

Mapeamento dos aspectos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas a partir de estatística multivariada e redes neurais artificiais

Mapping of groundwater hydrogeochemistry aspects through multivariate statistics and artificial neural networks

Jonatas Batista Mattos^{1*} , Manoel Jerônimo Moreira Cruz¹ ,
Francisco Carlos Fernandes De Paula² , Elinaldo Fonseca Sales¹ 

RESUMO

O objetivo central deste trabalho foi realizar o mapeamento dos aspectos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas usando a estatística multivariada e redes neurais artificiais como subsídio para identificação de padrões espaciais. Para tal, foi executado um estudo de caso em aquíferos no município de Lençóis, Bahia, na região da Chapada Diamantina, nordeste do Brasil. Foram realizadas campanhas de campo para coleta de coordenadas geodésicas e amostras de águas subterrâneas. Após análise laboratorial e determinação de dados analíticos, foi feita a interpretação dos processos ambientais com o uso da análise de agrupamentos e mapas auto-organizáveis, além de classificação das águas pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 396/2008. Para fins de mapeamento dos dados analisados, foram usadas técnicas de geoprocessamento no Sistema de Informação Geográfica. Os principais constituintes físicos e químicos analisados em dois períodos climáticos foram mapeados e divididos em sete agrupamentos. Foram identificadas quatro zonas no município, que apresentam diferentes contextos hidrogeoquímicos. As zonas dos setores leste/sudeste, sul (área urbana) e extremo sul apresentam as mais significativas alterações na hidrogeoquímica e qualidade das águas. O mapeamento, subsidiado pela estatística multivariada e redes neurais artificiais, se apresentou potencialmente útil em contribuir com as ações de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, como delimitação de áreas prioritárias, monitoramento de zonas de riscos de contaminação, além de intervenções de engenharia que eventualmente busquem o saneamento ambiental das águas subterrâneas.

Palavras-chave: mapas auto-organizáveis; qualidade da água; hidrogeologia; Chapada Diamantina.

ABSTRACT

The main objective this paper was to map the hydrogeochemistry aspects of groundwater using multivariate statistics and artificial neural networks as a subsidy to identify spatial patterns. For this, a case study was carried out in aquifers in the municipality of Lençóis (BA), in the region of Chapada Diamantina, Northeastern Brazil. Field campaigns were carried out to collect geodetic coordinates and groundwater samples. After laboratorial analysis and determination of analytical data, the environmental processes were interpreted by cluster analysis and self-organizing maps, as well as the waters classification through CONAMA Resolution no. 396/2008. For the purpose of mapping the analyzed data, geoprocessing techniques were used in GIS. The main physical and chemical constituents analyzed in two climatic periods were mapped and divided into seven clusters. Four zones that present different hydrogeochemical contexts were identified in the municipality. The zones of the east/southeastern, south (urban area) and south end sectors present the most significant changes in hydrogeochemistry and water quality. The mapping, supported by multivariate statistics and artificial neural networks, was potentially useful in contributing to the management actions of groundwater resources as delimitation of priority areas, monitoring of contamination risk zones and engineering interventions that eventually seek environmental groundwater sanitation.

Keywords: self-organizing maps; water quality; hydrogeology; Chapada Diamantina.

¹Universidade Federal da Bahia - Salvador (BA), Brasil.

²Universidade Estadual de Santa Cruz - Ilhéus (BA), Brasil.

*Autor correspondente: jon.geociencia@gmail.com

Recebido: 20/04/2017 - Aceito: 26/04/2018 - Reg. ABES: 178815

INTRODUÇÃO

A qualidade das águas é corriqueiramente pontuada como um fator determinante na proposição de determinadas atividades antrópicas em uma região. Conhecer quimicamente as águas, bem como as formas e condições que ocorrem no ambiente, é de suma importância para a definição de aptidões de uso dos recursos hídricos, como direcionam estudos executados em várias partes do mundo, a exemplo de Freeze e Cherry (1979), Menezes *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2017).

De acordo com Tundisi, Matsumura-Tundisi e Matsumura Tundisi (2008), as mudanças climáticas, a deterioração das águas superficiais e o aumento da demanda por água têm elevado exponencialmente a exploração das águas subterrâneas. Dessa forma, é fundamental conhecer as dinâmicas do ambiente hidrogeológico e os processos de superfície para uma gestão eficiente dos recursos hídricos, conforme apontam estudos desenvolvidos por Cao *et al.* (2016) e Costa *et al.* (2015). Para tal, medidas de engenharia podem ser adotadas, com o intuito de subsidiar a tomada de decisões.

Nesse cenário, a busca por ferramentas que possam otimizar os custos e o tempo na resolução de problemas hídricos é cada vez maior. A estatística multivariada fornece o aparato necessário para essa otimização, sendo capaz de estudar fenômenos complexos, manipular grandes populações amostrais com mínima perda de informações e revelar padrões específicos de cada ambiente (CORTES *et al.*, 2016; SAKO; BAMBA; GORDIO, 2016). Tem sido largamente aplicada nos estudos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos pela capacidade de representar adequadamente as variações hídricas no espaço e tempo, gerando hipóteses que preservam os níveis de significância, indicando as possíveis fontes de dispersão das observações, além de agrupar a população amostral a partir das similaridades (NEWMAN; HAVENOR; LONGMIRE, 2016; LIU *et al.*, 2017).

Para estudos de química da água, a análise de agrupamentos é comprovadamente útil, porém visualmente limitada para representar as fácies hidrogeoquímicas, seja a partir de uma modelagem linear ou espacial (GÜLER *et al.*, 2002). Os mapas auto-organizáveis (rede neural artificial) podem complementar a análise de agrupamentos, ou até mesmo servir como uma alternativa metodológica (ISERI *et al.*, 2009; NGUYEN *et al.*, 2015b). Caracteriza-se como uma ferramenta poderosa, capaz de ordenar dados multivariados através de similaridades, preservando a estrutura topológica e baseada em um algoritmo de aprendizagem não supervisionada (KOHONEN, 2001). O produto final dessa técnica é uma malha bidimensional (matriz — linhas e colunas) com posições estabelecidas para flutuação dos dados, facilitando o entendimento das similaridades, diferenças e variações.

Com o auxílio do Sistema de Informação Geográfica (SIG), essas técnicas podem ser exploradas para mapeamento e execução de análises espaciais, podendo fornecer um importante auxílio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos (MENEZES *et al.*, 2014; REISSLER & MANZIONE, 2016; WANG; HE; CHEN, 2012). Dessa forma, a

aplicação combinada de tais métodos pode se consolidar como uma maneira bastante eficaz de se conhecer detalhadamente as áreas prioritárias para gestão, dentro de uma proposta que inter-relaciona questões de abastecimento e qualidade da água subterrânea com aspectos socioambientais e demográficos.

O objetivo principal deste trabalho foi usar a análise de agrupamentos e os mapas auto-organizáveis (redes neurais artificiais) para identificar padrões espaciais dos aspectos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas a partir de dados analíticos (parâmetros físicos e químicos). Como objetivo específico, foi realizada a interpretação de dados analíticos, a fim de refinar o mapeamento pela identificação do padrão hidrogeoquímico e qualidade ambiental das águas subterrâneas de zonas estabelecidas no território de um município (Lençóis, Bahia) no nordeste do Brasil.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Lençóis localiza-se na região da Chapada Diamantina, mesorregião centro-norte do estado da Bahia, nordeste do Brasil, entre as coordenadas geodésicas 12°09'; 12°38'S e 41°08'; 41°30'W (Figura 1). Lençóis é um município de pouco mais de 11.500 habitantes, de acordo com a estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), e tem como principal atividade econômica o turismo, recebendo a maior parte dos visitantes da região da Chapada Diamantina.

