

Estudo de séries temporais para avaliação do nível de água subterrânea em poço de monitoramento

Rubens Oliveira da Cunha Júnior¹, João Victor Mariano da Silva²

¹ Universidade Federal do Cariri (UFCA), Campus Crato, Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB). Mestrando no Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável. cunhajunior.rubens@gmail.com.

² UFCA, Campus Crato, CCAB. Mestrando no Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável. joaovictormarianods@gmail.com.

Submetido em: 31/12/2020 | Aceito em: 05/07/2021

Resumo

As condições climáticas e hidrogeológicas do semiárido brasileiro demandam soluções hídricas sustentáveis e eficientes. Os programas de monitoramento das águas subterrâneas são ferramentas que subsidiam a tomada de decisão neste sentido. No estado do Ceará, o monitoramento dos aquíferos da bacia sedimentar do Araripe é importante para o desenvolvimento da região. Neste cenário, o presente trabalho objetivou estudar o nível de água subterrânea por meio da análise exploratória de séries temporais. A área de estudo compreendeu a porção leste da bacia sedimentar do Araripe, no município de Milagres, no estado do Ceará. Como objeto de estudo, foi obtida a série mensal de nível estático médio em um poço monitorado pela RIMAS/CPRM e instalado no Sistema Aquífero Médio. Foram aplicados métodos gráficos e numéricos para identificação e descrição das principais características da série temporal. Dados de precipitação na área de estudo foram utilizados para avaliar a recarga do sistema. Os resultados foram discutidos segundo os aspectos ambientais da área de estudo. Como resultados do estudo, foi possível a identificação e a descrição de padrões como tendência e sazonalidade da série por meio dos métodos aplicados. Destacam-se ainda o rebaixamento acentuado do nível estático ao longo da série, refletindo o estado quantitativo do sistema aquífero, bem como a recarga do lençol freático durante a estação chuvosa da região, evidenciada no estudo da sazonalidade da série em conjunto com dados de precipitação.

Palavras-chave: Bacia Sedimentar do Araripe. Recursos hídricos. Semiárido.

Introdução

Na região do semiárido brasileiro, a problemática hídrica tem sido objeto de estudos e intervenções desde o século 19. A região é marcada por altas temperaturas, frágil hidrografia e irregular distribuição temporal e espacial das chuvas. Essas condições climáticas, aliadas às secas periódicas incidentes no semiárido, constituem um problema estrutural com implicações econômicas e sociais. Neste contexto, a obtenção de água para abastecimento humano e uso em irrigação e indústria na região se deu historicamente pelo represamento da água superficial em açudes ou pela perfuração de poços para captação das águas subterrâneas (REBOUÇAS, 1997; GARJULLI, 2003).

A hidrogeologia do semiárido é caracterizada por dois contextos distintos: o embasamento cristalino, cujas formações rochosas de baixa permeabilidade ensejam o uso eficiente dos açudes

como solução hídrica; e as rochas sedimentares, com potenciais reservas de água subterrânea (REBOUÇAS, 1997). No estado do Ceará, predomina o embasamento cristalino, correspondendo a cerca de 75 % do território e localizado na sua grande região central. Entretanto, na extremidade sul e no litoral do estado encontram-se formações sedimentares com maior potencial em recursos hídricos subterrâneos (TEIXEIRA, 2003). Em especial, ao sul do estado, na divisa com os estados de Pernambuco e Piauí, está localizada a Bacia Sedimentar do Araripe, uma área de relevante interesse hidrogeológico pelo seu potencial de qualidade e quantidade de águas subterrâneas (CPRM, 2009).

A Bacia Sedimentar do Araripe é a maior reserva de água subterrânea do estado do Ceará e está inserida geograficamente na região do Cariri cearense. A região do Cariri é abastecida em quase sua totalidade por águas subterrâneas

de poços de captação ou fontes. Neste cenário, estão incluídos os municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha, que exercem forte centralidade no desenvolvimento regional. O crescimento populacional e econômico tem levado a um aumento da exploração das águas subterrâneas para consumo humano e uso na indústria e irrigação (VERÍSSIMO, 1999; MOURA-FÉ *et al.*, 2019).

O Sistema Aquífero Médio é o mais perfurado e explotado da região do Cariri, e a recarga do aquífero ocorre em maior parte por conta da chuva, havendo ainda contribuição das fontes localizadas no sopé da chapada do Araripe. Considerando a sua importância para o desenvolvimento da região, o aquífero encontra-se exposto a uma série de fatores que ameaçam as suas águas. A perfuração indiscriminada de poços, a geração de resíduos poluidores por parte das atividades agrícolas e industriais, e a contaminação das águas superficiais são fatores de risco que, aliados às elevadas explorações das águas subterrâneas, ressaltam a importância das ferramentas de monitoramento, diagnóstico e gestão (COGERH, 2009; VERÍSSIMO, 1999).

O monitoramento da água subterrânea na Bacia Sedimentar do Araripe é realizado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, como parte da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS, e pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH. O monitoramento da água subterrânea é um instrumento essencial na avaliação quantitativa e qualitativa das reservas, uma vez que, por meio de observações sistemáticas de processos dinâmicos, como níveis e qualidade da água em poços, permitem o acompanhamento histórico de importantes variáveis hidrológicas e fornecem informações para planejamento e

gestão (FEITOSA, 2008). Diante disso, formalismos como séries temporais são ferramentas importantes na representação, modelagem e previsão de processos hidrológicos (MACHIWAL; JHA, 2012; CHAN; CRYER, 2008).

