



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Avaliação da Potenciometria e Identificação de Divisores Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Urucuia Central com uso de Interpolação por Krigagem

Luis Gomes Carvalho^{1,3}, José Eloi Guimarães Campos² e Elias Isler³

¹Doutorando no Programa DINTER-UnB-UFOB da Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil, luisgc@ufob.edu.br (autor correspondente). ²Professor na Pós-Graduação no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília (DF), Brasil, eloi@unb.br. ³Professor no Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias da Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB, Barreiras (BA), Brasil, elias.isler@ufob.edu.br.

Artigo recebido em 29/04/2022 e aceito em 16/11/2022

RESUMO

O Sistema Aquífero Urucuia Central, situado no oeste do estado da Bahia, integra a região norte da Bacia Sanfranciscana cujos limites hidrogeológicos são definidos por altos estruturais. Devido à dinâmica morfotectônica, os divisores hidrográficos nem sempre se sobrepõem exatamente aos hidrogeológicos, dificultando a delimitação das sub-bacias hidrogeológicas. Neste trabalho foi realizada a identificação de divisores hidrogeológicos a partir de mapa potenciométrico gerado com a aplicação de interpolação por Krigagem Ordinária. O mapa potenciométrico é composto por amostra de 4.126 pontos distribuídos entre 1.029 níveis estáticos de poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), 751 nascentes e 2.346 pontos de drenagens obtidos remotamente no Google Earth Pro, e a altimetria unificada no Modelo Digital de Elevação (MDE) das imagens Alos Palsar. No mapa potenciométrico foi possível identificar quatro divisores hidrogeológicos: *i*) Divisor Hidrogeológico Oeste (Bahia/Goiás/Tocantins); *ii*) Divisor Hidrogeológico Norte (Luís Eduardo Magalhães/Riachão Neves); *iii*) Divisor Hidrogeológico Central ou Alto do Rio Grande (São Domingos/Wanderley); e *iv*) Divisor Hidrogeológico Sul (Mambai/Coribe). A distribuição destes divisores contorna as bordas do núcleo cratônico do Bloco Correntina, as quais são definidas por elevações geradas pelas faixas móveis e reativações tectônicas, o que valida os modelos consolidados pela literatura e auxilia na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. As ocorrências destes divisores hidrogeológicos impactam no conceito da potenciometria decrescente predominante para leste e cria o conceito de sub-bacias hidrogeológicas com fluxo divergente seguindo parcialmente o fluxo dos maiores corpos hídricos de expressão regional.

Palavras-Chave: Geoestatística, Bacia Sanfranciscana, Mapa Potenciométrico, Modelo Digital de Elevação, Morfotectônica.

Evaluation of Potentiometry and Identification of Hydrogeological Divisions of the Central Urucuia Aquifer System Using Kriging Interpolation

ABSTRACT

The Central Urucuia Aquifer System located in the west of the Bahia state, integrates the northern region of the Sanfranciscana Basin whose hydrogeological limits are defined by structural highs. However, due to morphotectonic dynamics, hydrographic dividers do not overlap exactly with hydrogeological scans, making difficult to delimit of the hydrogeological sub-basins. In this work, the identification of hydrogeological dividers was performed from a potentiometric map generated with the interpolation by Ordinary Kriging. The potentiometric map consisted of 4,126 points distributed among 1,029 static levels of deep wells from the Groundwater Database System (SIAGAS), 751 springs and 2,346 drainage points identified remotely in the Google Earth Pro, and the altimetric was unified to the Elevation Digital Model (EDM) from the Alos Palsar images. By the potentiometric map it was possible to identify four hydrogeological dividers: *i*) Western Hydrogeological Divider (Bahia/Goiás/Tocantins); *ii*) Northern Hydrogeological Divider (Luís Eduardo Magalhães/Riachão Neves); *iii*) Central Hydrogeological Divider or Alto do Rio Grande (São Domingos/Wanderley); and *iv*) Southern Hydrogeological Divider (Mambai/Coribe). The distribution of these dividers skirts the edges of the chronic nucleus of the Correntina Block defined by the elevations generated by the riding of mobile tracks and tectonic reactivations, which validates models consolidated by the literature and assists in the management of underground water resources. The occurrences of these hydrogeological dividers impact on the concept of decreasing potentiometry prevailing to the east and create the concept of hydrogeological sub-basins with divergent flow patterns partially following the pathway of the largest water bodies of regional expression.

Keywords: Geostatistics, Sanfranciscana Basin, Potentiometric Map, Digital Elevation Model, Morphotectonics.

Introdução

O Sistema Aquífero Urucuia representa um importante aquífero do Brasil, com área de 126.467 km² dos quais 65% encontram-se inseridos no oeste do estado da Bahia (ANA, 2017b; Gaspar et al., 2012; Gaspar e Campos, 2007). A região de sua abrangência apresenta forte desenvolvimento econômico impulsionado pela expansão das atividades agrícolas, cuja manutenção depende em grande parte das águas superficiais e subterrâneas para a irrigação, fato que tem intensificado os registros de conflitos entre o agronegócio, entidades ambientalistas e comunidades rurais. Neste sentido, a definição dos divisores hidrogeológicos e a delimitação das sub-bacias hidrogeológicas são importantes e contribuem para a gestão integrada dos recursos hídricos.

A sub-Bacia Urucuia que contém o aquífero homônimo estende-se do extremo sul do Maranhão e Piauí até a borda noroeste do vale do Rio São Francisco, na vertente sudeste do Alto de Januária, em Minas Gerais (Carvalhos, 2022) (no prelo). A delimitação do Sistema Aquífero Urucuia em sub-bacias hidrogeológicas permite a melhor gestão conjunta dos recursos hídricos interestadual de interesse direto dos estados de Minas Gerais, Bahia, Tocantins, Goiás e Piauí; maior controle dos volumes sustentáveis outorgados nas captações superficiais e subterrâneas; favorece o direcionamento de estudos de vulnerabilidade (ex.: compactação superficial, depleção, contaminação e poluição), visando ao estabelecimento de áreas de ocupação e de proteção (Arraes e Campos, 2008, 2010).

Trabalhos realizados no Aquífero Urucuia atestam a existência de um extenso divisor hidrogeológico situado nos limites dos estados da Bahia e Tocantins/Goiás, referindo-se a este, como um alto morfotectônico curvilíneo de direção norte-sul paralelo aos limites geopolíticos (Gaspar, 2006; Junior e Lima, 2007; Arraes e Campos, 2008; ANA, 2017b; Silva e Chang, 2018; Mantovani et al., 2019). Entretanto, este divisor não é simétrico aos divisores hidrográficos, e em alguns casos, a direção do fluxo subterrâneo é oposta ao fluxo superficial (Junior e Lima, 2007; Arraes e Campos, 2008; Silva e Chang, 2018), o que dificulta a identificação dos divisores hidrogeológicos reconhecidos como delimitadores de sub-bacias hidrogeológicas.

Os divisores hidrogeológicos podem ser identificados pela aplicação de métodos diretos e indiretos, como o emprego de mapas potenciométricos, mapeamento de estruturas

geológicas, mapeamento hidroquímico, emprego de geoprocessamento, sensoriamento remoto e geofísica (Orr e Dutton, 1983; Arraes e Campos, 2008; Cockrell et al., 2020; Mutua et al., 2020).

Os mapas potenciométricos são indispensáveis para as investigações hidrogeológicas, sendo empregados na indicação das direções de fluxo, na identificação e delimitação de divisores de sub-bacias hidrogeológicas, na identificação das áreas de recarga e descarga, na correlação e interação das águas superficiais com as subterrâneas e na avaliação dos impactos naturais e antrópicos que afetam o aquífero (Desbarats et al., 2002).

Dentro da área de grande abrangência geográfica do Aquífero Urucuia, a distribuição dos poços tubulares, de poços de monitoramento e de captação de águas superficiais não segue um padrão regular devido aos seguintes fatores: baixa densidade da rede de drenagem, baixa densidade populacional, cobertura desigual de rede elétrica de alta tensão, e distanciamento mínimo estabelecidos em lei no estado da Bahia entre poços e entre poços e captações superficiais outorgados (INEMA, 2022). Essa distribuição irregular dos pontos fontes de dados potenciométricos, com regiões densamente agrupadas e outras não amostradas, reflete em lacunas significativas que resultam no nível de incerteza da informação e precisam ser avaliados com base em um modelo probabilístico de distribuição, considerando a semelhança de proximidade (Yamamoto e Landim, 2013).

Assim, recorre-se às ferramentas da geoestatística para proceder à estimação (ou interpolação) de valores representativos de pontos não amostrados, formando uma malha regular dentro de um domínio pré-estabelecido, mediante a quantificação das variâncias entre os pontos amostrados. Essa distribuição define os alcances de dependência espacial entre pontos, considerando os melhores ajustes matemáticos (correlação) aos pontos proximais ou ao conjunto (Webster e Oliver, 2008). Dentro da geoestatística, a krigagem é o estimador que melhor fornece o entendimento da aparente aleatoriedade dos dados observados pelas variâncias, mas que intrinsecamente possuam uma função de correlação espacial (Yamamoto e Landim, 2013).

No caso do aquífero em estudo, a premissa da semelhança de proximidade (Webster e Oliver, 2008) pode não ser plenamente satisfeita devido ao arcabouço estrutural decorrente do processo de silicificação responsável pela geração de um “esqueleto arborescente”. Este arcabouço estabelece camadas impermeáveis completamente

seladas pelo alto grau de silicificação (aquifugo) e camadas que apresentam comportamento semipermeável (aquitarde), de abrangência regional ou local, contínuas ou fraturadas. Esta diversidade deu origem aos subsistemas aquíferos: livre, semiconfinado e confinado (Campos e Dardenne, 1997b; Lima, 2007; Gaspar, Campos e Moraes, 2012; Janoni, 2017).