Pela classificação internacional de Köppen (1948), a tipologia climática no município de Lençóis é do tipo Cwb (tropical de altitude). Apresenta duas estações bem definidas, com precipitação média anual de 1.107 mm, de acordo com dados de série histórica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (1943–2015) (INMET, 2016), que apresenta registros de valores anuais mínimo de 800 mm e máximo de 1.350 mm. Os campos rupestres dominam a paisagem local (MATTOS; DE PAULA, 2017), que se destaca como uma área de transição entre os biomas Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado, apresentando peculiaridades diversas de diferentes meios morfoclimáticos (AB'SABER, 2003).

No mapa-síntese da Figura 2, nota-se uma variedade de unidades geológicas e litologias, predominando rochas metassedimentares e algumas janelas de rochas sedimentares. A unidade geológica predominante é o Grupo Chapada Diamantina (formações Caboclo, Tombador e Morro do Chapéu). Há também o Grupo Paraguaçu (Formação Açuruá), Grupo Una (formações Bebedouro e Salitre) e coberturas detrito-lateríticas cenozoicas. Entretanto, os poços elencados para amostragem estão alocados nas formações Caboclo (quartzitos, pelitos, laminitos, siltitos), Tombador (conglomerados, arenitos conglomeráticos, arenitos, quartzitos), Salitre (calcarenitos, calcilitos, carbonatos) e nas coberturas detrito-lateríticas (areias, argilas, cascalhos e crostas lateríticas).

Os domínios hidrogeológicos predominantes no município de Lençóis são dos metassedimentos, de acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2005), ocupando 85% do território municipal. Os aquíferos

desse domínio são mistos (predominantemente fissural com janelas granulares), semiconfinados e com porosidade secundária (fraturas, fendas, falhas). Na porção leste do município, em uma estreita zona limítrofe, ocorrem aquíferos do tipo cárstico, que são constituídos por rochas químicas (calcários — carbonatos, metacarbonatos), semiconfinados, com porosidade tripla (sedimentos, zonas de fraqueza e carsificação). Ao sul, ocorrem aquíferos granulares de elevada porosidade primária, comportamento livre, formados por depósitos superficiais aluvionares e coberturas detrito-lateríticas (areias, argilas, cascalhos).

METODOLOGIA

Amostragem e análises hidroquímicas (campo e laboratório)

Foram realizadas duas campanhas, de acordo com a variação sazonal: uma em período chuvoso (dezembro de 2014) e outra na época de acentuada estiagem na região (setembro e outubro de 2015). Esse regime

hidrológico está assegurado pelos dados históricos de precipitação do município entre os anos de 1943 e 1972; 1961 e 1990; e 1992 e 2017. Os dados pluviométricos foram coletados pelo INMET por meio de estações automáticas.

Amostras de águas subterrâneas foram coletadas de 21 poços profundos (vide Figura 2), por intermédio de bombas de baixa vazão. Antes de cada coleta, realizou-se a purga dos poços, para descartar a água estagnada na coluna do poço. A profundidade média dos poços é de 84 metros. A distribuição espacial das estações amostrais foi condicionada pela disponibilidade dos poços. A coleta foi feita de acordo com os métodos internacionalmente padronizados pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Antes do campo, houve a descontaminação dos frascos de polietileno selecionados para amostragem. Os frascos foram banhados com detergente Extran não fosfatado a 5% por 24 horas. Após essa etapa, os frascos foram colocados no HNO_3 a 2,5% e, por fim, enxaguados com água deionizada. Os parâmetros físicos e químicos medidos em campo foram: condutividade elétrica,

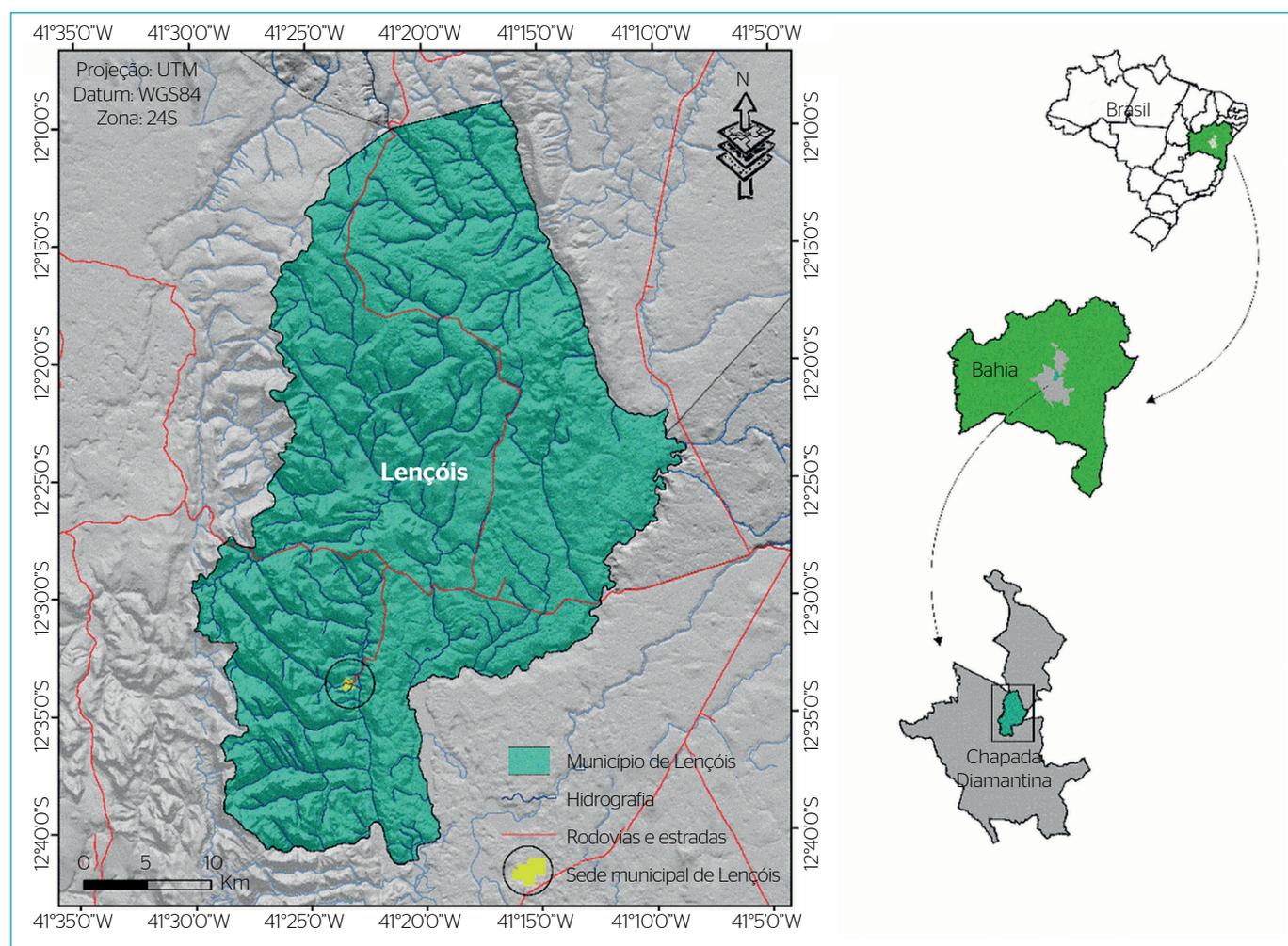


Figura 1 - Mapa de localização do município de Lençóis, Chapada Diamantina, Bahia.

sólidos totais dissolvidos e pH, todos obtidos através de aparelho medidor multiparâmetros Horiba U50, devidamente calibrado. As amostras coletadas foram conservadas a baixas temperaturas em frascos de polietileno de 1 L. Foram acondicionadas em caixas de isopor com gelo e transportadas até o Laboratório de Plasma do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (UFBA), e foram mantidas em refrigeração a 4°C até a realização das análises.