No estudo de séries temporais, o uso de ferramentas gráficas na análise dos dados é importante (MORLEY; ADAMS, 1991). Diversas características das séries podem ser identificadas pela análise gráfica (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018). Técnicas de decomposição de séries temporais para identificação e estudo de padrões como tendência e sazonalidade têm sido aplicadas por autores como Cortes *et al.* (2018). Em especial, no tocante ao estudo e avaliação das águas subterrâneas, Machiwal, Nimawat e Samar (2011) utilizaram técnicas estatísticas gráficas para avaliar redes de monitoramento de águas subterrâneas. Ainda, a abordagem por séries temporais foi utilizada por autores como Crosbie, Binning e Kalma (2005), para inferir a recarga do sistema aquífero, Carnier Neto (2006), na avaliação de redes de monitoramento, Hu, Zhang e Xing (2001), ao analisarem as características dinâmicas anuais do nível da água subterrânea, e Gouvêa (2009), para estudar a influência da precipitação e das características do solo nas variações dos níveis d'água em áreas de recarga.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a evolução do nível de água subterrânea em um poço monitorado no Aquífero Médio, por meio do estudo de séries temporais. Neste estudo, as características das séries temporais foram exploradas gráfica e numericamente, e os resultados correlacionados com dados de pluviometria, a fim de se entender a dinâmica regional do aquífero em questão. Os resultados obtidos foram discutidos segundo os aspectos ambientais da área de estudo.

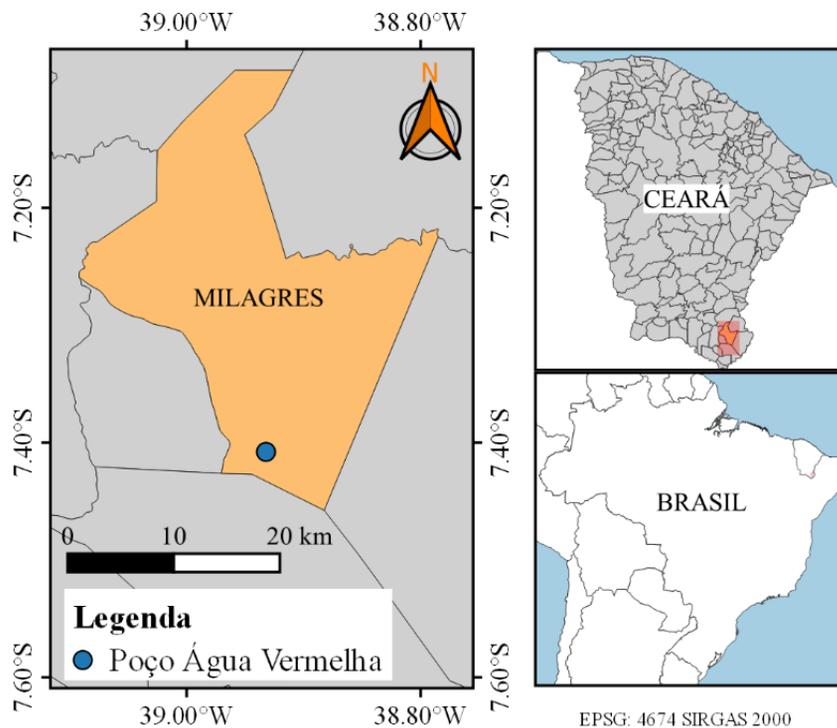
Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho está inserida no município de Milagres, onde está situado o poço Água Vermelha, objeto de estudo deste trabalho. O município de Milagres está localizado no extremo sul do estado do Ceará, limitando-se ao norte com os municípios de Barro

e Aurora, ao sul com Abaiara e Brejo Santo, ao leste com Mauriti e Barro e ao oeste com Missão Velha e Abaiara (IPECE, 2017). Possui uma área territorial de 579,097 km² e uma estimativa populacional de 27.462 habitantes (IBGE, 2020). Está inserido no contexto da sub-bacia do Rio Salgado e no contexto hidrogeológico da bacia sedimentar do Araripe (COGERH, 2019a). A Figura 1 mostra a localização da área de estudo.

Figura 1 – Mapa de localização do município de Milagres, Ceará, com destaque para a localização do Poço Água Vermelha, 2021.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

A hidrogeologia da região se caracteriza pela litoestratigrafia diversificada, que proporciona a ocorrência de uma alternância de aquíferos, aquíferos e aquícludes, com variações e descontinuidades espaciais. Dessa forma, adota-se a seguinte divisão hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe: (i) Sistema Aquífero Superior, representado pelas formações Exu e Arajara; (ii) Aquíclode Santana, caracterizado pela formação homônima; (iii) Sistema Aquífero médio, representado pelas formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha;

(iv) Aquíclode Brejo Santo, definido pela formação homônima; e (v) Sistema Aquífero inferior, determinado pela Formação Mauriti e parte basal da Formação Brejo Santo (VERÍSSIMO, 1999).

O poço de monitoramento possui profundidade útil de 70,0 m e está localizado na cota topográfica de 362,34 m acima do nível do mar. O seu perfil litológico envolve camadas de arenitos finos, argilitos, argilas e argilas arenosas (CPRM, 2021). A Figura 2 mostra o poço de monitoramento analisado.

Figura 2 – Poço Água Vermelha no município de Milagres, Ceará, agosto de 2012.



Fonte: CPRM (2021).

O regime pluviométrico da região é caracterizado pela grande irregularidade interanual e pela variabilidade temporal e espacial das chuvas. A precipitação média anual na região do Cariri é de 919,6 mm, com chuvas concentradas na chamada estação chuvosa, compreendida entre os meses de dezembro a junho. Nos meses de dezembro e janeiro, ocorrem as chamadas chuvas de pré-estação, sendo o início da quadra chuvosa no mês de fevereiro de cada ano (TEIXEIRA, 2003).