A ampla distribuição de camadas silicificadas no interior dos sedimentos do Grupo Urucuia é confirmada em afloramentos, nas descrições dos poços profundos, na literatura e em relatos de perfuradores. Esta feição impõe ao aquífero comportamento hidrogeológico diversificado, atribuindo-lhe caráter de ampla porosidade primária e localmente secundária relacionada ao intenso faturamento das porções silicificadas provocadas por reativações neotectônicas, principalmente àquelas situadas sob a influência da Zona de Cisalhamento da Faixa Rio Preto (Caxito et al., 2014; Carvalho, 2022).

Considerando as particularidades apresentadas pelo Sistema Aquífero Urucuia, quais sejam: abrangência regional, heterogeneidades hidroestratigráficas e ocorrência de áreas densamente amostradas e outras não amostradas; o emprego da Krigagem Ordinária na geração do modelo potenciométrico se justifica pela robustez da técnica e confiabilidade dos resultados já consagrados na literatura (Neuman e Jacobson, 1984; Isaaks e Srivastava, 1989; Cigagna et al., 2015; Tabandeh, Kholghi e Hosseini, 2021).

Portanto, este trabalho tem como objetivo a identificação e delimitação de divisores hidrogeológicos no interior da porção central do Sistema Aquífero Urucuia que engloba dez bacias hidrográficas tributárias dos rios Grande, Corrente e Arrojado situadas no centro-norte da Bacia Sanfranciscana, com base no padrão divergente das curvas equipotenciais de um mapa potenciométrico elaborado por Krigagem Ordinária em um sistema de informação geográfica, apoiado em dados geofísicos (gravimetria, sondagem elétrica vertical), e associá-los à morfotectônica, para contribuir para a gestão dos recursos hídricos desse

importante aquífero.

Material e Métodos

Caracterização da área de ocorrência do Sistema Aquífero Urucuia Central

O Sistema Aquífero Urucuia representa um importante aquífero do Brasil, recobrimdo uma área de 126.467 km², da qual 65% encontram-se inseridas na região Oeste do Estado da Bahia (ANA, 2017b; Gaspar et al., 2012; Gaspar e Campos, 2007). A sub-Bacia Urucuia atualmente estende-se do extremo sul do Maranhão e Piauí nas imediações do Lineamento Transbrasiliiano (LTB) (Santos, 2017), onde recobre sedimentos da Bacia Sedimentar do Parnaíba, até a borda noroeste do vale do Rio São Francisco na vertente sudeste do Alto de Januária, em Minas Gerais (Carvalho, 2022) (no prelo). Ao oeste segue pela Serra Geral de Goiás ou Chapadão Ocidental da Bahia (Valadão, 1998), mantendo certo paralelismo com o Sistema Orogênico Brasília do nordeste de Goiás até o sudeste de Tocantins. Ao leste segue por contorno irregular passando por Gilbués e Corrente no Piauí, transpõe a Faixa Rio Preto passa pelas cidades de Formosa do Rio Preto, Barreiras, Wanderley e Correntina na Bahia, além de Montalvânia e Januária no vale do Rio São Francisco em Minas Gerais (ANA, 2017a).

A porção central do Sistema Aquífero Urucuia, com 53.844 km² integra a sub-Bacia Urucuia localizada na Bacia Sanfranciscana e engloba dez bacias hidrográficas de nível 4 definidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) tributárias dos rios Grande, Corrente e Arrojado, empregadas como os limites geográficos da área de estudo (Figura 1). Nesta região encontram-se os maiores aglomerados urbanos do oeste baiano e os municípios com os mais elevados Produtos Internos Brutos advindos do agronegócio (SEAGRI, 2020), consequentemente o maior número de captações de águas subterrâneas e superficiais empregadas no abastecimento humano, na irrigação, na indústria e na dessedentação animal.

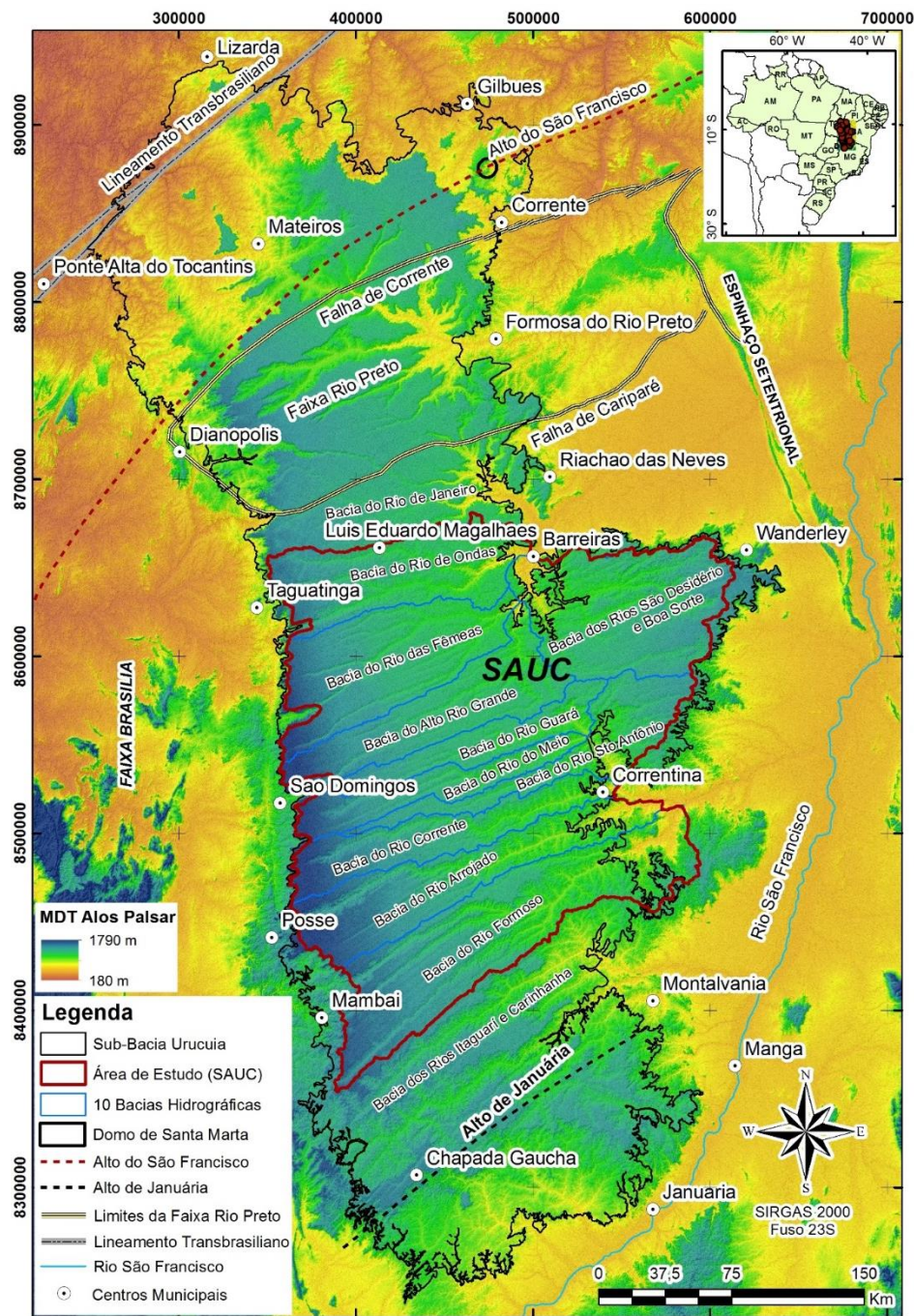


Figura 1. Limites da sub-Bacia Urucuia (ANA, 2017a; Campos e Dardenne, 1997a) e do Sistema Aquífero Urucuia Central (SAUC) definidos por dez bacias hidrográficas de nível 4 sobre Imagem Alos Palsar. Os altos estruturais delimitam as sub-bacias (Modificado, 2022).

A sub-Bacia Urucuia é composta por coberturas arenosas inconsolidadas da Formação Chapadão que recobrem rochas do Grupo Urucuia, arenitos flúvio-eólicos das formações Serra das Araras e Posse e rochas do Grupo Areado (Campos e Dardenne, 1997a). Estes sedimentos foram depositados em discordância erosiva sobre rochas do Grupo Balsas da Bacia Sedimentar do Parnaíba, formações Motuca (Permiano) na porção central, e Sambaíba (Triássico) nas porções norte e central (Kiang e Silva, 2015); sobre rochas da Faixa Rio Preto a nordeste (Egydio-Silva, 1987) e sobre

rochas neoproterozoicas do Grupo Bambuí (Gaspar, 2006; Iglesias e Uhlein, 2009) nos extremos oeste, leste e sul e ao longo de toda a extensão do Alto do Rio Grande.

No Ediacariano a colisão do Bloco Cristalândia do Piauí com o noroeste do Cráton do São Francisco deu origem a bacia de antepaís, que ocupa a porção norte da Bacia Sanfranciscana, a sub-Bacia Urucuia, caracterizada por Carvalho (2022) segundo os critérios estabelecidos em DeCelles e Currie (1996) e DeCelles e Giles (1996).