Para determinar o sulfato, nitrato, fosfato, alcalinidade e cloreto, as amostras, com volume de 1 L, foram filtradas no próprio ponto de amostragem com uso de bomba manual de vácuo e membrana Milipore 0,45 µm. Para os metais, usou-se a mesma frascaria para um volume de 1 L de água e o mesmo tipo de membrana para filtração, preservando-as em HNO₃ concentrado. As análises realizadas em laboratório seguiram as orientações técnicas do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Os ânions nitrato, sulfato e fosfato foram obtidos pelo método de absorção molecular de radiação monocromática em uma das regiões

do espectro eletromagnético por espectrofotometria óptica utilizando espectrofotômetro (HITACHI, modelo U-5100). A alcalinidade foi quantificada pelo método de titulação com ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,02 N; e o cloreto, através do método volumétrico de Mohr, no qual os íons cloreto são titulados com solução padronizada de nitrato de prata (AgNO₃) 0,01 N, na presença de cromato de potássio (K₂CrO₄) como indicador (APHA, 2012).

Os cátions Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Ba²⁺ e Fe³⁺, dissolvidos nas águas, foram determinados por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES 700 Series, da Agilent Technologies®). A leitura das amostras foi feita no Laboratório de Estudos do Petróleo (LEPETRO), Núcleo de Estudos Ambientais (NEA), Instituto de Geociências da UFBA. As linhas espectrais usadas foram: 568,821 nm para Na⁺; 766,491 nm para K⁺; 279,8 nm para Mg²⁺; 315,887 nm para Ca²⁺; 493,408 nm para Ba²⁺; e 407,771 nm para Fe³⁺.

O coeficiente (R²) das curvas de determinação foram: 0,998 para Na⁺; e 0,999 para K⁺; Ca²⁺, Mg²⁺, Ba²⁺ e Fe³⁺. O limite de determinação

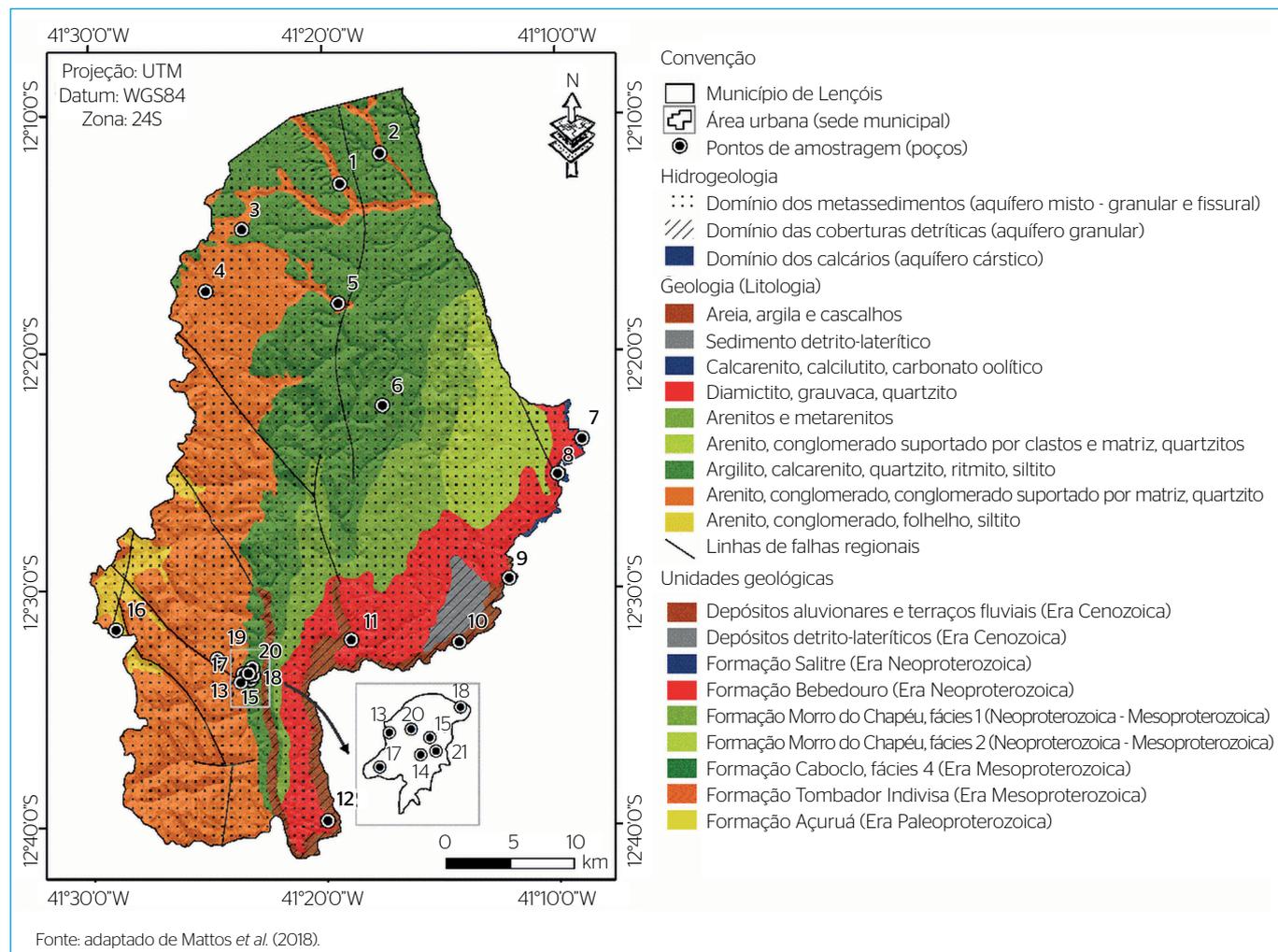


Figura 2 - Mapa de síntese litológica-hidrogeológica com estações amostrais.

foi de 0,03 para todos os cátions analisados. Para preparação das curvas de calibração, foram utilizadas soluções padrões (Merck S.A) para cada elemento, com concentração de 100 mg.L⁻¹.

Interpretação hidrogeoquímica e análise dos dados

Para interpretação dos dados analíticos, foram usadas técnicas de estatística multivariada (análise de agrupamentos) e redes neurais artificiais (mapas auto-organizáveis). Foram usadas também as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 (BRASIL, 2005) e nº 396 (BRASIL, 2008), além da Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914 (BRASIL, 2011), para determinar salinidade, classes de qualidade e padrões de potabilidade, respectivamente. Vale ressaltar que a Resolução nº 357/2005 (específica para águas superficiais) foi usada como alternativa para classificação das águas em doces, salobras ou salgadas, já que os demais elementos de padronização (para águas subterrâneas) citados anteriormente não dispõem de tal abordagem. Para espacialização dos agrupamentos e setores, foi usado o SIG, pelo *software* ArcGis® versão 10 (ESRI, 2010).

Análise de agrupamentos

Com a intenção de reduzir a dimensão dos dados e melhor elucidar as variáveis hidrogeoquímicas, foi aplicada a análise de agrupamentos, uma técnica que agrupa os conjuntos de dados de acordo com as semelhanças existentes entre as estações e períodos amostrais. Para a construção dos agrupamentos, foram utilizados todos os parâmetros analisados, com exceção dos sólidos totais dissolvidos (STD). O método usado para esse procedimento analítico foi o de Ward Jr. (1963), sendo ele hierárquico e tendo a distância euclidiana como medida de similaridade na análise de agrupamentos dos tipos de água, conforme orienta Nguyen *et al.* (2015a). Para a execução de tal análise, foi usado o *software* Microsoft Excel® (2016) com a extensão Action Stat® (ESTATCAMP; DIGUP, 2016).