A região tem clima tropical quente semiárido brando, tropical quente e tropical quente subúmido. O seu relevo é formado por dois domínios principais, planalto e depressão, conhecidos respectivamente como a Chapada do Araripe, que ocupa 73 % da área total da Bacia, e o Vale do Cariri (COGERH, 2009).

Conjunto de dados

O conjunto de dados utilizado no presente trabalho consiste na série histórica da evolução do nível estático do poço Água Vermelha, localizado ao sul do município de Milagres. Os dados foram obtidos da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas – RIMAS/CPRM, estação nº 2300022135 (CPRM, 2021). As medições dos níveis foram obtidas por meio de medidor automático de nível equipado com *datalogger*. Os registros históricos de níveis estáticos foram obtidos para o período de agosto de 2011 a novembro de 2019.

Para o estudo da recarga do aquífero, foram também utilizados dados de precipitação da região de estudo. As séries históricas de estações pluviométricas localizadas na área de interesse foram obtidas no portal da Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME.

Análise de séries temporais

Séries temporais são coleções de observações realizadas sequencialmente no domínio do tempo. Seja y_t uma série temporal, tem-se $y_t = y_1, \dots, y_n$, nos tempos t_1, \dots, t_n . A abordagem por séries temporais tem aplicações em diversas áreas do conhecimento, tais como economia, epidemiologia, ciências hidrológicas, entre outras, uma vez que o seu estudo permite entender a natureza estocástica dos fenômenos, identificar padrões e realizar previsões a partir de um histórico conhecido. A análise de séries temporais consiste em identificar as suas principais propriedades, descrever o seu comportamento e selecionar modelos de previsão adequados (CHAN, CRYER; 2008).

A etapa inicial e mais básica da análise de séries temporais é a visualização dos valores da série dispostos graficamente em função do tempo. Analisar o gráfico da série temporal permite identificar padrões, valores incomuns, mudanças ao longo do tempo e relações com outras variáveis. Além disso, o cálculo de estatísticas descritivas da série também é importante nessa etapa (KABACOFF, 2015; SHUMWAY; STOFFER, 2017).

Séries temporais podem exibir diferentes padrões; geralmente, é útil para a análise decompor a série em componentes que possam representar esses padrões, como tendência, sazonalidade e variações aleatórias. A decomposição pode ser aditiva ($y_t = S_t + T_t + R_t$) ou multiplicativa ($y_t = S_t \times T_t \times R_t$), em que S_t , T_t e R_t representam respectivamente as componentes de sazonalidade e tendência, e uma componente de resíduo. A série decomposta pode ser expressa também na forma $y_t = S_t + A_t$, em que $A_t = T_t + R_t$ é chamada componente ajustado sazonalmente. Assim, a sazonalidade e o componente A_t podem ser analisados separadamente.

A componente de tendência captura mudanças no valor da série ao longo do tempo, isto é, mudanças de direção positivas ou negativas em

longo prazo. A sazonalidade representa efeitos sazonais que influenciam os valores da série em determinados períodos do ano, dia da semana ou hora do dia. Os gráficos de sazonalidade são uma ferramenta gráfica útil neste sentido, uma vez que permitem que padrões sazonais possam ser percebidos mais claramente. Neste gráfico, são mostradas subséries para cada estação, por exemplo, em uma série mensal, os valores são exibidos por ano e no eixo horizontal são dispostos os meses. Por fim, a componente de resíduo captura influências que não são descritas pelos efeitos sazonais e de tendência.

Séries temporais que não apresentam padrões de tendência e sazonalidade, isto é, aquelas cujas propriedades estatísticas que descrevem o seu comportamento não se alteram ao longo do tempo, são séries estacionárias. Contudo, muitas séries temporais que representam fenômenos do mundo real são não-estacionárias, uma vez que exibem tais padrões (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018).

Existem diversos métodos de decomposição de séries temporais, como a decomposição tradicional por Médias Móveis, além de métodos mais sofisticados como a decomposição Sazonal e de Tendência usando *Loess* (STL). A decomposição STL é um método robusto e versátil desenvolvido por Cleveland *et al.* (1990). O método realiza uma decomposição do tipo aditiva e permite que parâmetros como a suavidade da curva de tendência e as variações na sazonalidade possam ser controlados pelo usuário. Além disso, o método é robusto em relação a *outliers*, de modo que valores excepcionais não influenciem a tendência e a sazonalidade, mas apenas a componente de resíduo.

Por meio da decomposição da série, pode-se medir a força das componentes de tendência e sazonalidade, segundo método proposto por Wang, Smith e Hyndman (2006). Em séries com forte padrão de tendência, a componente sazonalmente A_t ajustada deve apresentar variância maior em comparação à componente de resíduo

R_t . Por outro lado, em casos de pouca tendência, as variâncias de ambas as componentes são aproximadamente iguais. Desse modo, a tendência e a sazonalidade podem ser calculadas pelas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$F_T = \max \left(0,1 - \frac{\text{var}(R_t)}{\text{var}(T_t + R_t)} \right) \quad (1)$$

$$F_S = \max \left(0,1 - \frac{\text{var}(R_t)}{\text{var}(S_t + R_t)} \right) \quad (2)$$

O valor de $0 \leq F_T \leq 1$ é dado a partir da relação entre as variâncias da componente resíduo e da componente sazonalmente ajustada. Em relação à sazonalidade, pode-se medir sua força de forma similar, mas comparando a variância de uma componente sem tendência, isto é, $S_t + R_t$. O valor de $0 \leq F_S \leq 1$ para séries com pouca sazonalidade será próximo de 0, enquanto em séries com forte comportamento sazonal, será mais próximo de 1 (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018).