Segundo Carvalho (2022), dentre as feições de “*Foreland Basin*” registradas em mapa gravimétrico da ANA (2017a), destacam-se o Baixo do Jalapão como uma “*Forearc Basin*” recortada longitudinalmente pela Zona de Falha do Lineamento Transbrasiliano (NE-SW) e posicionado a norte do Bloco Cristalândia do Piauí cujas reativações *uplift* deram origem ao Alto do São Francisco (Almeida et al., 1977). A Faixa Rio Preto (Alkmim, 2004; Barbosa et al., 2003; Egydio-Silva, 1987; Heilbron et al., 2017a) identificada como o “*Wedge-Top*”; e o depocentro posicionado nas imediações da Cidade de Luís Eduardo Magalhães (Pereira et al., 2015) como o “*Foredeep*”. O Alto do Rio Grande como o “*Forebulge*” situado a noroeste do Bloco Correntina (Holz et al., 2014), e ao sul o “*Backbulge*” na imediações do baixo de Montalvânia (Martínez, 2007; Leite, Dias e Costa, 2017) posicionado a norte do Alto do Januária (Figura 1).

O avanço para sudeste do processo tectônico compressional deflagrado no Ediacariano fez com que rochas do Grupo Bambuí cavalgassem sobre o Bloco Correntina situado na porção central do Cráton São Francisco (Heilbron, Cordani e Alkmim, 2017) gerando encurtamento crustal marcado por dobras e nappes associadas a falhas de baixo e alto ângulos com vergência para SSE (Egydio-Silva, 1987; Uhlein et al., 2011; Caxito e Uhlein, 2013). Essas estruturas sofreram severas reativações tectônicas entre o Mioceno Médio e o Plioceno gerando o basculamento do Grupo Urucua para leste e a instalação da atual rede de drenagem paralela e retangular de baixa densidade (Góes, 1995; Campos e Dardenne, 1997a; Valadão, 1998).

Base de Dados

Para a geração do mapa potenciométrico foi considerada a existência de conexão hidráulica entre o aquífero, representado pelos níveis estáticos dos poços, e as águas superficiais, representadas pelas drenagens (Desbarats et al., 2002; Bettú e Ferreira, 2005). A partir desta premissa foram obtidos inicialmente os dados da amostra global composta por 4.129 pontos, sendo: *i*) 1.032 dados de níveis estáticos de poços tubulares profundos cadastrados no SIAGAS, obtidos em 03/03/2021; *ii*) 751 pontos de nascentes externas à área do aquífero, sendo 678 situados a oeste, 67 a Sul e 6 a Norte; e *iii*) 2.346 pontos equidistantes aproximadamente 2.500 m entre si obtidos ao longo das drenagens situadas no interior da área.

Foram empregados na elaboração da seção geológica da Figura 13B os poços do Sistema de

Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS: (PS416: nº2900030416, PS499: nº2900026499, PS457: nº5200010457) e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP: (ANP3: 2-ANP-3-BA) obtidos respectivamente nos sites http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php e <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE> em 14/10/2022.

As coordenadas das nascentes e drenagens foram obtidas remotamente no visualizador *Google Earth Pro* e as coordenadas ortométricas (H) da amostra global foram obtidas no Modelo Digital de Elevação das imagens Alos Palsar com uso do *software* Global Mapper 2.1. A subtração dos níveis estáticos das altitudes ortométricas de superfície deram origem as altitudes ortométricas dos níveis estáticos ou cargas hidráulicas dos poços. Com auxílio das extensões do *software* Global Mapper 2.1 foram realizadas a transformação das linhas de drenagens em pontos (*Advanced Feature Creation Options - Create Point Features Space Along Selected Feature (s)*), as direções de fluxo (*Analysis - Watershed Options*) e a geração dos divisores hidrogeológicos (“altos potenciométricos”) (*Analysis - Ridge Line Options*), limitados a um *buffer* (*Advanced Feature Creation Options - BUFFER - Create Buffers Around Selected Feature (s)*) de 20 km além dos limites da área do aquífero e georreferenciados ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS-2000.

O MDE foi obtido do mosaico das imagens Alos Palsar (ASF, 2019) provenientes dos dados do Radar de Abertura Sintética PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) da missão *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS-1) da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), corrigidos e projetados ao datum WGS84 e reamostrados nas resoluções de 12,5 m e 30 m (Macêdo e Surya, 2018; Barbosa, Cicerelli e Almeida, 2019).

O processamento e a integralização dos dados cartográficos para a geração dos mapas foram realizados em ambiente de sistema de informação geográfica utilizando-se os *softwares* ArcMap 10.3 e Global Mapper 2.1, sendo que a geração das direções de fluxo e dos divisores hidrogeológicos somente foram obtidos do mapa potenciométrico final.

Análise Geoestatística

Para que a análise geoestatística de uma amostra seja bem-sucedida, é necessária uma etapa preliminar de avaliação estatística exploratória

descritiva por meio das análises das medidas de tendência central (média e mediana), de dispersão (desvio-padrão, variância, coeficiente de variação, assimetria e curtose) e de distribuição de frequências (histograma), para avaliação do comportamento dos dados e se a distribuição segue o modelo gaussiano. A estimação por Krigagem apresenta melhores resultados quando a distribuição dos dados é gaussiana, pois assume que os dados estimados serão mais próximos do valor médio $\pm$ desvio-padrão. Caso a distribuição não seja gaussiana, faz-se necessária transformação dos dados por funções matemáticas, como exemplo a transformação logarítmica, para buscar a simetria da distribuição, para então se proceder a Krigagem (Yamamoto, 2020).

A análise estatística exploratória foi realizada por meio da ferramenta *Explore Data* da extensão *Geostatistical Analyst* do ArcMap 10.3. Nessa rotina são calculados o histograma com a distribuição de frequências e os valores da média, mediana, desvio-padrão, assimetria e curtose, sendo possível determinar a variância elevando o desvio-padrão ao quadrado, e o coeficiente de assimetria pela divisão do desvio-padrão pela média.

A análise do histograma e dos dados descritivos permite avaliar a forma da distribuição dos dados, bem como identificar valores anômalos discrepantes (*outliers*) que influenciam nos resultados, conduzindo à verificação do significado hidrogeológico destes *outliers*. Estes *outliers* são dados amostrais que apresentam alguma discrepância interferindo significativamente na tendência de dispersão e em alguns casos devem ser retirados da amostra (De Mello et al., 2005; Webster e Oliver, 2008; Tabandeh, Kholghi e Hosseini, 2021). Os *outliers* identificados na análise de distribuição de frequências das cargas hidráulicas dos poços, no diagrama de Voronoi, no mapa de dispersão e no mapa potenciométrico preliminar foram removidos da amostra global.

Constatada a distribuição dos dados próxima da gaussiana, procede-se a análise geoestatística para elaboração do mapa potenciométrico por meio da ferramenta *Geostatistical Wizard* da extensão *Geostatistical Analyst* do ArcMap 10.3, em quatro etapas sequenciais: i) Remoção da Tendência de 1ª Ordem; ii) Modelagem Variográfica ou Análise Estrutural (REIS, 2013): elaboração e análise de semivariogramas experimentais e ajuste iterativo a um modelo variográfico teórico para determinação dos parâmetros para a Krigagem Ordinária, como modelo variográfico, efeito pepita, alcance e patamar; iii) estimação por Krigagem Ordinária

dos resíduos após remoção de tendência de primeira ordem, uma vez que o fenômeno da potenciométrica apresenta intrinsecamente tendência sobre a média; e iv) validação cruzada e análise dos parâmetros da raiz do valor médio quadrático e da raiz do valor médio quadrático padronizada, visando a avaliação qualitativa dos erros de estimação da Krigagem Ordinária.

O mapa estimado por meio da ferramenta *Geostatistical Wizard* da extensão *Geostatistical Analyst* não necessita ter acrescentada a tendência de 1ª ordem removida na primeira etapa para a modelagem variográfica dos resíduos, uma vez que a incorporação da tendência aos resíduos é realizada de maneira automática pela ferramenta.

Comparação dos divisores obtidos com os estabelecidos na literatura

A partir da análise das curvas equipotenciais do mapa potenciométrico gerado por Krigagem Ordinária, é possível identificar e delinear os divisores de fluxo subterrâneo, ou divisores hidrogeológicos, interligando pontos de maior potencial hidráulico.

Foram identificados e delineados quatro divisores hidrogeológicos, os quais foram comparados graficamente com os divisores e altos estruturais já indicados na literatura para o Sistema Aquífero Urucuia, conforme apresentados por Gomes e Motta (1980B), Gaspar (2006), Arraes e Campos (2008) e ANA (2017b).

O Divisor Hidrogeológico Oeste foi sobreposto em mapas estabelecidos por Gaspar (2006) e Arraes e Campos (2008). Os divisores Norte, Central e Sul foram comparados com os perfis de sondagens elétricas verticais (SEVs) disponibilizadas por ANA (2017a). A sobreposição aos dados gravimétricos de Gomes e Motta (1980) que definem um corredor de direção NE e contém altos gravimétricos, encerra internamente o Divisor Hidrogeológico Central.

Estas comparações tiveram por objetivo validar o mapa potenciométrico obtido e a ocorrência dos divisores hidrogeológicos pela sobreposição destes às superfícies potenciométricas e altos estruturais já conhecidos na literatura.

Resultados e discussão

Análise preliminar

Identificação e remoção de outliers

Na análise de distribuição de frequências das cargas hidráulicas dos 1.032 poços da rede SIAGAS (Figura 2) foram constatados dois pontos

com valores de carga hidráulica igual a zero metro (primeira frequência da distribuição). Tais valores não são esperados para uma região cuja potencimetry encontra-se acima da altitude ortométrica de 300 m, sendo assim, estes pontos não apresentam significado hidrogeológico constituindo dois *outliers*, o que justificou sua remoção do conjunto de dados original.