Mapas auto-organizáveis (redes neurais artificiais)

A estrutura dos mapas auto-organizáveis (*self-organizing maps* – SOM) foi desenvolvida pelo professor Teuvo Kohonen (2001) e representa um tipo de rede neural artificial que se caracteriza por uma organização em arquitetura específica e por um treinamento não supervisionado. De acordo com Jin *et al.* (2011), essa rede neural pode projetar dados complexos e de grande dimensão em um mapa bidimensional, regularmente organizado, em proporção ao grau de similaridade. Na prática, os dados de entrada da rede neural são organizados de acordo com suas similaridades em agrupamentos, sob um plano bidimensional de visualização facilmente compreendida.

O algoritmo de Kohonen usa o método de aprendizagem por competição, o qual avalia os neurônios (nós) de saída da rede,

estabelecendo uma competição entre eles, sendo o neurônio vencedor aquele que possuir maior ativação. O processo de estruturação do mapa auto-organizável é de suma importância, conforme expõem Nguyen *et al.* (2015a), ao orientar sobre os processos de cálculo do número total de nós, dos comprimentos laterais e da seleção de um método de inicialização apropriado.

O método de inicialização usado neste trabalho foi o linear, já que é o mais adequado para classificação de padrões. Os vetores de referência foram atualizados no processo de treinamento, a partir do peso dos lotes (*batch weight mode*). A análise de agrupamentos foi útil para ajustar os vetores de referência ao fim do processo de treinamento. Além do agrupamento hierárquico, foi usada uma análise particional (*K-means*) de agrupamentos para auxiliar no processo de definição do número ideal de grupos, bem como no refinamento dos vetores de referência da rede neural (SOM). Todo o procedimento de treinamento da rede neural e a geração dos mapas auto-organizáveis foram feitos através do *software* MatLab®, versão R2017a (THE MATHWORKS INC., 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Agrupamentos das águas subterrâneas

A análise de agrupamentos foi executada para 13 parâmetros físico-químicos de 42 amostras, referentes aos 21 poços tubulares de 3 aquíferos diferentes durante as estações seca e chuvosa. Para identificar o número ideal de agrupamentos para cada uma das estações, foram realizados testes baseados no algoritmo de agrupamento *k-means*, no qual os nós foram calculados para um número mínimo de 2 e máximo de 42 possíveis agrupamentos.

A quantidade de agrupamentos identificada como mais apropriada para a população amostral total foi sete. Aplicou-se um algoritmo hierárquico usando o método de Ward Jr. (1963), a fim de gerar um dendograma que melhor ilustrasse os agrupamentos e suas respectivas distâncias e semelhanças. A Figura 3 mostra o dendograma com os sete diferentes agrupamentos, e é possível perceber um padrão estabelecido para pelo menos quatro diferentes contextos hidrogeoquímicos: grupos 1, 2; grupo 7; grupo 6; grupos 3, 4 e 5. Além disso, o dendograma mostra variações sazonais estabelecidas entre os grupos.

A Tabela 1 apresenta as medianas das concentrações, em mg.L⁻¹, dos 13 parâmetros físicos e químicos dos respectivos agrupamentos. Pela regra da análise de agrupamentos, os “grupos” 5 e 7 são denominados não grupos, por serem constituídos de apenas um elemento. Os respectivos valores desses grupos representados na tabela correspondem ao valor base dos poços P11C e P12C, logo, não há um valor de mediana. O mesmo se aplica ao grupo 6, contudo, esse é estabelecido com dois elementos, mas é inviável para gerar um valor de mediana.

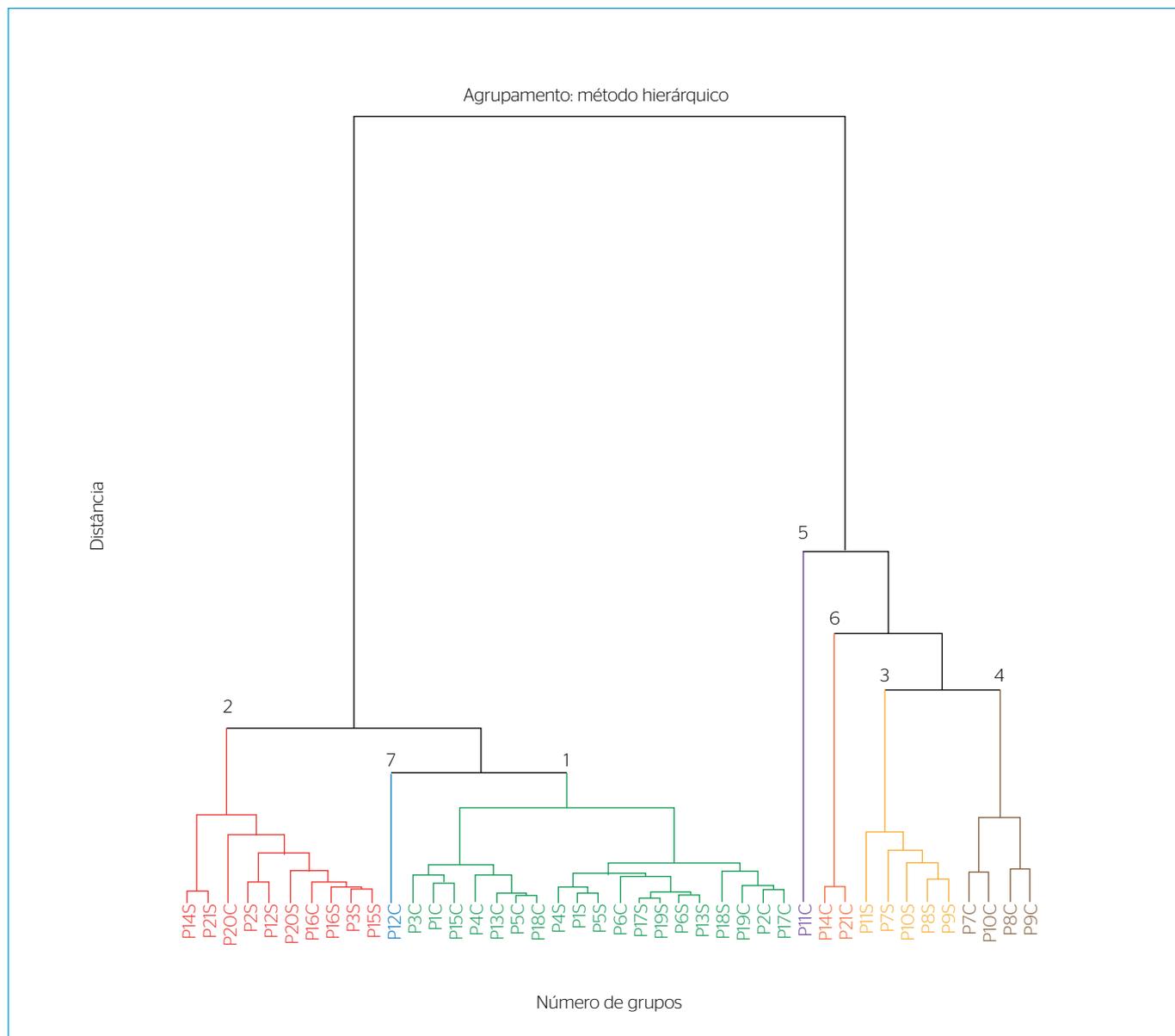


Figura 3 - Dendrograma com agrupamentos estabelecidos para os 21 pontos (42 amostras – seca/chuva).

Tabela 1 - Concentrações analíticas dos 13 parâmetros analisados para os sete grupos.