Uma outra característica importante das séries temporais é a relação de dependência existente entre os seus valores. A autocorrelação é uma medida de dependência que mensura a maneira como as observações em uma série temporal se relacionam entre si. Para isto, os valores defasados da série são utilizados. Defasar (*lag*) a série significa atrasar o seu valor em um determinado número k de observações. A autocorrelação, r_k , entre y_t e y_{t-k} é dada pela Equação (3).

$$r_k = \frac{\sum_{k=1}^n (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{k=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (3)$$

em que: \bar{y} é a média da série e n o número de observações.

Uma vez calculadas as correlações para diversos valores defasados, pode-se exibi-las graficamente, por meio da Função de Autocorrelação (ACF, do inglês *Autocorrelation Function*). A interpretação do gráfico da ACF pode revelar a existência de tendência ou sazonalidade nas séries (CHAN; CRYER, 2018).

Pluviometria

No estudo da pluviometria de uma região, são usados dados de estações pluviométricas dentro de uma área de interesse e em suas proximidades. Então, adota-se uma precipitação média na região, calculada por meio de métodos como o de médias aritméticas, o método dos polígonos de Thiessen ou das isoietas. Essa precipitação média considerada corresponde a uma lâmina d'água que cobre toda a área considerada (TUCCI, 2001).

Foram utilizadas 7 estações próximas ao poço estudado. Na seleção, não foram consideradas estações inativas, sem dados no período considerado ou com quantidade de registros insuficiente. Para cada estação, foram obtidas as séries mensais de precipitação total no período de agosto de 2011 a novembro de 2019. A precipitação média foi calculada para cada mês no período estudado utilizando o método dos polígonos de Thiessen, com uma área de influência total de 1.247 km². Em seguida, foi construída uma série temporal de precipitações.

Na aplicação do método dos polígonos de Thiessen, é definida uma área de influência para cada estação dentro da região de estudo, e a precipitação média é então calculada pela média ponderada das alturas pluviométricas em cada estação, de modo que os pesos são as áreas de influência. O traçado das áreas consiste em se traçar linhas retas que unam estações adjacentes, seguido pelo traçado das mediatrizes dessas retas. Os polígonos gerados pelas mediatrizes são os polígonos de Thiessen (TUCCI, 2001).

Tratamento dos dados e implementação computacional

As séries de precipitação, obtidas do portal da FUNCEME, e a dos níveis estáticos, disponíveis no portal da RIMAS, foram tratadas em Excel, a fim de se calcular as séries mensais de precipitação total e de níveis estáticos médios,

respectivamente. O traçado dos polígonos de Thiessen e o cálculo das áreas de influências foi realizado em QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021), e o estudo das séries temporais foi realizado em ambiente estatístico R (R CORE TEAM, 2013). O preenchimento de falhas nas séries foi feito por interpolação linear. A decomposição STL foi calculada pela função *stl*, utilizando 11 observações como janela de sazonalidade (parâmetro *s.window* = 11) e o método não robusto (parâmetro *robust* = FALSE).

Resultados e discussão

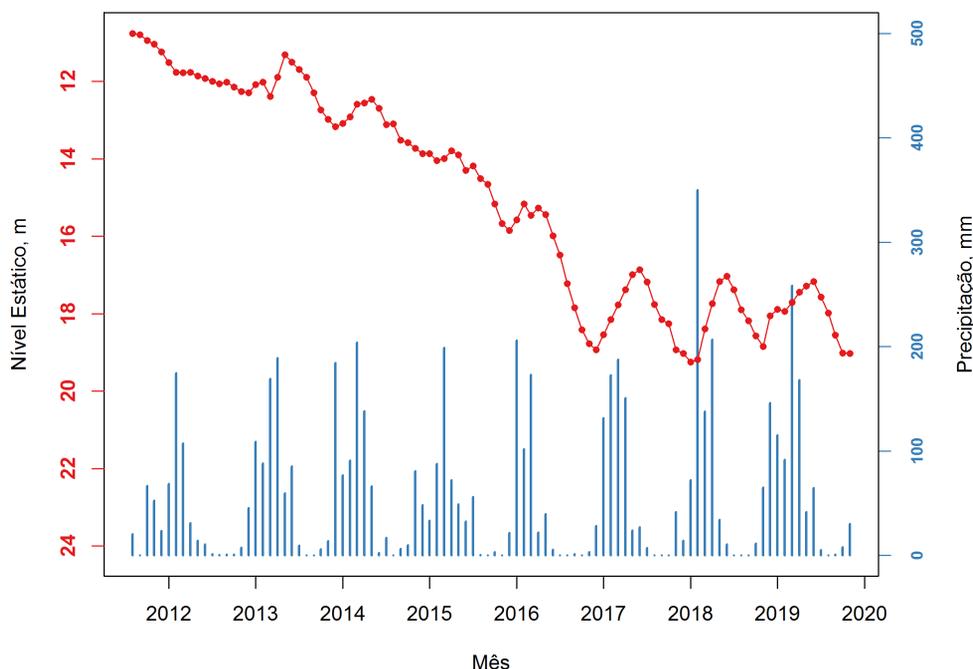
Análise das séries temporais

A série mensal de nível estático médio obtida no poço Água Vermelha apresentou no geral

um rebaixamento acentuado. O valor de nível mais alto registrado foi o primeiro da série, de 10,76 m em agosto de 2011, enquanto o mais baixo foi registrado em janeiro de 2018, equivalendo a 19,25 m de profundidade. Portanto, a amplitude da série foi de 8,49 m. O rebaixamento, do início da série até o último registro, compreendeu 8,30 m.