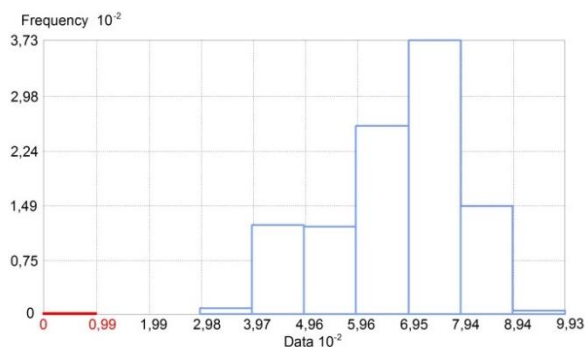


Figura 2. Histograma dos dados de 1.032 poços da rede SIAGAS com a identificação de dois *outliers* de carga hidráulica igual a zero metro, com destaques para o valor mínimo da amostra e a primeira frequência da distribuição (0 m - 99 m).

No mapa potencimétrico preliminar gerado com a amostra global de 4.129 pontos foi identificado e confirmado a ocorrência de um terceiro *outlier*. Os três *outliers* estão representados na feição de círculos concêntricos ou “*bull’s eye*” (Cigagna et al., 2015), que também facilitam a identificação da ocorrência dos *outliers* (Figura 3).

Uma vez identificados e removidos os três *outliers* que comprometeriam o mapa potencimétrico (Desbarats et al., 2002), foi gerado um mapa de distribuição da amostra com 4.126 pontos distribuídos entre 1.029 NEs de poços, 751 nascentes e 2.346 drenagens (Figura 4) e só então o processo de análise estatística e geoestatística da amostra foi repetido para a elaboração do mapa potencimétrico final.

Neste projeto, alguns pontos que ainda mantinham características de *outliers*, não foram retirados da amostra, por serem considerados não prejudiciais ao modelo, pois apresentavam certa semelhança de cargas hidráulicas com os pontos vizinhos.

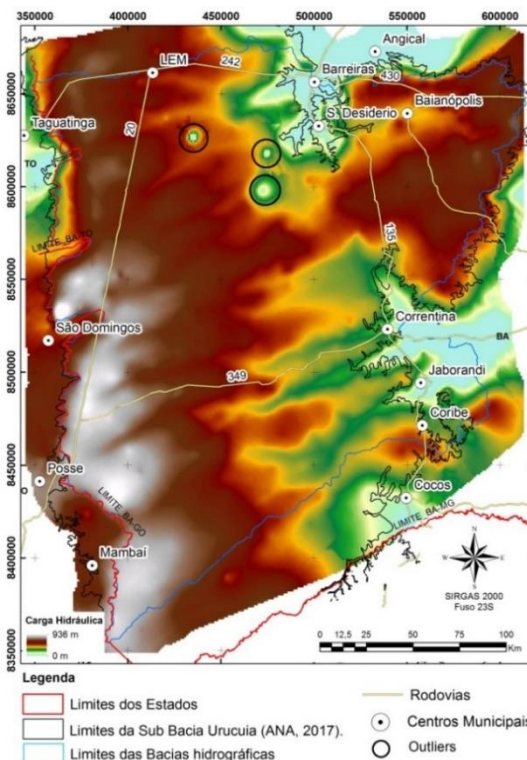


Figura 3. Mapa Potencimétrico preliminar gerado com a identificação de três *outliers* formando a feição “*bull’s eye*”, destacados pelos círculos pretos.

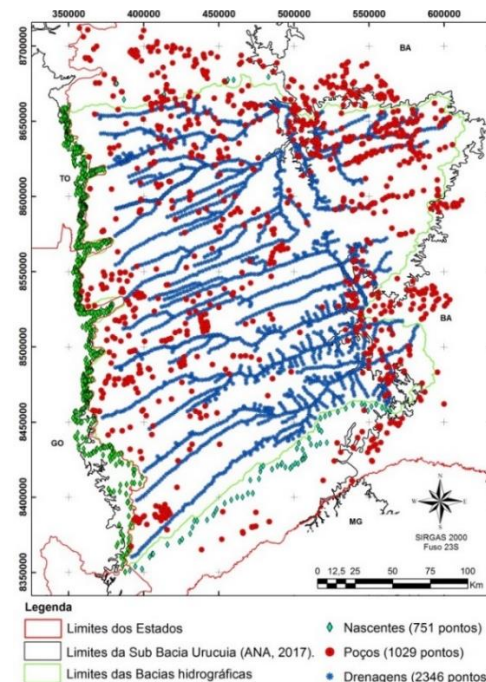


Figura 4. Mapa de distribuição da amostragem composta por 4.126 pontos distribuídos em cargas hidráulicas representadas por nascentes, cursos d’água e poços após a remoção de três *outliers*.

Análise estatística da distribuição de frequências

Após o procedimento de remoção dos *outliers* foi realizada nova análise descritiva e de

distribuição de frequências, sendo o histograma na Figura 5 e o resumo da estatística descritiva apresentado na Tabela 1.

Como é possível observar pela análise estatística apresentada na Figura 5 e Tabela 1, a distribuição dos dados possui assimetria negativa suave (-0,6), coeficiente de curtose 3,47, pouco maior que três, mediana (686 m) maior que a média (676,2 m) em diferença menor que dez unidades de carga hidráulica, e dos 4.126 pontos totais, 4.112 se encontram dentro da faixa de variação da média ± 3 desvios-padrão. Isto significa que 99,7% dos dados estão entre os valores de 401,676 m e 950,724 m, que de acordo com Assis et al., (2019) pode ser considerada próxima da distribuição normal.

Assim, para o presente estudo, a utilização da Krigagem Ordinária é possível sem a

necessidade de transformação dos dados originais (Yamamoto e Landim, 2013).

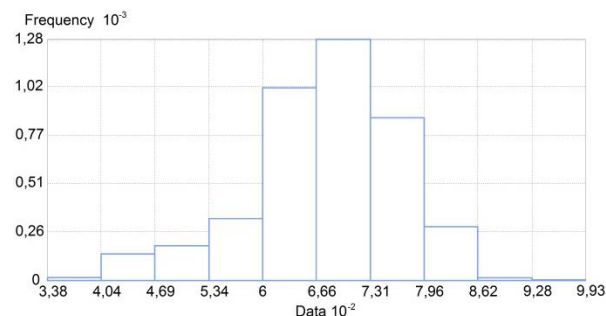


Figura 5. Histograma da amostra composta por 4.126 pontos, mostrando dez classes com intervalo de classe de 66 m.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros da estatística descritiva da amostra composta por 4.126 pontos.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	
CH Mínima: 338 m	Assimetria: -0,60373
CH Máxima: 993 m	Curtose: 3,4708
CH Média: 676,2 m	1º Quartil: 624,58 m
Desvio Padrão: 91,508 m	Mediana: 686 m
Variância: 8.373,71 m ²	3º Quartil: 738 m
Moda: 730 m	CV = 0,1353

CH: Carga Hidráulica

CV: Coeficiente de Variação

Modelagem variográfica e Krigagem Ordinária dos resíduos

Considerando que a variável carga hidráulica é uma medida de energia potencial da água subterrânea em um dado ponto no aquífero, e que a água se move do ponto de maior potencial para o ponto de menor potencial seguindo o gradiente hidráulico (Feitosa et al., 2008), é intrínseca à essa variável a existência de uma componente de tendência estatística.

Para a utilização do estimador Krigagem Ordinária da forma mais adequada e mais acurada deve-se assumir que os dados são isentos de tendência, além de apresentarem distribuição normal, para que a estimação não seja viesada (Reis, 2013; Yamamoto e Landim, 2013). Dessa forma, é possível duas abordagens geoestatísticas: Krigagem Ordinária dos Resíduos (Neuman e Jacobson, 1984) após a remoção inicial da tendência com inserção desta última somente após a interpolação, ou a utilização do interpolador Krigagem Universal, o qual estima valores considerando a componente tendência (Rocha, Lourenço e Leite, 2007). Neste trabalho foi utilizada a primeira abordagem, por apresentar

menores erros de estimação.

Desta forma, antes de iniciar a modelagem variográfica para obtenção dos estimadores da Krigagem Ordinária foi realizada a identificação e remoção da tendência de primeira ordem. A Figura 6 apresenta a tendência regional de primeira ordem dos dados, na qual se observa que esta tendência acompanha o gradiente dos valores de carga hidráulica decrescentes no sentido SW-NE. O sentido de decréscimo dos valores das cargas hidráulicas corresponde à tendência regional do relevo e do fluxo regional do Sistema Aquífero Urucuia já indicado em trabalhos anteriores (Gaspar, 2006; Gaspar, Campos e Moraes, 2012; Gonçalves e Chang, 2017; Silva e Chang, 2018; Mantovani et al., 2019; Vieira, 2021).

Assim, após a remoção da tendência de primeira ordem dos dados de carga hidráulica, restaram os resíduos, que correspondem à diferença entre o valor medido em um dado ponto e o valor da superfície de tendência (Yamamoto e Landim, 2013). Esses resíduos foram então modelados por variografia para obtenção dos parâmetros estimadores da Krigagem Ordinária. A Figura 7 apresenta o semivariograma dos dados de

resíduos utilizados. O ajuste do semivariograma resultou nos parâmetros de estimação para a Krigagem Ordinária apresentados na Tabela 2.

A análise variográfica dos parâmetros apresentados na Tabela 2 mostra um valor de efeito pepita de 696,0 m, correspondente a 12,3% do patamar total. Esse valor de efeito pepita é resultado principalmente da distribuição não sistemática dos pontos amostrados, enquanto o grau de aleatoriedade ($E = C_0/C$) de 0,12 demonstra componente aleatória pequena ou pouco significativa (Yamamoto e Landim, 2013). A direção da anisotropia modelada em 17° , a qual corresponde à direção de maior continuidade espacial da amostra, é coerente com a direção da tendência de primeira ordem.

Com estes parâmetros foi realizada a Krigagem Ordinária dos Resíduos, gerando o mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Urucuia Central (Figura 8).