Grupos	CE	pH	HCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cl	NO ₃	PO ₄ ³⁻	Na ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ba ²⁺	Fe ³⁺
	(μS.cm ⁻¹)												
Grupo 1	37	5	< 1	< 0,1	3	< 0,1	0,1	4,1	1,4	0,3	0,3	< 0,03	< 0,03
Grupo 2	83	5	< 1	1,4	11	5	< 0,1	6,6	1	0,5	0,5	< 0,03	< 0,03
Grupo 3	440	7	190	2	31	1,1	0,2	13	4,4	24	12	0,2	< 0,03
Grupo 4	435	7,6	15,3	119	6,4	< 0,1	15,5	15	6,7	43	15	0,3	< 0,03
Grupo 5	476	7,8	17,7	400	3,8	< 0,1	45,7	14	4,2	71	5,1	0,05	3,2
Grupo 6	206	5,3	< 1	540	8,5	5,9	8,3	33	10	7	1,9	0,08	0,09
Grupo 7	92	5,8	< 1	91	2,7	< 0,1	39	13	1	3,7	0,7	< 0,03	0,07

CE: condutividade elétrica.

Observando simultaneamente a Figura 3 e a Tabela 1, é possível entender os tipos de dados que deram origem aos nós dos agrupamentos. Por exemplo, os agrupamentos 3, 4, 5 e 6 foram formados por seus pontos estarem fortemente associados a águas com maior teor de sais dissolvidos, como é possível ver na Tabela 1, que mostra valores mais elevados de condutividade elétrica e de alguns dos íons maiores. Por outro lado, as amostras de água subterrânea dos grupos 1 e 2 se posicionam em nós distantes dos demais nos dendogramas por conta de suas baixas concentrações de íons maiores dissolvidos.

O mapa da Figura 4 espacializa os pontos analisados, seus respectivos agrupamentos e as variações sazonais. Os grupos 4, 5, 6 e 7 são constituídos de pontos de amostras do período chuvoso, evidenciando alterações hidrogeoquímicas controladas pelo fator climático. Como é possível visualizar no mapa, os pontos dos grupos 1, 2 e 6 estão inseridos dentro do mesmo contexto hidrogeológico (metassedimentos), abrangendo áreas ao norte, ao centro e ao sul do município. O grupo 6 localiza-se especificamente na área urbana, sugerindo que sua característica hidrogeoquímica é comum a esse

ambiente. Os grupos 3, 4 e 5 ocorrem na faixa leste/sudeste do município, áreas de abrangência do domínio dos calcários. O grupo 7 ocorre no extremo sul do município, em uma área de hidrogeologia tipicamente granular (areias, cascalhos, argilas).

Interpretação dos aspectos hidrogeoquímicos dos agrupamentos

Para melhor interpretar os aspectos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas no município de Lençóis, foram formulados mapas auto-organizáveis para ilustrar os padrões, as variações e as correlações entre os pontos, agrupamentos e os 13 parâmetros analisados. Nos estudos de Hentati *et al.* (2010), Farsadnia *et al.* (2014) e Nguyen *et al.* (2015a), os mapas auto-organizáveis apresentaram alto desempenho em fornecer uma visualização e abstração de atributos através da distribuição espacial de cada componente analisada. A Figura 5 mostra os mapas auto-organizáveis dos 13 componentes, obtidos após o processo de treinamento. Cada mapa representa o valor dos vetores de referência dos componentes para 49 possíveis nós, nos quais os vetores foram

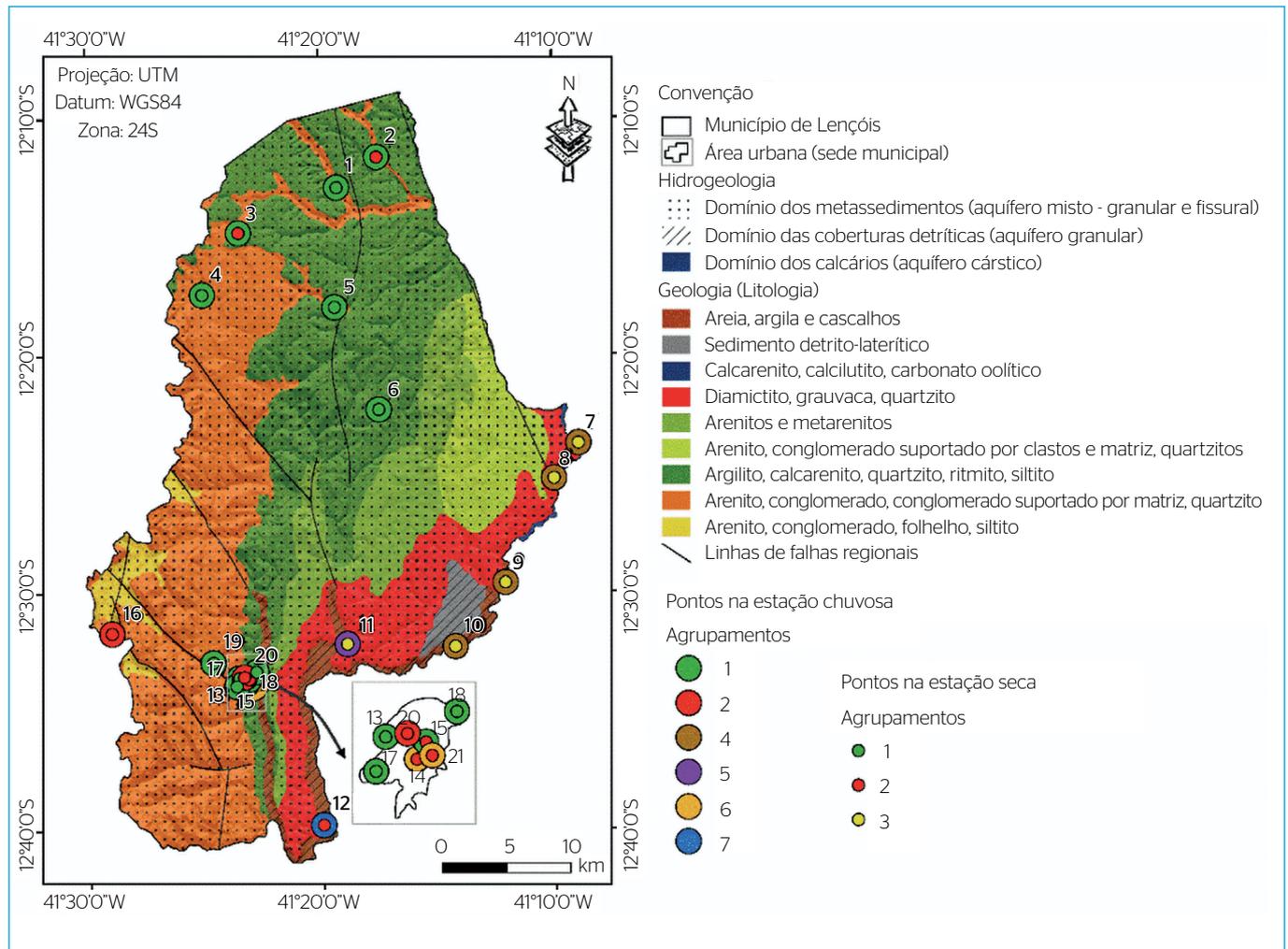


Figura 4 - Mapa de distribuição espacial dos agrupamentos.

padronizados para variar de 0 a 1, usando tons de cores quentes. Os nós que apresentam os maiores valores estão em amarelo e os menores, em preto.