O acompanhamento da evolução dos níveis das águas subterrâneas é importante para a avaliação da disponibilidade hídrica. Os dados históricos de precipitação também são considerados na avaliação, uma vez que permitem mensurar a recarga dos sistemas aquíferos. A Figura 3 mostra a série mensal de níveis estáticos no poço Água Vermelha em comparação à série mensal de precipitação total na área de estudo.

Figura 3 – Evolução do nível estático médio mensal no poço Água Vermelha vs. Precipitação na área de estudo, no período de agosto/2011 a novembro/2019.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

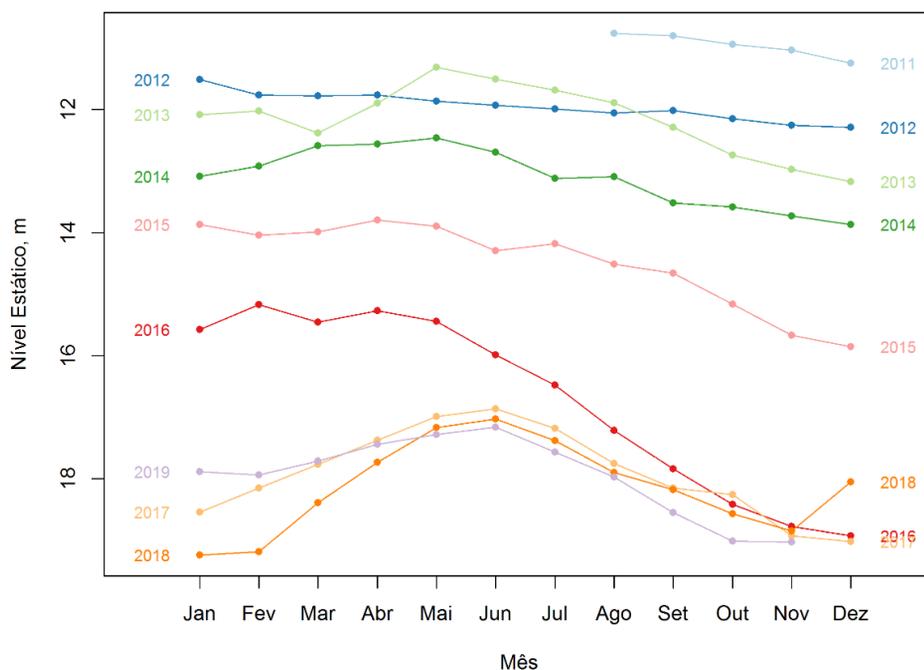
Analisando a série de níveis estáticos, percebe-se em longo prazo uma clara tendência negativa de 2011 a 2016, indicando o rebaixamento do nível. Em seguida, no período de 2017 a 2019, não há variações na tendência, e

um padrão de sazonalidade se manifesta, ocasionando um aumento periódico no valor da série no início de cada ano. Essa variação sazonal também se revela nos primeiros anos da série, mas de forma mais discreta.

Outra forma de se analisar mais claramente o comportamento sazonal da série é pelo gráfico de sazonalidade, mostrado na Figura 4. A tendência negativa ao longo de cada ano da série fica evidente, sendo o ano de 2016 o que apresentou o maior rebaixamento do nível estático. A partir do ano de 2017, o aumento periódico do nível

estático se inicia no mês de fevereiro, atingindo o valor máximo no mês de junho. Nos anos iniciais da série, também ocorre um aumento discreto no nível nesse período. De fato, isto se deve ao regime de chuvas da região, cuja estação chuvosa se inicia no mês de fevereiro e se estende até o mês de maio, apesar da variabilidade interanual.

Figura 4 – Gráfico de sazonalidade da série mensal do nível estático médio no poço Água Vermelha, no período de agosto/2011 a novembro/2019.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Em séries hidrológicas, a manifestação de padrões como tendência e sazonalidade ocorre em decorrência das variações naturais do clima ou da ação antrópica (KARAMOUZ; NAZIF; FALAH, 2012). O estudo individual desses componentes é útil no entendimento da série temporal, bem como para melhorar o desempenho das técnicas de modelagem e previsão. A decomposição STL da série mensal de níveis estáticos é mostrada na Figura 5. Analisando separadamente cada componente, percebe-se que neste método a sazonalidade é considerada dinâmica, aumentando ao longo dos anos, e o gráfico de tendência evidencia o rebaixamento do nível, seguido por um período de estabilidade. As barras verticais de cor cinza, no lado direito

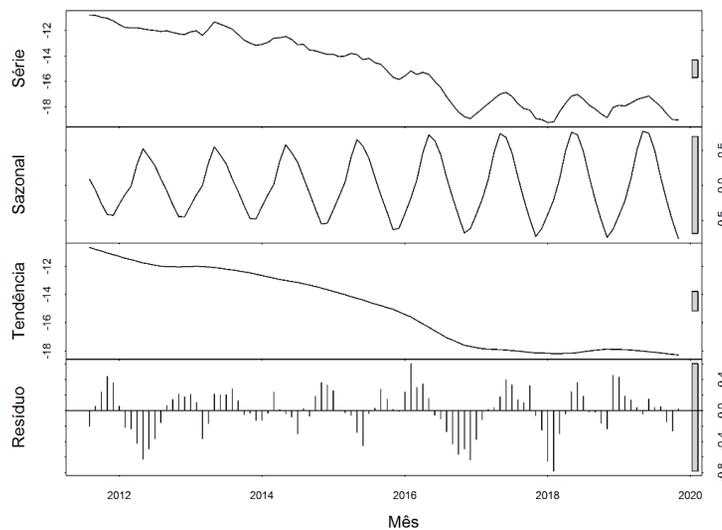
de cada gráfico, têm o mesmo tamanho, mas são expressas em escalas diferentes. A diferença no tamanho das barras implica dizer que as variações nos componentes de sazonalidade e de resíduo são pequenas em comparação às variações da série original, enquanto na tendência, as variações são grandes em relação às da série original. Isto permite inferir graficamente a força da tendência e da sazonalidade na série (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2018).