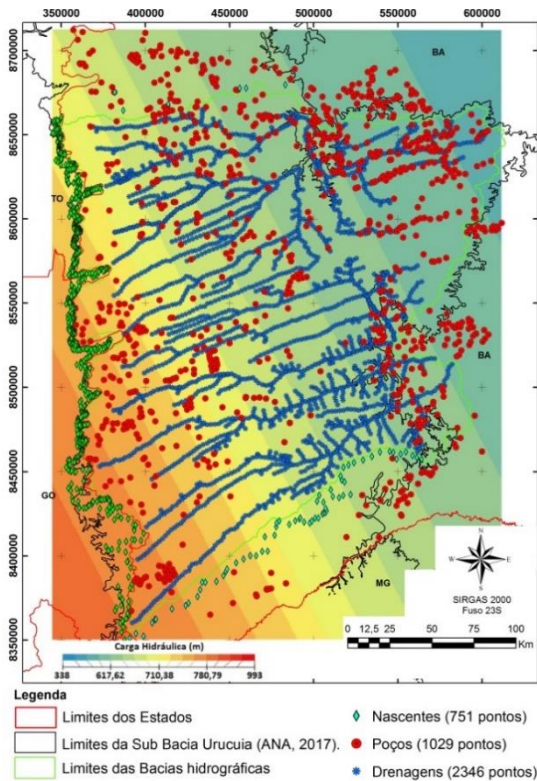


Figura 6. Mapa da Superfície de Tendência de Primeira Ordem, com a indicação dos pontos da amostra. Valores de carga hidráulica decrescentes no sentido SW-NE.

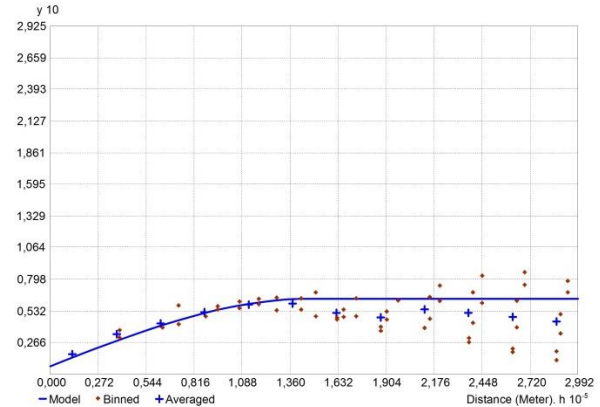


Figura 7. Semivariograma dos dados de resíduos utilizados. Cruzes azuis indicam o semivariograma experimental; a linha azul escura indica o modelo do semivariograma ajustado; pontos vermelhos indicam os pares de pontos para cálculo das variâncias.

Tabela 2. Parâmetros de estimação para a Krigagem Ordinária dos resíduos.

PARÂMETRO	VALOR
Modelo	Esférico
Alcance	166.779,3 m
Patamar: C (sill)	5.654,7 m
Efeito Pepita: C_0 (nugget effect)	696,0 m
Direção de anisotropia	17°
Distância do Passo	24.934,2 m
Número de Passos	12

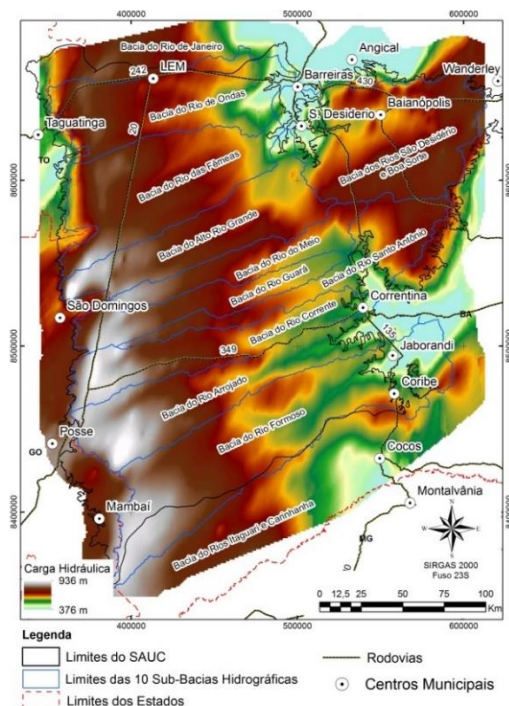


Figura 8. Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Urucuia Central.

Avaliação da qualidade da estimacão – Erros de estimacão da krigagem ordinária

Para avaliar a qualidade da estimacão por Krigagem Ordinária dos Resíduos, foi analisada a validacão cruzada. Na validacão cruzada cada ponto medido (valor real) é retirado do conjunto de dados e então é calculado um novo valor pelo estimador utilizado (valor predito) considerando os pontos vizinhos, sendo a diferença entre esses valores conhecida como erro de predicão. As estatísticas calculadas sobre os erros de predicão servem como diagnóstico que indica se o modelo adotado é razoável para a tomada de decisão e produção de mapas (Isaaks e Srivastava, 1989; Yamamoto e Landim, 2013).

A Figura 9 apresenta o gráfico da validacão cruzada entre os valores reais (abscissa) e os valores preditos (ordenada), mostrando que grande parte dos pontos está próxima ao melhor ajuste por regressão linear. O valor de erro médio quadrático (RMS – *Root-Mean-Square*) para o melhor ajuste variográfico obtido foi de 17,74, enquanto o erro médio quadrático padronizado (*Root-Mean-Square Standardized*) foi de 0,77, indicando pequena superestimacão da variabilidade predita. Embora o valor do erro RMS seja superior a 5% e os valores preditos pouco superestimados, as limitacões impostas pela distribuição irregular dos pontos, confiabilidade dos dados de nível estático dos poços cadastrados no SIAGAS, comportamento heterogêneo e anisotrópico do aquífero, pode-se entender que o ajuste variográfico e a estimacão

por Krigagem Ordinária dos Resíduos foram satisfatórios.

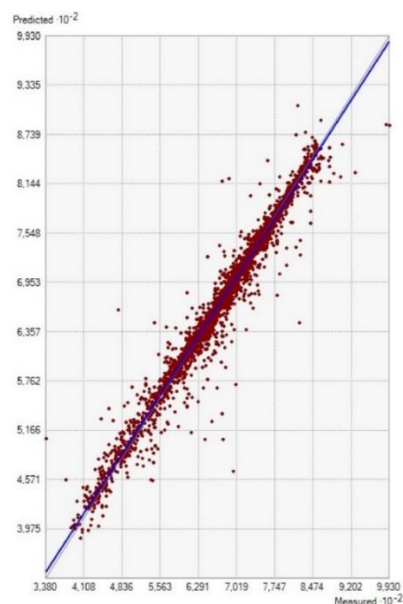


Figura 9. Gráfico da validacão cruzada entre os valores reais no eixo x e os valores preditos no eixo y, por regressão linear. Pontos vermelhos correspondem aos dados; linha cinza corresponde ao ajuste linear igual a 1; linha azul corresponde ao ajuste da regressão linear aos dados. Equação da regressão: $y = 10,96x + 26,42$.

Relação do divisor hidrogeológico com as estruturas morfotectônicas

A partir do mapa potenciométrico resultante, foram geradas as linhas de fluxo preferencial e os altos estruturais, dos quais se estabeleceram os principais divisores hidrogeológicos, dentre os quais foram destacados quatro de maior expressão e importância regional que refletem uma parcial sobreposição a divisores hidrológicos e a altos estruturais reconhecidos em mapas gravimétricos regionais (Figura 10) definidos a seguir:

- i) Divisor Hidrogeológico Oeste: referido por Gaspar (2006) este alto morfotectônico curvilíneo de direção norte-sul que funciona como divisor hidrogeológico do Sistema Aquífero Urucuia é quase paralelo ao divisor hidrográfico, cuja linha de cumeeada serve como limite geopolítico entre os estados da Bahia-Tocantins-Goiás. A partir dele as águas subterrâneas drenam para oeste (Tocantins-Goiás) e para leste (Bahia).
- ii) Divisor Hidrogeológico Norte: corresponde a um divisor de fluxo subterrâneo situado 6 km a norte da cidade de Luís Eduardo Magalhães-BA, marca a porção mais proeminente do limite sul do “wedge-top” da Faixa Rio Preto (Carvalho, 2022).
- iii) Divisor Hidrogeológico Central ou Alto do Rio

Grande: refere-se a uma feição morfotectônica positiva curvilínea que se estende por aproximadamente 270 km segundo o *trend* N60-70E dos eixos das dobras dos calcários e lineamentos de 1ª ordem (ANA, 2017b). Encontra-se definido em mapa a partir das proximidades da cidade Wanderley-BA (ENE) e segue até as imediações do trevo da BR-020 que dá acesso à cidade de São Domingos-GO, onde trunca ao Alto Oeste. Funciona como divisor hidrogeológico entre as sub-bacias do Rio Grande que drena para nordeste e dos rios Corrente e Arrojado que drenam para sudeste.

iv) Divisor Hidrogeológico Sul: corresponde ao limite sul do Bloco Correntina, paralelo ao Baixo de Montalvânia (Martínez, 2007; Leite, Dias e Costa, 2017) caracterizado por Carvalho e Campos (2021) como sendo o “*back-bulge*” final da sub-Bacia Urucuia. Este divisor hidrogeológico pode ser considerado o último “*forebulge*” instalado, cujo alto se estende das imediações da cidade Mambai em Goiás e segue para nordeste passando entre as cidades de Cocos e Coribe na Bahia.

evolução de bacia de *foreland* apresentados por DeCelles e Currie (1996) e DeCelles e Giles (1996), é possível a ocorrência de sucessivos “*forebulges*”.