Observando os mapas da Figura 5, é possível notar algumas semelhanças entre algumas posições e parâmetros, com destaque para a condutividade elétrica, pH, sulfato, cálcio e magnésio. No mapa da condutividade elétrica é possível notar duas zonas distintas, indicando possíveis diferenças hidrogeoquímicas a partir de diferentes litologias. Os nós da esquerda inferior e superior mostram sinais de valores maiores para a maioria dos parâmetros analisados, indicando as posições dos pontos com águas de maior teor de sais dissolvidos e maior alcalinidade. Por outro lado, os nós da direita inferior e superior ilustram um padrão de águas mais acidificadas e de baixo teor de sais dissolvidos. Conceição *et al.* (2014), em uma análise das águas subterrâneas na área urbana de Marília, São Paulo, encontraram um padrão entre o pH e a condutividade elétrica semelhante ao observado nas águas de Lençóis, padrão esse que apresenta um controle pelos mesmos processos hidrogeoquímicos.

No mapa referente ao bicarbonato, nota-se a ocorrência restrita a uma zona específica, indicando processos hidrogeoquímicos diferentes das demais zonas. O sulfato também apresenta uma diferença acentuada entre as zonas, sugerindo que a sua ocorrência nas águas subterrâneas é controlada por um condicionante natural bem específico. O cloreto

apresenta um padrão de delimitação bem nítido, indicando que sua zona de ocorrência em maiores concentrações é diferente dos demais ânions.

Para o nitrato não há um padrão nitidamente estabelecido, sugerindo que sua ocorrência pode se dar por fontes antropogênicas em zonas aleatórias. Silva *et al.* (2014), Oliveira *et al.* (2015) e Trindade *et al.* (2017) observaram altas concentrações de nitrato em corpos hídricos superficiais e subterrâneos, e associaram a origem desse ânion à disposição inadequada de resíduos sólidos e à gestão ineficiente de águas residuárias. O padrão estabelecido para o fosfato é similar ao do sulfato, indicando que em algumas zonas as ocorrências de ambos os íons podem estar correlacionadas à mesma fonte.

O comportamento geoquímico de associação que ocorre entre os cátions sódio e potássio reflete no padrão dos respectivos mapas da Figura 5, onde ambos se apresentam associados na maior parte das zonas. Cálcio, magnésio e bário também apresentam similaridades nas zonas em que ocorrem, indicando que os processos hidrogeoquímicos nas respectivas zonas podem partilhar das mesmas condicionantes geológicas. O padrão para o ferro ilustra uma ocorrência local, indicando um processo bastante específico para disponibilização de ferro dissolvido nas águas subterrâneas de uma das zonas estudadas.

O agrupamento hierárquico ilustrado pelo dendograma da Figura 3 serviu como referência para o estabelecimento de agrupamentos no

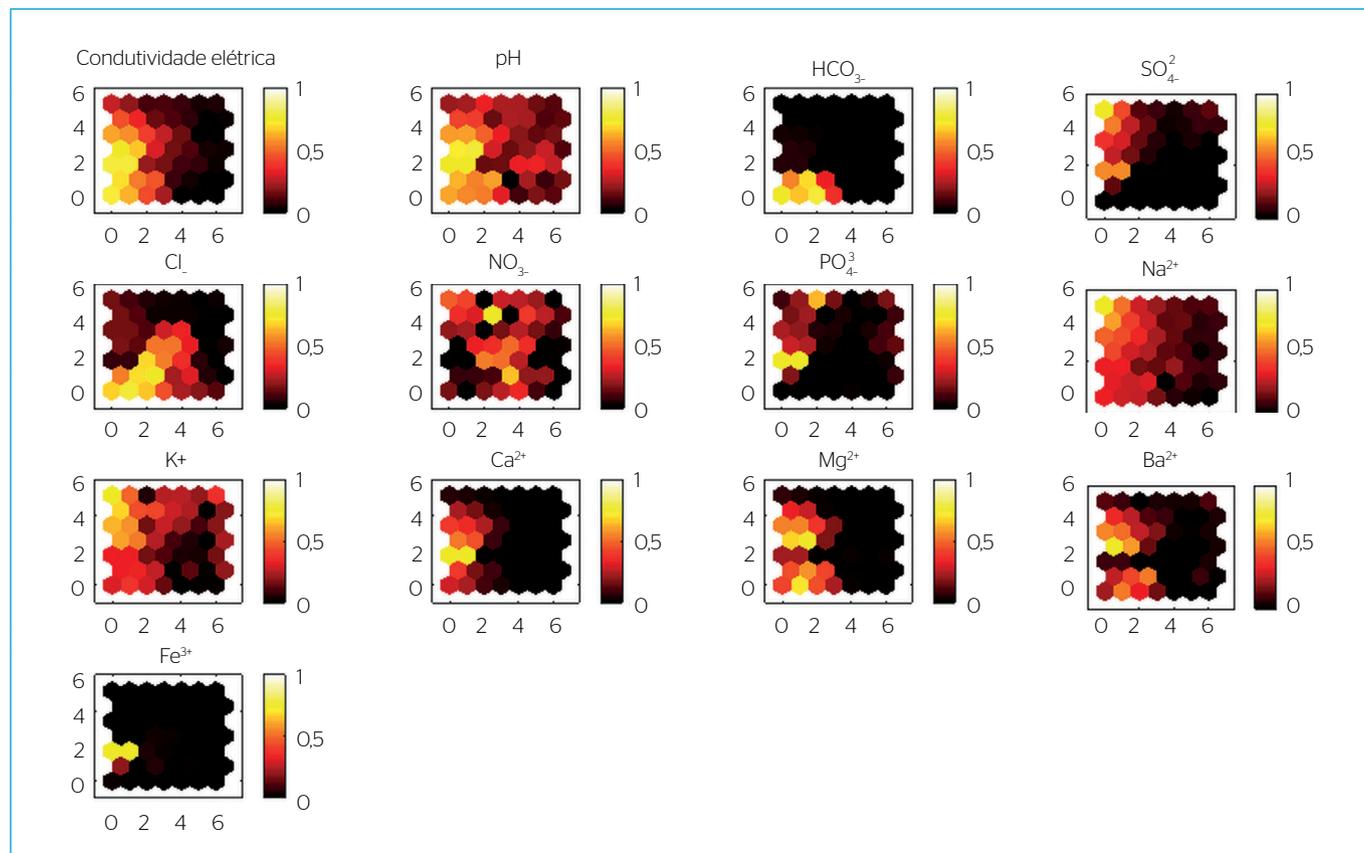


Figura 5 - Mapas auto-organizáveis com os 13 parâmetros analisados.

mapa auto-organizável da Figura 6. Assim como observado no dendrograma, no mapa auto-organizável nota-se que os grupos 1 e 2 apresentam maior representatividade espacial, além de menor distância ou maior semelhança entre os grupos. Do mesmo modo, os grupos 3 e 4 têm características semelhantes, sugerindo um mesmo contexto hidrogeológico para esses grupos.

Resguardadas as diferenças, o grupo 7 é mais similar aos grupos 1 e 2, e o grupo 5 e 6, mais alinhados aos grupos 3 e 4. Vale salientar que os pontos do grupo 6 estão inseridos no mesmo contexto hidrogeológico e litológico dos grupos 1 e 2 (Figura 4), estando distantes espacialmente dos grupos 3 e 4. Contudo, as similaridades contidas entre alguns aspectos hidrogeológicos entre o grupo 6 e os grupos 3 e 4 são causadas pelo fato dos pontos do grupo 6 estarem provavelmente controlados por fatores antrópicos, os quais, conforme mostram Silva *et al.* (2014), Hassane *et al.* (2016) e Mattos *et al.* (2017), apresentam a capacidade de aumentar a carga iônica nas águas subterrâneas.