Outra maneira de se medir a presença das componentes tendência e sazonalidade é por meio da relação entre as suas variâncias e a variância da componente de resíduo. Desse modo, as Equações (1) e (2) foram aplicadas e

os valores obtidos foram $F_T = 0,9897$ e $F_S = 0,7166$. O valor de F_T próximo de 1 é um indicativo numérico da forte tendência presente na série e permite inferir que a tendência é a componente mais importante da série. O valor de F_S indica a existência de sazonalidade na série, embora se manifeste de forma menor em relação à componente de tendência.

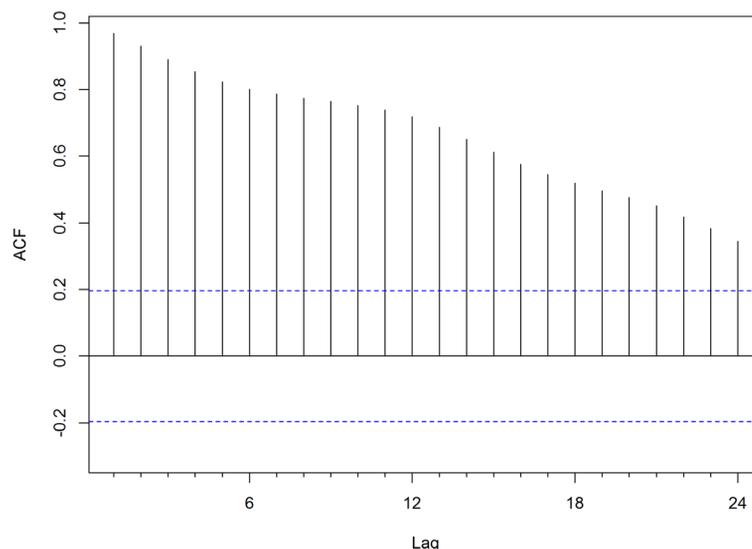
A autocorrelação existente entre as observações da série é outro fator importante no seu estudo. O gráfico da função de autocorrelação para a série mensal de nível estático até a defasagem (*lag*) 24 é mostrado na Figura 6. No eixo das abscissas, estão dispostos os valores defasados da série, isto é, os valores de y_{t-k} , em que k é a defasagem, enquanto o eixo das ordenadas é formado pelos valores da correlação entre as defasagens.

Figura 5 – Série mensal de nível estático médio no poço Água Vermelha (agosto/2011 a novembro/2019), e as 3 componentes aditivas obtidas por decomposição STL.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Figura 6 – Gráfico da Função de Autocorrelação (ACF) da série mensal de nível estático médio no poço Água Vermelha, no período de agosto/2011 a novembro/2019.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

O padrão exibido no gráfico é característico de séries com tendência, uma vez que a correlação é maior e positiva nos *lags* menores, enquanto decresce suavemente conforme maiores são os *lags*. Isso implica dizer que as observações da série têm forte relação com o valor observado nos meses imediatamente anteriores. Além disso, o valor de correlação significativo no *lag* 12 indica a sazonalidade anual da série.