Com base nas quatro feições lineares regionais definidas como divisores hidrogeológicos, o Sistema Aquífero Urucuia Central foi dividido em três grandes sub-bacias hidrogeológicas (Figura 11), com as seguintes características:

i) Sub-Bacia Oeste: com 7.353 km² corresponde a região drenada para rios e seus afluentes localizados nos estados de Goiás e Tocantins;

ii) Sub-Bacia Norte: com 21.011 km² corresponde a região drenada pelo Rio Grande e seus afluentes, e;

iii) Sub-Bacia Sul: com 25.480 km² corresponde a região drenada pelos rios Arrojado-Corrente e seus afluentes.

No mapa da Figura 12 gerado a partir do produto de Anomalia Gravimétrica Residual Bouguer modificado de ANA (2017a) por Carvalho (2022) (no prelo), os divisores hidrogeológicos contornam parcialmente as bordas do bloco cratônico Correntina regionalmente responsável pela geração dos altos e baixos estruturais que delimitam a sub-Bacia Urucuia.

Para Carvalho (2022), o alto estrutural central refere-se a um “*forebulge*” de antepaís formado por rochas dobradas do Grupo Bambuí que na fase de sutura continental do Bloco Cristalândia do Piauí cavalgaram sobre a borda NW do Bloco Correntina (Figuras 12 e 13) e estabelece os limites do domínio cratônico (Egydio-Silva, 1987; Janoni, 2017).

Na Figura 13A é apresentada uma seção esquemática para uma bacia de *foreland* modificada de DeCelles e Giles (1996) com indicação das possíveis posições dos divisores hidrogeológicos, e na Figura 13B são indicados seus respectivos correspondentes geológicos na Seção Geológica N-S da Bacia Sanfranciscana Norte elaborada com base nos poços estratigráficos do SIAGAS e da ANP.

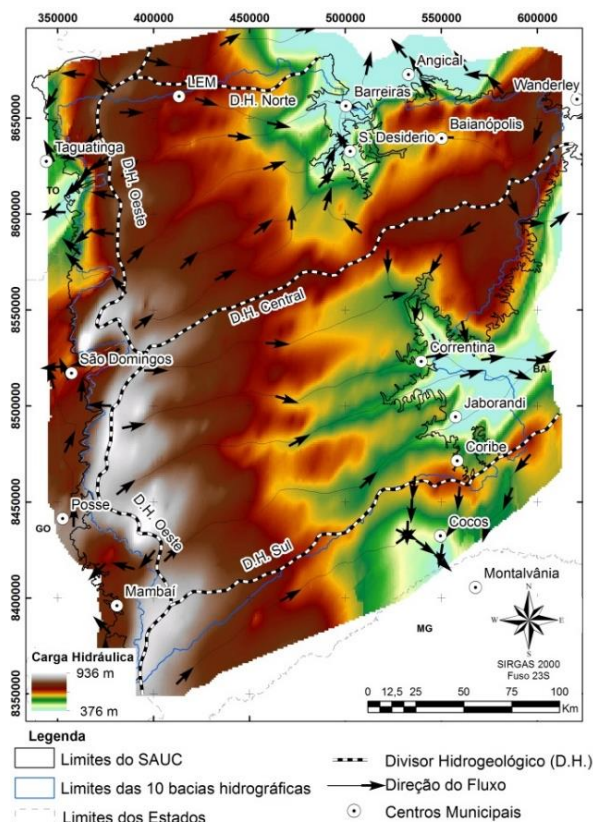


Figura 10. Mapa Potenciométrico do SAUC gerado por Krigagem Ordinária dos Resíduos, destacando os quatro principais divisores hidrogeológicos e os principais sentidos de fluxo subterrâneo (setas pretas).

Considerando o modelo de formação e

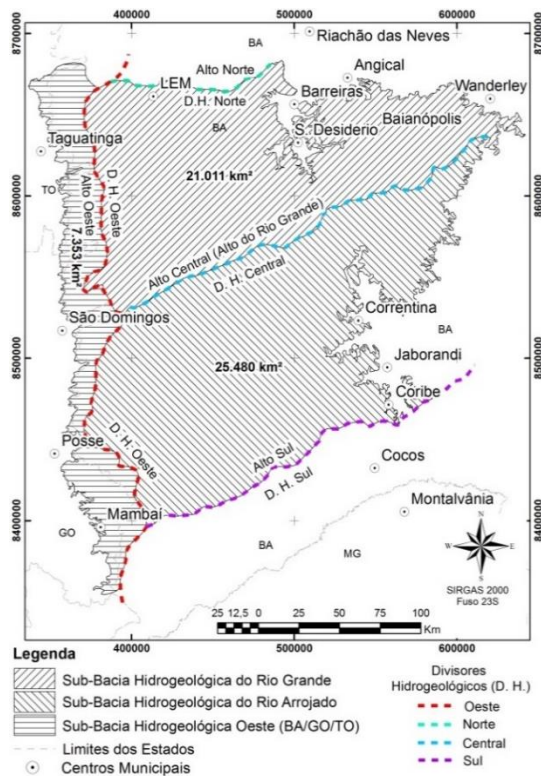


Figura 11. Mapa mostrando as sub-bacias hidrogeológicas que compõem o Sistema Aquífero Urucuia Central, com 53.844 km².

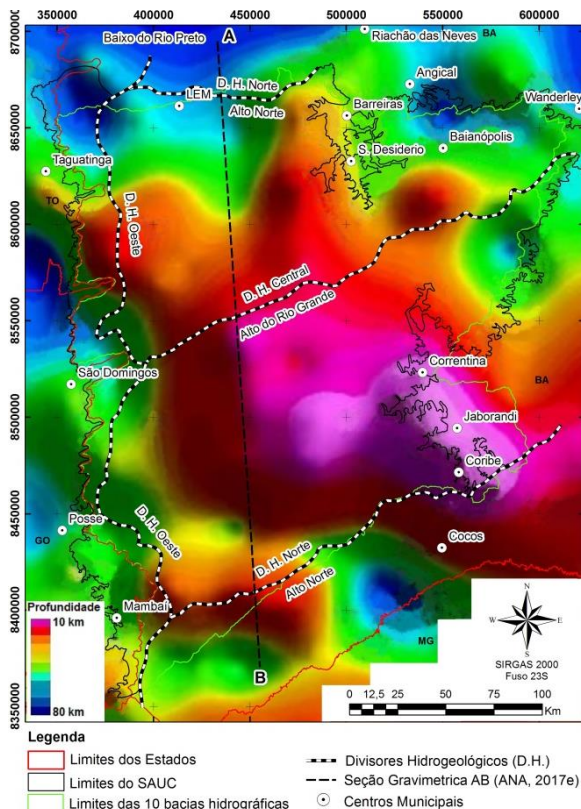


Figura 12. Mapa dos limites da sub-Bacia Urucuia Central posicionado sobre produto de Anomalia Gravimétrica Residual Bouguer modificado de ANA (2017a) por Carvalho (2022) (no prelo).

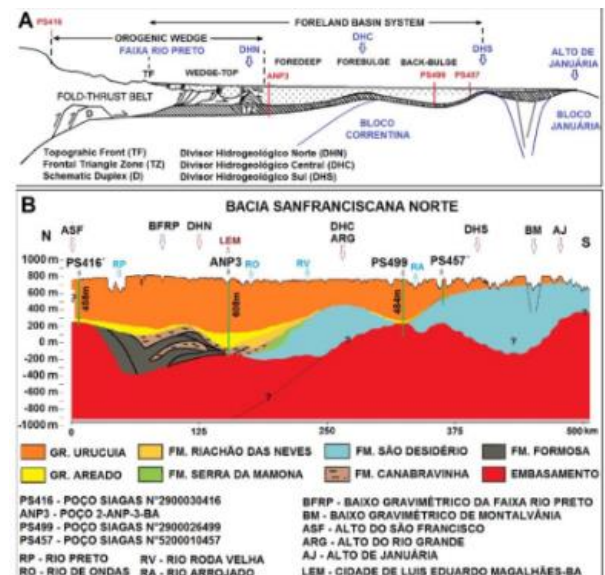


Figura 13. (A) Seção esquemática de uma bacia de foreland modificada de DeCelles e Giles (1996) com indicação das possíveis posições de três dos quatro divisores hidrogeológicos: Divisor Hidrográfico Norte, Divisor Hidrográfico Central e Divisor Hidrográfico Sul. (B) Seção Geológica N-S da Bacia Sanfranciscana.

Dobras e falhas de cavalgamento em rochas carbonáticas da Formação São Desidério sob metapelitos da formação Serra da Mamona e coberturas do Grupo Urucuia são registradas na vertente NW da Serra do Mimo próximo a cidade de Barreiras (Figura 14). Esta estruturação é exposta na cidade de São Desidério e segue para sul por no mínimo 10 km onde foram mapeados blocos de calcários dobrados (Figura 15). A região que se encontra entre a Falha de Cariparé (limite sul da Faixa Rio Preto) e o limite dos dobramentos dos calcários a sul da cidade de São Desidério, foi definida por Egydio-Silva (1987) como domínio pericratônico. A partir deste limite sul, as dobras são progressivamente suavizadas até atingir completa horizontalização na região do domínio cratônico.



Figura 14. Dobra e falha de cavalgamento em rocha do Grupo Bambuí – Serra do Mimo, Barreiras-BA

(E505926/N8657137/H530).



Figura 15. Blocos de rocha calcária da Formação São Desidério dobrada, localizados em meio a pastagem próximo à cidade de São Desidério-BA (E505549/N8623735/H601).

Com base na Anomalia Gravimétrica Residual Bouguer modificado de ANA (2017a) (Figura 12) e nas estruturas dobradas dos blocos de rocha calcária da Formação São Desidério do Grupo Bambuí localizados na cidade de São Desidério-BA (E505549/N8623735/H601) (Figura 15), pode-se considerar que o limite dos domínios pericratônico e cratônico de Egydio-Silva (1987) encontra-se mais a sul e provavelmente coincidente com o Divisor Hidrogeológico Central.