Na Figura 6 estão plotados todos os poços analisados, as letras S e C representam as estações seca e chuvosa, respectivamente. Analisando simultaneamente a Figura 5 e a Figura 6, é descortinado o padrão hidrogeológico de cada um dos agrupamentos. Por exemplo, as águas do grupo 1 (domínio dos metassedimentos) são ácidas e apresentam a menor concentração para todos os íons analisados. O grupo 2 (domínio dos metassedimentos) apresenta águas também acidificadas, com reduzida concentração de quase todos os íons, com exceção dos ânions nitrato e cloreto. Isso se deve ao fato de alguns pontos desse grupo serem da área urbana (vide Figura 4), susceptível a contaminações de fontes difusas, como apontam Mattos *et al.* (2017). As águas dos grupos 3 e 4 (domínio dos calcários) são alcalinas e apresentam as maiores concentrações de íons entre os grupos. O grupo 3 é constituído de águas do período seco, sem recarga efetiva dos aquíferos, e tem os ânions bicarbonato e cloreto e os cátions cálcio e magnésio como os de maior atividade iônica. O grupo 4, por sua vez, apresenta águas do período chuvoso e tem o ânion sulfato e os cátions cálcio e magnésio como os

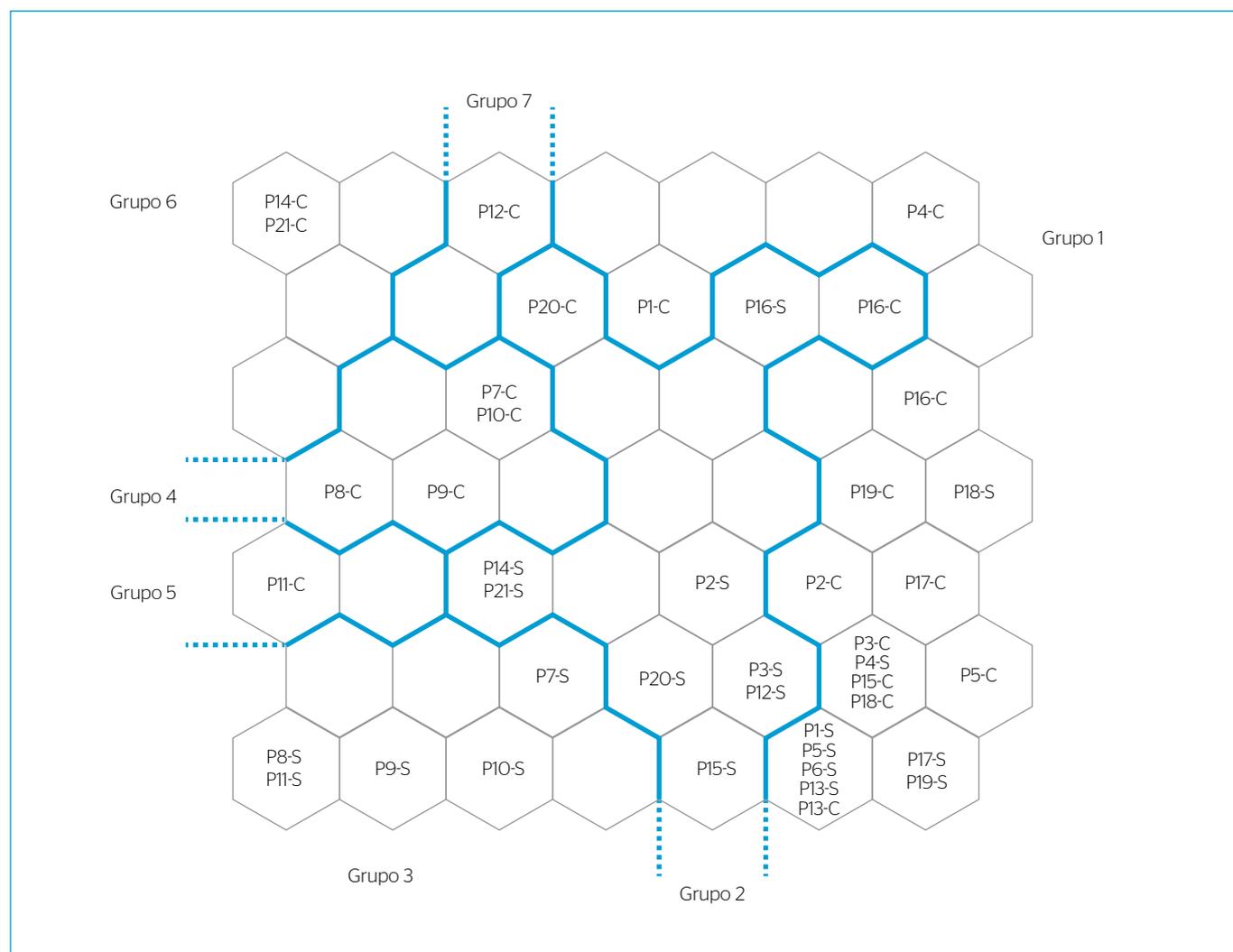


Figura 6 - Mapa auto-organizável com delimitação dos sete grupos calculados. Os números nos neurônios (nós) representam as estações amostrais ilustradas na Figura 2. As letras S e C correspondem aos períodos seco e chuvoso, respectivamente.

de maior atividade iônica. Esses resultados indicam variação sazonal caracterizada pela mobilização do ânion sulfato para a zona saturada dos aquíferos e a diluição do bicarbonato e do cloreto na zona saturada dos aquíferos, ambos os processos ocorrendo no período chuvoso. O grupo 5 (domínio dos calcários), constituído por águas do período chuvoso, também é alcalino, com maior concentração dos ânions sulfato e fosfato e dos cátions cálcio e ferro. A provável origem do fosfato nesse grupo-ponto está ligada a fontes antropogênicas (fertilizantes agrícolas). Já o sulfato pode estar associado ao ferro em uma mesma fonte geogênica, a qual tem os íons mobilizados para a zona saturada dos aquíferos. O processo que possibilita essa associação pode ocorrer em função de águas meteóricas, que ativam a mobilização e a hidrogeoquímica, conforme expõem Miotlinski, Postma e Kowalczyk (2012).

As águas do grupo 6 (domínio dos metassedimentos), que constituem águas do período chuvoso, são ácidas e apresentam maior concentração do ânion sulfato e do cátion sódio. Ocorre também em concentrações significativas o ânion nitrato, com provável origem antrópica. O grupo 7 (coberturas detríticas), constituído de águas do

período chuvoso, tem águas ácidas e apresenta como principal característica a concentração do ânion fosfato, de provável origem ligada a fertilizantes agrícolas usados nessa zona.

Mapeamento dos aspectos hidrogeoquímicos

Com a interpretação dos aspectos hidrogeoquímicos, padrões espaciais estabeleceram-se, e assim foi possível dividir o território municipal em setores, a partir das características hidroquímicas e geológicas dos aquíferos. Cada setor foi definido a partir das similaridades, diferenças e variações da química das águas subterrâneas dos grupos de poços. No SIG, através de uma simples vetorização manual, foram estabelecidos os limites das zonas (Figura 7). Vale ressaltar que, dependendo dos tipos de dados processados pela estatística multivariada, alguns processamentos de análises espaciais (geoestatística) podem ser de grande utilidade cartográfica, auxiliando o processo de delimitação das zonas.