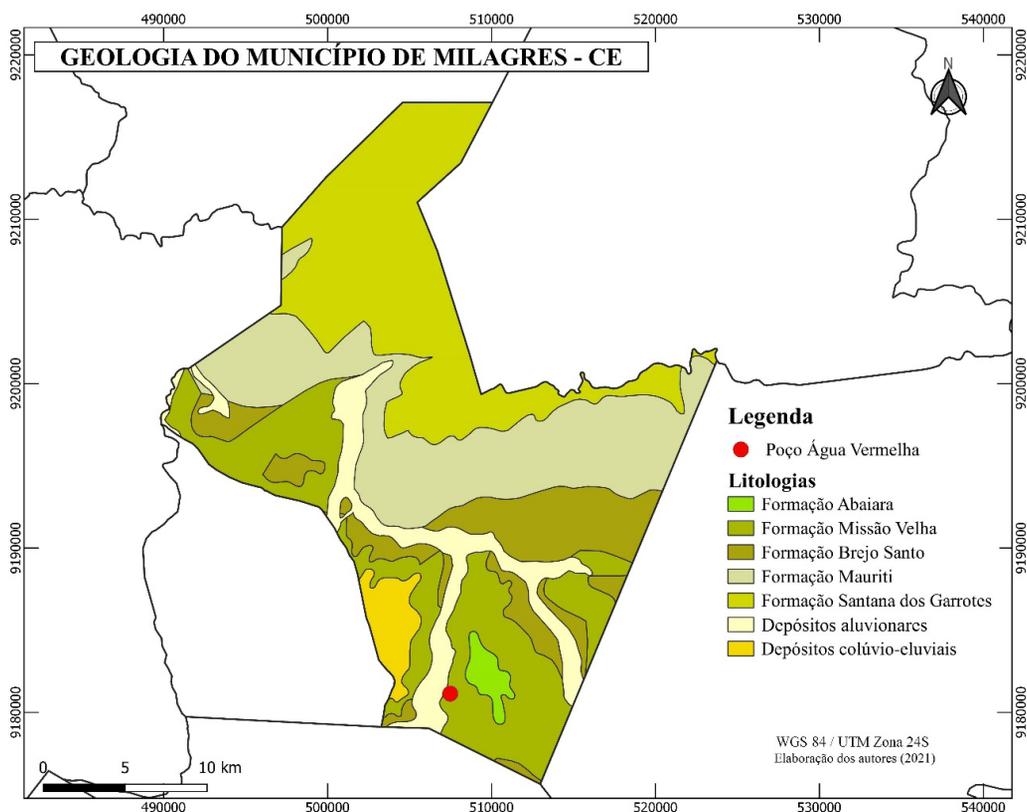
Aspectos ambientais da área de estudo

O rebaixamento dos níveis de água observado no poço, conforme destacado na Figura 3, reflete a situação do estado quantitativo do Sistema Aquífero Médio. Segundo o Boletim de Poços Monitorados no Cariri da COGERH

(2019b), observando-se o comparativo de 10 anos de monitoramento, de 2009 a 2019, a maior parte dos poços monitorados pelo órgão apresentaram rebaixamento, por vezes significativos, em relação aos valores iniciais. Quanto ao estado qualitativo das águas dos aquíferos da bacia do Araripe, autores como Gomes, Mendonça e Cavalcante (2019) destacam a vulnerabilidade e o risco de poluição aos quais estão submetidas as reservas.

Inserido no contexto geológico da bacia sedimentar do Araripe, o município de Milagres possui características litológicas que contribuem para o bom armazenamento de águas subterrâneas, como pode ser identificado a partir das suas litologias. A Figura 7 mostra o mapa geológico do município.

Figura 7 – Mapa geológico do município de Milagres, Ceará, com destaque para a localização do poço Água Vermelha, 2020.



Fonte: CPRM (2020).

Observa-se no território municipal que o contexto geológico de Milagres se caracteriza pela existência de rochas sedimentares derivadas da bacia sedimentar do Araripe. De acordo com a base geológica do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2020), a sua heterogeneidade litológica varia entre folhelhos silíticos (Formação Abaiara), arenitos grossos e finos, e conglomerados (Formação Missão Velha), além de folhelhos, argilitos e silíticos de cores variadas (Formação Brejo Santo), sobrepostos por arenitos de granulometria grossa (Formação Mauriti).

Com base nesta caracterização geral e identificado a partir do mapa, percebe-se que o poço estudado está instalado sobre a Formação Missão Velha. Em seus estudos, Camacho (2016) caracteriza essa localidade como o espaço subterrâneo onde há as águas do aquífero médio, situado acima de um aquitardo derivado da formação Brejo Santo. As condições litológicas nas quais está situado o poço Água Vermelha, caracterizadas por um substrato rochoso do tipo sedimentar, proporcionam as condições ideais para o

armazenamento de água subterrânea. Isto se deve ao tipo de rocha, em que há uma porosidade do tipo intersticial ou primária, característica de ambiente sedimentar com composição arenosa (REBOUÇAS, 2013).

O poço de monitoramento estudado se localiza em uma área relativamente distante da cidade. A Figura 8 mostra a área do entorno do poço estudado, a partir de imagens do satélite CBERS 4 obtidas da Divisão de Geração de Imagens (INPE, 2021), referente ao período de agosto de 2020. Ao mesmo tempo em que se observa um distanciamento do poço em relação ao espaço da cidade, identificam-se em suas proximidades áreas agrícolas. O poço Água Vermelha é um poço de monitoramento, de modo que não há bombeamento das suas águas. Contudo, os registros históricos da evolução dos níveis medidos revelam o rebaixamento significativo do nível de água no poço. Isso, por sua vez, indica que as águas dos sistemas aquíferos da região estão submetidas a perturbações decorrentes de fatores climatológicos e de ocupação da terra.

Figura 8 – Visualização do entorno do poço Água Vermelha a partir de imagem de satélite, agosto/2020.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

No contexto socioambiental, as águas subterrâneas provenientes da captação de poços perfurados são úteis no desenvolvimento de diversas funções, tanto no meio físico e biológico quanto no meio social. As águas subterrâneas são utilizadas para atividades como produção agrícola, atividades industriais, além do abastecimento populacional (MANZIONE, 2015). Vale destacar ainda que as águas subterrâneas no contexto dos ambientes semiáridos possuem maior importância, uma vez que constituem uma das principais formas de abastecimento de água. Tal fato se deve à irregularidade pluviométrica característica da região, bem como à característica de intermitência das bacias hidrográficas, em que a maioria delas chega a ter fluxo de água apenas no período da estação chuvosa (TEIXEIRA, 2003; WHEATER; MATHIAS; LI, 2010).

De maneira geral, mesmo detendo importância imensurável para espécie humana, os ambientes hídricos são os mais prejudicados pela ausência de proteção ambiental, sobretudo, pelo elevado índice populacional e pelo desordenado crescimento da ocupação do solo. Nos mananciais hídricos superficiais e nos ambientes subterrâneos, observa-se a contaminação da água, que degrada não só o espaço físico e biológico, mas atinge também a esfera social (SOARES, 2015).

Conclusão

Os métodos explorados no presente estudo permitiram a identificação e a descrição das principais características de séries temporais analisadas. O poço Água Vermelha apresentou rebaixamento significativo nos níveis de água, apesar da recarga durante a estação chuvosa. Diante da importância dos sistemas aquíferos da bacia sedimentar do Araripe, o estudo da evolução dos níveis d'água em poços monitorados e a avaliação dos aspectos ambientais na região permitem realizar o diagnóstico dos estados qualitativo e quantitativo das águas subterrâneas, bem como compreender a dinâmica regional e o comportamento dos aquíferos.