O Domínio Hidrogeológico Central ocupa o interior de uma faixa de descontinuidade gravimétrica de direção N60°E que se estende por aproximadamente 730 km, do alto do Chapadão do Urucuia na Bahia até o nordeste da cidade de Senhor do Bonfim-BA (Gomes e Motta, 1980b) (Figura 16).

A distância média aproximada entre as estações das SEVs ao longo da Seção Geológica (25a-SEV60) das Figuras 16 e 17 é de 43 km (máx. 69,5 e mín. 26,6) o que deixa grandes espaços sem amostragem obrigando ao intérprete maior suavização das informações na seção o que gera discrepância entre superfícies topográficas e potenciométricas.

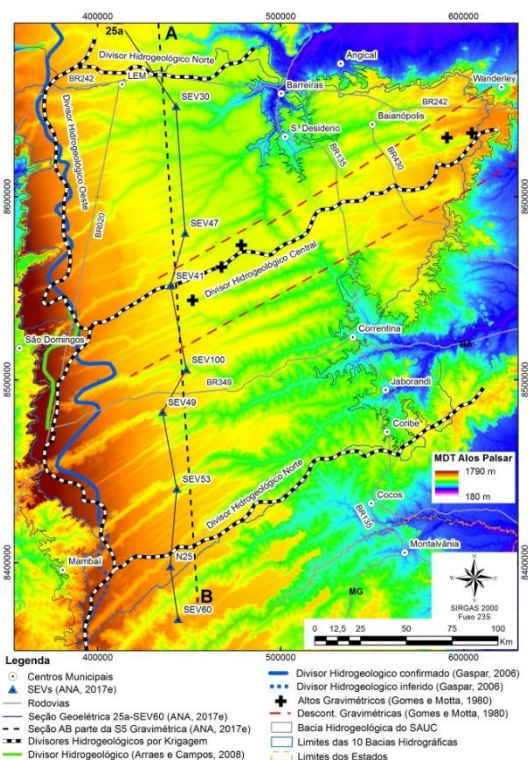


Figura 16. Mapa de comparação entre divisores hidrogeológicos obtidos por Krigagem com divisores hidrogeológicos de outros autores e o corredor delimitado por descontinuidades gravimétricas de *trend* NE de Gomes e Motta (1980b).

No trabalho de ANA (2017a) foram realizadas 149 sondagens elétricas verticais - SEVs no interior da bacia, deste total, 49 SEVs em 53.844 km² da sub-Bacia do Urucuia Central, resultando em uma relação de 9×10^{-4} SEVs/km², enquanto na geração do modelo potenciométrico por Krigagem Ordinária o adensamento foi de 0,054 pontos/km², culminando em melhor representação da superfície potenciométrica na área (Figura 17).

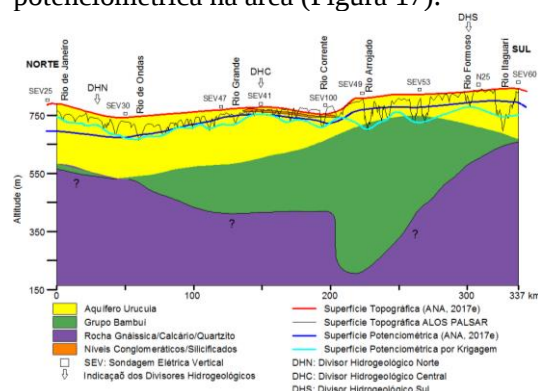


Figura 17. Recorte da Seção Geológica AB correspondente ao segmento poligonal situado entre as SEVs 25 e 60 modificado de ANA (2017a), acrescida da superfície potenciométrica elaborada por Krigagem Ordinária (linha azul ciano).

A diferença visual entre as superfícies

topográfica do MDE Alos Palsar e a potenciométrica por Krigagem no vale do Rio Itaguari (Figura 18) tem origem na falta de amostragem ao longo da drenagem do canal deste rio, ao longo do qual só foram amostradas as

nascentes situadas em sua margem esquerda, por entender que o canal desta drenagem já se encontrava além da área de abrangência do Sistema Aquífero Urucuia Central.

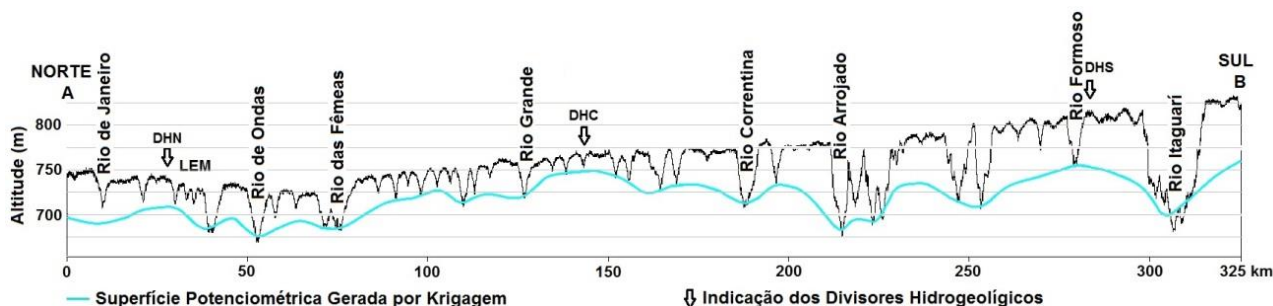


Figura 18. Seção AB - Superfície potenciométrica gerada por Krigagem posicionada sob Relevo com indicação dos rios, dos divisores hidrogeológicos (DHN, DHC e DHS) e da cidade de Luís Eduardo Magalhães (LEM). Esta Seção do interior do Sistema Aquífero Urucuia Central corresponde ao segmento reto sobre a linha que define a Seção Gravimétrica S5 modificada de ANA (2017a).

Conclusões

O modelo potenciométrico gerado por Krigagem Ordinária permitiu o reconhecimento de quatro significativas descontinuidades hidrogeológicas, correlacionáveis às feições lineares regionais correspondentes aos paleoaltos estruturais decorrentes dos esforços tectônicos, sendo estes identificados como: *i*) Divisor Hidrogeológico Oeste (Bahia/Goiás/Tocantins); *ii*) Divisor Hidrogeológico Norte (Luís Eduardo Magalhães/Riachão das Neves); *iii*) Divisor Hidrogeológico Central ou Alto do Rio Grande (São Domingos/Wanderley); e *iv*) Divisor Hidrogeológico Sul (Mambai/Coribe), sendo responsáveis pela geração de três sub-bacias de águas subterrâneas.

A comparação dos modelos apresentados na literatura com os resultados do presente trabalho valida a ocorrência do Divisor Hidrogeológico Oeste e indica a ocorrência dos demais divisores hidrogeológicos apoiada em mapas gravimétricos, perfis topográficos e de sondagens elétricas verticais.

Com base na localização do Divisor Hidrogeológico Central, é possível sugerir que esta feição neotectônica represente o limite entre os domínios pericratônico e cratônico.

Estes resultados confirmam a existência de divisores hidrogeológicos do Sistema Aquífero Urucuia Central que estão associados à morfotectônica e permitem a correlação da morfologia superficial e subterrânea regionalmente com base no mapa potenciométrico, contribuindo para melhor definição de ações relacionadas à gestão dos recursos hídricos.

A compartimentação hidrogeológica

observada pelo comportamento da potencimetria do Sistema Aquífero Urucuia Central condicionada pela estruturação morfotectônica resultante do enquadramento da sub-Bacia Urucuia como uma bacia de antepaís (*foreland basin*) abre oportunidades de melhor entendimento da gênese dessa unidade aquífera, e assim a determinação dos sistemas de fluxo em compartimentos é importante para a futura gestão do Sistema Aquífero Urucuia, de forma que os compartimentos e os divisores hidrogeológicos, em conjunto com os diferentes subtipos de aquíferos devem ser considerados nos processos de gerenciamento, com aplicação de ações distintas para cada aquífero e respectivo compartimento.

Agradecimentos

Aos idealizadores do Programa de Doutorado Interinstitucional - DINTER estabelecido entre a Universidade de Brasília e a Universidade Federal do Oeste da Bahia (Edital CAPES - Nº 23/2014) e à CAPES pelo auxílio financeiro - Processo nº 23038.021558/2016-72.

