do aquífero cárstico da bacia em dois blocos que são, evidentemente, observados nas Figuras 4 e 5D, sendo um situado na margem direita do Rio Corrente, e outro localizado na margem esquerda do rio.

A camada do aquífero situado na margem esquerda do rio apresenta duas regiões com relevo mais elevado, fazendo com que o nível potenciométrico também inicie em cotas potenciométricas mais altas.

A cota potenciométrica 870 metros é a mais elevada e situa em duas regiões, uma ao sudeste e outra ao sudoeste. A cota do sudeste escoa para a região do centro sul, assim como uma das direções do fluxo da água subterrânea da região sudoeste, também escoa para o centro sul da bacia, indicando a possibilidade de um aquífero confinado, ou semiconfinado. Logicamente estas características refletem o entalhamento vertical do Rio Corrente.

Na região sudoeste, onde situa a cota potenciométrica de 870 metros, é observado que há um direcionamento do fluxo em direção noroeste, cuja cota potenciométrica mensurada é de 600 metros, e se localiza antes de chegar ao Rio Corrente, sendo está a parte menos elevada da superfície potenciométrica. Nesta parte da bacia, observando para jusante, é possível verificar uma convergência do relevo (Figura 4), ou seja, nesta região à aproximação do relevo da parte sul com o relevo da parte norte, separando as duas margens do Rio Corrente, o que indica ser um provável ponto de descarga ou a junção dos aquíferos que possivelmente foram separados pelo entalhamento do Rio Corrente.

No tocante, a parte do aquífero situado à margem esquerda do Rio Corrente, a superfície potenciométrica representada pelas curvas equipotenciais, indicam que o escoamento vai em direção a faixa central da bacia e, então as águas subterrâneas deste aquífero, escoam para a sua jusante, ou seja, para a região oeste, onde

predominam as cotas potenciométricas de menor elevação.

A Figura 5E representa a superfície potenciométrica da bacia confeccionada sem a consideração da compartimentação do aquífero, ou seja, sem a subdivisão da bacia em blocos. Neste sentido, como os pontos potenciométricos não têm uma geoespacialização mais homogênea, trata-se de uma representação da direção do fluxo em linha geral.

Mesmo sem a consideração da possível subdivisão do aquífero, as cotas da superfície potenciométrica indicam uma compartimentação hidrogeológica do aquífero. É preciso destacar também que a área em estudo se situa em uma zona de transição do Sistema Aquífero Urucuaia para o Sistema Aquífero Bambuí, segundo Almeida et al., (2006) (Figura 1C). Neste sentido, ao observar as cotas e a superfície potenciométrica (Figura 5E), percebe-se nitidamente a possibilidade de se tratar de um sistema com diferentes aquíferos, confinado ou semiconfinado e livre.

O aquífero com tendências de confinamento é situado na região norte da bacia, cuja cota potenciométrica mensurada é de 660 metros, o que indica ser ali a parte mais rasa do aquífero, o que pode ser também um possível ponto de descarga ou um aquífero confinado.

O outro aquífero com tendência de confinamento indicado na Figura 5E localiza-se na região centro leste, com cota potenciométrica de 570 metros.

Não há indicação da interligação dos dois aquíferos, visto que o aquífero situado em cota potenciométrica de 660 metros não escoa para o aquífero de cota inferior (570 metros), tendo em vista em seu caminho existir uma superfície potenciométrica de maior altitude, representada pela curva equipotencial com nível de 690 metros.

Da mesma forma, não há indicativo da interligação do aquífero com tendências a confinamento representado na cota 570 metros com o aquífero livre, cuja cota mais baixa é de 510 metros.

Conclusões

Aquíferos cársticos e físsuro-cársticos em função de sua natureza fortemente anisotrópica e heterogênea podem ter superfícies potenciométricas truncadas lateralmente, compondo compartimentos de fluxos hidrogeológicos ou fluxos hidrogeológicos condicionados a blocos delimitados por lineamentos estruturais regionais ou locais.

A proposta para confecção de mapas potenciométricos nestes aquíferos considera, além

das técnicas tradicionalmente aplicadas aos aquíferos intergranulares e fraturados, a inclusão da análise dos lineamentos estruturais e a avaliação e depuração dos dados dos poços de forma individual ou em pequenos conjuntos. Para os casos em que seja verificada a presença de blocos, com cargas hidráulicas contrastantes a pequenas distâncias, a interpolação deverá ser realizada de forma independente para cada bloco.

A confecção de um mapa potenciométrico representativo das variações laterais das cargas hidráulicas de um aquífero é importante: para corroborar o modelo conceitual do aquífero (se livre ou confinado); para estudos de migração de plumas de contaminação; para a determinação das áreas de recarga e descarga e outras aplicações relativas à gestão dos aquíferos.

O estudo de caso utilizado no presente trabalho comprova que áreas de aquíferos cársticos podem ser compartimentadas, resultando em complexidade da potencimetria e que o método proposto é factível e aplicável com resultados reais em diferentes escalas de mapeamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNB (Universidade de Brasília) que forneceu uma estrutura adequada para a realização da pesquisa, além da Capes, ICMBIO e CECAV, que tem trabalhado em parceria com os autores via Laboratório de Geografia Física e do Instituto de Geociências da UNB, para a realização de diversos trabalhos.