Referências

CARNIER NETO, D. **Análise das séries temporais de monitoramento de nível d'água em poços no aquífero Rio Claro**. 2006. vii, 61 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/92806>. Acesso em: junho/2021.

CAMACHO, C. R. **A influência da estruturação geológica sobre o fluxo das águas subterrâneas no Vale do Cariri – Bacia Sedimentar do Araripe - Ceará – Brasil**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará (Dissertação de mestrado), 2016, p. 19 – 33.

CHAN, K.; CRYER, J. **Time series analysis with applications in r**. New York: Springer, 2008.

CLEVELAND, R. B.; CLEVELAND, W. S.; MCRAE, J. E. STL: A seasonal-trend decomposition. **Journal of official statistics**, v. 6, n. 1, p. 3-73, 1990.

COGERH. **Plano de Monitoramento e Gestão dos Aquíferos da Bacia do Araripe**: Estado do Ceará. Fortaleza: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, CE, 2009.

COGERH. **Comitês de Bacias Hidrográficas**. Fortaleza: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, CE, 2019a.

COGERH. **Boletim de Monitoramento dos Poços com Datalogger no Cariri - CE (Ano de 2019)**. Fortaleza: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, CE, 2019b.

CORTES, F.; MARTELLI, C. M. T.; XIMENES, R. A. A.; MONTARROYOS, U. R.; SIQUEIRA JUNIOR, J. B.; CRUZ, O. G.; ALEXANDER, N.; SOUZA, W. V. Time series analysis of dengue surveillance data in two Brazilian cities. **Acta tropica**, v. 182, p. 190-197, 2018.

CPRM. **Hidrogeologia da porção oriental da Bacia Sedimentar do Araripe**: Diagnóstico do estado da arte. Brasil: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2005. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/10454/1/META_A.PDF. Acesso em: junho/2021.

CPRM. **Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas**. Brasil: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2009. Disponível em: http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/proposta_monitoramento_CPRM_2009.pdf. Acesso em: junho/2021.

CPRM. **Mapa geológico e de recursos naturais do estado do Ceará**. Brasil: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2020. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20418>. Acesso em: junho/2021.

CPRM. **Rede Integrada De Monitoramento de Águas Subterrâneas - RIMAS**. Brasil: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2021. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout>. Acesso em: junho/2021.

CROSBIE, R. S.; BINNING, P.; KALMA, J. D. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. **Water Resources Research**, v. 41, n. 1, 2005.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

GARJULLI, R. Os recursos hídricos no semi-árido. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 38-39, 2003.

GOMES, M. C. R.; MENDONÇA, L. A. R.; CAVALCANTE, I. N. Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas na Porção Leste da Bacia Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 252-259, 2019.

GOUVÊA, T. H. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: principles and practice**. Melbourne, Australia: OTexts, 2018. Disponível em: <https://www.OTexts.com/fpp2>. Acesso em: junho/2021.

HU, K. Z.; ZHANG, J. Z.; XING, L. T. Study on dynamic characteristics of groundwater based on the time series analysis method. **Water Science Engineering Technology**, v. 5, p. 32-34, 2001.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE: Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: junho/2021.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Divisão de Geração de Imagens (DGI)**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2021. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo>. Acesso em: junho/2021.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal de Milagres**. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE: Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/perfil-municipal>. Acesso em: junho/2021.

KABACOFF, R. **R in Action: Data Analysis and Graphics with R**. Manning, 2015.

KARAMOUZ, M.; NAZIF, S.; FALAHI, M. **Hydrology and hydroclimatology: principles and applications**. CRC Press, 2012.

- MACHIWAL, D.; NIMAWAT, J. V.; SAMAR, K. K. Evaluation of efficacy of groundwater level monitoring network by graphical and multivariate statistical techniques. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 48, n. 3, p. 36-43, 2011.
- MACHIWAL, D.; JHA, M. K. **Hydrologic Time Series Analysis: Theory and practice**. New Delhi, India: Springer, 2012.
- MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí, Paco Editorial, 2015.
- MORLEY, S.; ADAMS, M. Graphical analysis of single-case time series data. **British Journal of Clinical Psychology**, v. 30, n. 2, p. 97-115, 1991.
- MOURA-FÉ, M. M.; SILVA, M. J. A.; DIAS, V. P.; MONTEIRO, D. A.; SILVA, J. H. M.; RODRIGUES, R. M. Região Metropolitana do Cariri (RMC), Ceará: meio ambiente e sustentabilidade. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, v. 21, n. 2, p.1198-1216, 30 set. 2019.
- REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.
- REBOUÇAS, A. C. Águas Subterrâneas. In: GAIMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2. Ed. 2013, p. 17 – 56.
- SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples**. Springer, 2017.
- SOARES, G. C. S. **Cadeia causal da degradação de nascentes na bacia hidrográfica do Rio Gramame – Paraíba** (Dissertação). João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2016.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System, 2021.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. 2013.
- TEIXEIRA, F. J. C. **Modelos de gerenciamento de recursos hídricos: análises e proposta de aperfeiçoamento do sistema do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2001.
- VERÍSSIMO, L. S. **A importância das Águas subterrâneas para o Desenvolvimento socioeconômico do Eixo CRAJUBAR, Cariri ocidental - Estado do Ceará**. 1999. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.
- WANG, X.; SMITH, K.; HYNDMAN, R. Characteristic-based clustering for time series data. **Data mining and knowledge Discovery**, v. 13, n. 3, p. 335-364, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10618-005-0039-x>.
- WHEATER, H. S.; MATHIAS, S. A.; LI, X. **Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas**. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN978-0-521-11129-4.