Referências

- Alkmim, F. F. de. *O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton do São Francisco e as Revelações Almeidianas ao delimitá-lo*. [s.l.: s.n.]
- Almeida, F. F. M. de et al. Províncias Estruturais Brasileiras. *Sociedade Brasileira de Geologia - atas do viii simpósio de geologia do nordeste*, n. Novembro 1977, p. 363–391, 1977.
- ANA. Diagnóstico do Meio Físico da Região de Abrangência dos Sistemas Aquíferos Urucuia e

- Areado. TOMO I: Relatório Final. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada Compartilhada, 1–I, 138, 2017a.
- ANA. Investigação Geofísica na Região dos Sistemas Aquíferos Urucuia (SAU) e Areado (SAA). Relatório Técnico Temático. *Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia - Proposição de Modelo de Gestão Integrada Compartilhada*, p. 94, 2017b.
- Arraes, T. de M., Campos, J. E. G. A Importância da Delimitação de Bacias Hidrogeológicas para a Gestão de Aquíferos Transfronteiriços: O Caso do Sistema Aquífero Urucuia (SAU). *Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, p. 1–10, 2008.
- Arraes, T. de M., Campos, J. E. G. Aplicação de Ensaio de Traçador e Dados de Potenciometria como Ferramentas para a Delimitação de Bacias Hidrogeológicas. *Geociências (São Paulo)*, v. 29, n. 4, p. 623–631, 2010. Disponível em: <http://papegeo.igc.usp.br/scielo.php?pid=S0101-90822010000400015&script=sci_arttext&tlng=en>.
- Assis, J. P. De, Sousa, R. P. De, Dias, C. T. D. S. Glossário de estatística. [s.l: s.n.]
- Barbosa, J. S. F., Sabaté, P., Marinho, M. M. O Cráton do São Francisco na Bahia: Uma Síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, 33, 3–6, 2003.
- Barbosa, V. R. F., Cicerelli, R. E., Almeida, T. De. Análise Comparativa entre Modelos Digitais de Elevação (MDE) do Satélite Alos. XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 3327–3330, 2019.
- Bettú, D. F., Ferreira, F. J. F. Modelos da superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Caiuá no noroeste do Estado do Paraná: comparação entre krigagem ordinária e krigagem com tendência externa do modelo numérico do terreno. *Águas Subterrâneas*, 2005.
- Campos, J. E. G., Dardenne, M. A. Origem e Evolução Tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, 27,. 283–294, 1997a.
- Campos, J. E. G., Dardenne, M. A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27, 269–282, 1997b.
- Carvalho, L. G., Campos, J. E. G. Influence of Tectonic Reactivations on the Evolution and Structuring of the Sanfranciscana Basin with emphasis on the Urucuia Sub-Basin. *Brazilian Journal of Geology*, p. 36, 2022.
- Caxito, F. de A. et al. Structural Analysis of the Rio Preto Fold Belt (Northwestern Bahia / Southern Piauí), a Doubly-Vergent Asymmetric Fan Developed During The Brasiliano Orogeny. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, v. 86, 1101–1113, set. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652014000301101&lng=en&tlng=en>.
- Acesso em: 21 jan. 2019.
- Caxito, F. de A., Uhlein, A. Arcabouço Tectônico e Estratigráfico da Faixa Riacho do Pontal, Divisa Pernambuco-Piauí-Bahia. *Geonomos*, 21, 19–37, 2013.
- Cigagna, C. et al. Geostatistical Techniques Applied to Mapping Limnological Variables and Quantify the Uncertainty Associated with Estimates. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 27, 421–430, dez. 2015. Disponível em: <<http://search.proquest.com/docview/1808729333?accountid=171501>>.
- Cockrell, L. P. et al. Data Compilation and Database Structure for the Geodatabase Accompanying the Hydrogeologic Atlas of Southwest Travis County , Central Texas. Barton Springs/Edwards Aquifer Conservation District (BSEACD) Data Series Report 2020-0721, 2020.
- De Mello, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*,. 25–37, 2005.
- Decelles, P. G., Currie, B. S. Long-Term Sediment Accumulation in the Middle Jurassic-Early Eocene Cordilleran Retroarc Foreland-Basin System. *Geology*, v. 24, n. 7, p. 591–594, 1996.
- Decelles, P. G., Giles, K. A. Foreland Basin Systems. *Basin Research*, 8, 105–123, 1996.
- Desbarats, A. J. et al. On the Kriging of Water Table Elevations Using Collateral Information from a Digital Elevation Model. *Journal of Hydrology*, 255, 25–38, 2002.
- Egydio-Silva, M. O Sistema de Dobramentos Rio Preto e suas relações com o Cráton do São Francisco. 1987. Universidade de São Paulo, 1987.
- Feitosa, F. A. C. et al. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. [s.l: s.n.]
- Gaspar, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuia : Caracterização Regional e Propostas de Gestão. 2006. 76 Universidade de Brasília, 2006.

- Gaspar, M. T. P., Campos, J. E. G. O Sistema Aquífero Urucuia. *Revista Brasileira de Geociências*, 37, 216–226, 2007.
- Gaspar, M. T. P., Campos, J. E. G., Moraes, R. A. V. de. Determinação das Espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a partir de Estudo Geofísico. *Revista Brasileira de Geociências*, 42, 154–166, 2012. Disponível em: <www.sbgeo.org.br>.
- Góes, A. M. A Formação Poti (Carbonífero Inferior) da Bacia do Parnaíba. 1995. Universidade de São Paulo, 1995.
- Gomes, R. A. A. D., Motta, A. C. Projeto Levantamento Gravimétrico no Estado da Bahia -Relatório Final e Anexos Salvador-BACompanhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1980.
- Gonçalves, R. D., Chang, H. K. Modelo Hidrogeológico do Sistema Aquífero Urucuia na Bacia do Rio Grande (BA). *Geociências*, 36, 205–220, 2017.
- Heilbron, M., Cordani, U. G., Alkmim, F. F. Regional Geology Reviews. São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. [s.l: s.n.]
- Holz, M. et al. Projeto BAFRAN - Reavaliação geológica da porção baiana da Bacia de Francisco: estratigrafia de sequência, sismoestratigrafia e possíveis implicações para sistemas petrolíferos., 2014.
- Iglesias, M., Uhlein, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 39. 256–266, 2009. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0375-75362009000200006&nrm=iso>.
- Isaaks, H. B., Srivastava, R. M. *Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- Janoni, C. R. O Depósito de Manganês Portador de Metais Raros (Cobalto, Tálho e Escândio) de Alto Teor do Vau da Boa Esperança, Região de Barreiras, Oeste da Bahia, Brasil. 2017. 2017.
- Junior, V. A., Lima, O. A. L. de. Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas – BA usando Resistividade e Polarização Elétrica Induzida. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25, 117–129, 2007.
- Kiang, C. H., Silva, F. de P. e. Contribuição ao Arcabouço Geológico do Sistema Aquífero Urucuia. *Revista de Geociências da Universidade Estadual Paulista - UNESP*, 34, 872–882, 2015.
- Leite, M. M., Dias, P. H. A., Costa, R. D. da. Estruturação e Estratigrafia da Bacia Bambuí na Região de Montalvania-Japoré, Norte de Minas Gerais. Xvi simpósio nacional de estudos tectônicos - x international symposium on tectonics. 22 a 24 de maio de 2017. Salvador - BA - Brasil Salvador-BA, 2017.
- Lima, O. A. L. de. Levantamentos Geofísicos no Aquífero Urucuia: Sub- Bacias dos Rios Arrojado e Formoso, Bahia. *UFBA*, p. 37, 2007
- Macêdo, R. J. A. de, Surya, L. Comparação entre Modelos Digitais de Elevação dos Sensores SRTM E ALOS Palsar para Análise Digital de Terreno. *Revista Contexto Geográfico*, 3, 47–55, 2018.
- Mantovani, E. C. et al. Relatório Técnico Final - Estudo do Potencial Hídrico da Região Oeste da Bahia: Quantificação e Monitoramento da Disponibilidade dos Recursos do Aquífero Urucuia e Superficiais nas Bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhanha. p. 359, 2019.
- Martínez, M. I. Estratigrafia e Tectônica do Grupo Bambuí no Norte do Estado de Minas Gerais. 2007. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MPBB-76LHRV>.
- Mutua, S. et al. Understanding and Conceptualization of the Hydrogeology and Groundwater Flow Dynamics of the Nyando River Basin in Western Kenya. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32. December, p. 100766, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100766>.
- Neuman, S. P., Jacobson, E. A. Analysis of Nonintrinsic Spatial Variability by Residual Kriging with Application to Regional Groundwater Levels. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 16, 499–521, 1984.
- Orr, E. D., Dutton, A. R. An Application of Geostatistics to Determine Regional Groundwater Flow in the San Andres Formation, Texas and New Mexico. *Groundwater*, 1983
- Pereira, C. et al. New Processing and Seismic Interpretation for the Northern São Francisco Basin, Brazil. Society of Exploration Geophysicists - 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August 2015 p. 1146–1149, 2015.
- Reis, C. P. dos. Simulação de Fatores que Afetam as Predições Obtidas por Krigagem Ordinária. 2013. Universidade Federal de Viçosa, 2013.
- Rocha, M. M. da, Lourenço, D. A., Leite, C. B. B. Application of the kriging with smoothing effect correction in potentiometric data of the city of

- Pereira Barreto - SP. Geologia USP - Serie Científica, 7,. 37–48, 2007.
- Santos, C. H. de O. Expressão Estrutural do Lineamento Transbrasiliano na Porção Sul da Bacia do Parnaíba. 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro, 2017.
- Silva, F. de P. e, Chang, H. K. Sistemas Aquíferos da Porção Centro-Norte da Bacia Sanfranciscana e Estimativa do Fluxo Regional. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 32, 267–274, 2018.
- Tabandeh, S. M., Kholghi, M., Hosseini, S. A. Groundwater Quality Assessment in Two Shallow Aquifers With Different Hydrogeological Characteristics (Case Study: Lenjanat and Babol–Amol Aquifers in Iran). Environmental Earth Sciences, 80, , 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09690-8>>.
- Uhlein, A. et al. Estratigrafia e Tectônica das Faixas Neoproterozóicas da Porção Norte do Craton do São Francisco. *Geonomos*, v. 19, n. 2, p. 8–31, 2011. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/geonomos/PDFs/20112/Uhlein-et-al.pdf>>.
- Valadão, R. C. *Evolução de Longo-Termo do Relevo do Brasil Oriental (Desnudação, Superfície de Aplanamento e Soerguimentos Crustais)*. 1998. Universidade Federal da Bahia, 1998.
- Vieira, M. de S. B. *Estudo das Vazões do Sistema Aquífero Urucuia em Períodos de Recessão Hídrica*. 2021. Universidade de Brasília, 2021. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/22169>>.
- Webster, R., Oliver, M. A. *Geostatistics for Environmental Scientists: Second Edition*. [s.l.: s.n.]
- Yamamoto, J. K., Landim, P. M. B. *Geoestatística Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- Yamamoto, J. K. *Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais*. São Paulo: Edição do Autor, 2020.