Referências

- Ab'Saber, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. São Paulo: Instituto de Geografia – USP.
- Almeida, L.; Resende, L.; Rodrigues, A.P.; Campos, J.E.G. 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Superintendência de Geologia e Mineração, Governo de Estado de Goiás. 230p.
- Alves, M., Galvão, P., & Aranha, P. (2021). Karst hydrogeological controls and anthropic effects in an urban lake. *Journal of Hydrology*, 593, 125830.
- Bowen, G.J., Cai, Z., Fiorella, R.P., Putman, A.L. 2019. Isotopes in the water cycle: regional-to global-scale patterns and applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47, 453-479.
- Campos, J.E.G., Dardenne, M.A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(3), 269-282.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. 30º Cong. Bras. Geol., São Paulo, SP, 2, 568-610.
- Denham, M. E., Amidon, M. B., Wainwright, H. M., Dafflon, B., Ajo-Franklin, J., & Eddy-Dilek, C. A. (2020). Improving Long-term Monitoring of Contaminated Groundwater at Sites where Attenuation-based Remedies are Deployed. *Environmental Management*, 66(6), 1142-1161.
- Embrapa. S.B.C.S. 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro.
- Ferreira, C.F., Uagoda, R.E.S. 2019. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos de Geografia*, 20(70):519-537.
- Fetter, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 4th Edition. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 598p.
- Ford, D.C., Williams, P.W. 2007. *Karst Hydrology and Geomorphology*. John Wiley and Sons Ltd.
- Fournillon, A., Fournier, F., & Vidal, O. (2021). Seismic expression of carbonate build-up karstification: karst modelling strategies and insights from synthetic seismic. *Geological Society, London, Special Publications*, 509(1), 227-248.
- Herreira, B. N., & Pizella, D. G. (2020). Gestão Da Qualidade Hídrica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Tietê (Sp): Dificuldades Para O Enquadramento Das Águas Doces Superficiais. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 9(2), 332-355.
- Hölting, B., Coldewey, W.G. 2019. Groundwater Morphology. In *Hydrogeology*. p. 55-61. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Klimchouk, A.B. 2015. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta carsologica*, 44(3).
- Latrubesse, E.M., Carvalho, T.M., Stevaux, J.C. 2005. Mapa geomorfológico do estado de Goiás. Série Geologia e Mineração. Secretaria de Indústria e Comércio, Superintendência de Geologia e Mineração-Goiás. Goiânia.
- Lepsch, I.F. 2016. Formação e conservação dos solos. Oficina de textos. 2ª Edição. 216p.
- Machiwal, D., J.H.A, M.K., Singh, V.P., Mohan, C. 2018. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, 185, 901-927.

- Ministério de Minas e Energia – MME. 2009. Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país. Recife: MME.
- Monteiro, R.C. 2003. Estimativa espaço temporal da superfície potenciométrica do sistema aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista,
- Oliveira, O.A., Souza Bias, E., Steinke, V.A., Sousa, R.B., Passo, D.P., Baptista, G.M.M., Pereira Filho, W. 2020. Análise de técnicas de segmentação para melhoria na obtenção de dados geomorfológicos com base em ferramentas Open Source. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(4).
- Parise, M., Gabrovsek, F., Kaufmann, G., Ravbar, N. 2018. Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), 1-24.
- Peralta, R.C., Kowalski, K.G. 1986. Optimizing the rapid evolution of target groundwater potentiometric surfaces. *Transactions of the ASAE*, 29(4):940-0947.
- Ribeiro, J.F., Walter, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: *Cerrado, ecologia e flora*, 1, 151-212.
- Roy, S.K., Zahid, A. 2021. Assessment of declining groundwater levels due to excessive pumping in the Dhaka District of Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 80(8):1-11.
- SIEG. Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. 2021. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.
- Uhlein, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo).
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Halverson, G.P., Stevenson, R., Caxito, F.A., Cox, G.M., Carvalho, J.F. 2016. The Carrancas Formation Bambuí Group: a record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 71:1-16. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jsames.2016.06.009>.
- UNESCO. (2018) United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature- based solutions for water. World Water Assessment Program. Colombella, Purugia, Italy. 2018. p.1-12.
- Veni, G.H., Duchene, N.C., Crawford, C.G., Groves, G.H. Huppert, E.H., Kastning, R., Olson, B.J. Wheeler. 2001. Living with karst: a fragile foundation. Environmental Awareness Series 4. American Geological Institute, Alexandria, Virginia.
- Vieira, L. C. M., Velásquez, L. N. M., Dussin, T. M., & Borba, R. P. (2020). Caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos da região da apa carste de lagoa santa, mg. *Geosciences= Geociências*, 39(04), 1087-1105.
- Vieira, L.C.M., Velasquez, L.N.M., Borba, R.P. 2020. Hidrogeoquímica como ferramenta para o reconhecimento de aquíferos em lacunas de perfis litológicos de poços tubulares. *Águas Subterrâneas*, 34(2):204-220.
- Zorn, M., Ferk, M., Lipar, M., Komac, B., Tičar, J., & Hrvatin, M. (2020). Landforms of Slovenia. In *The Geography of Slovenia* (pp. 35-57). Springer, Cham.