Analisando a Figura 7, observam-se quatro setores que apresentaram águas com diferentes comportamentos hidrogeoquímicos. Pela Resolução

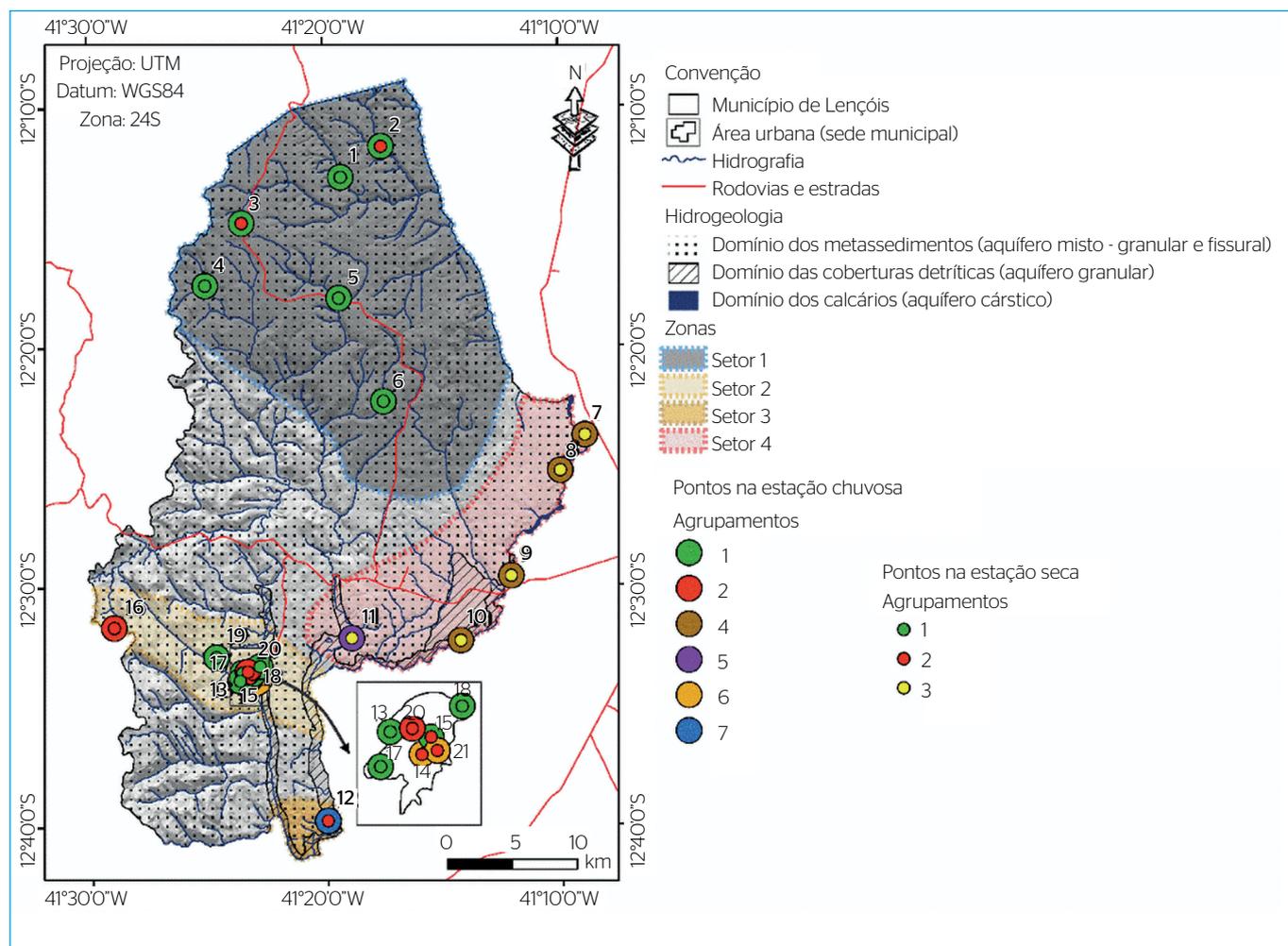


Figura 7 - Mapa com agrupamentos e zonas dos aspectos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas no município de Lençóis-BA.

CONAMA nº 357/2005, as águas de todos os setores e agrupamentos são classificadas como doces. As águas do setor 1, situado entre as zonas central e norte do município, são ácidas, moles e com baixa salinidade. De acordo com a Resolução CONAMA nº 396/2008, essas águas são de classe especial e apresentam elevada qualidade ambiental. Fatores naturais são os possíveis e principais controladores dos processos hidrogeoquímicos no setor 1; e de acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, nenhum dos íons analisados extrapolou o valor máximo permitido (VMP), em mg.L⁻¹.

O setor 2, situado na zona sul do município, abrangendo a área urbana e adjacências, apresenta águas também ácidas, moles e com baixa salinidade. Nesse setor ocorrem águas com traços de contaminação por nitrato e forte correlação com o cloreto (fontes antrópicas), conforme revela o estudo de Mattos *et al.* (2017), ao indicar que essa contaminação ocorre por conta da mobilização de águas residuárias (recarga artificial indireta). Resultados encontrados por Moura *et al.* (2015) e Oliveira *et al.* (2015) corroboram essa hipótese, ao detectarem comportamentos similares nas águas subterrâneas do município de São José do Rio Preto, em São Paulo, e Vilhena, em Rondônia. Pela Resolução CONAMA nº 396/2008, as águas do setor 2 são de classe especial (grupo 1), I (grupo 2), III e IV (grupo 6). De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, as águas do grupo 6 extrapolaram o VMP para o sulfato, que é de 250 mg.L⁻¹.

O setor 3, localizado no extremo sul do município, apresenta águas acidificadas, doces, moles e com traços de contaminação por fosfato, presente em fertilizantes agrícolas. A resolução do CONAMA coloca as águas desse setor como de classe II. Esse setor compreende aquíferos rasos e porosos, os quais tendem a apresentar maiores riscos de contaminação, como mostram estudos recentes de Hassane *et al.* (2016) e Schaidler, Ackerman e Rudel (2016), em ensaios hidroquímicos de águas subterrâneas em aquíferos livres. Pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, nenhum dos íons analisados nesse setor extrapolou o VMP.

As águas do setor 4, situado na zona leste/sudeste do município, são alcalinas, duras e com média salinidade. De acordo com a Resolução CONAMA nº 396/2008, as águas desse setor são enquadradas na classe II. Pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, as águas do grupo 5 extrapolaram o VMP para o sulfato, que é de 250 mg.L⁻¹, e para o ferro, que é de 0,3 mg.L⁻¹. No setor 4, fatores naturais (geoquímicos) são os processos predominantes que determinam o tipo da água. De acordo com Custódio e Llamas (1983) e Sawyer, McCarty e Parkin (2000), a maior parte das águas subterrâneas no município de Lençóis, que ocorrem sob o domínio hidrogeológico dos metassedimentos, é mole ou branda, estando associada aos setores 1, 2 e 3. Já as águas do setor 4, contidas no domínio hidrogeológico dos calcários, são duras ou moderadamente duras. Nenhum dos pontos extrapola o

VMP da Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde para dureza, que é de 500 mg.L⁻¹.

CONCLUSÕES

Os padrões espaciais identificados a partir da análise de agrupamentos e dos mapas auto-organizáveis nos dados analíticos (hidroquímicos) permitiram mapear no SIG, setores com diferentes aspectos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas no município de Lençóis. Com as similaridades, diferenças e variações identificadas, foi possível dividir as águas nos períodos chuvoso e seco, em sete agrupamentos, distribuídos em quatro zonas. Águas de baixa salinidade, ácidas, doces e moles ocorrem nas zonas central e norte (setor 1), zona sul (setor 2) e zona extremo sul (setor 3). Águas de média salinidade, alcalinas, doces e duras ocorrem na zona leste/sudeste (setor 4). Em síntese, duas zonas (setores 2 e 3) apresentam influência antrópica na hidroquímica das águas subterrâneas, sendo que nas demais zonas (setores 1 e 4), o clima e a geologia são os principais controladores dos aspectos hidrogeoquímicos dessas águas.

As águas subterrâneas do setor 1 apresentam elevada qualidade ambiental, não necessitando de ajustes em relação às variáveis hidroquímicas analisadas, apesar de não se considerar, por exemplo, as variáveis microbiológicas. Algumas águas compreendidas no setor 2, na faixa de área urbana, são de boa qualidade (grupos 1 e 2), outras (grupo 6), apresentam traços de contaminação por nitrato e sulfato advindos de fontes antrópicas (águas residuárias). As águas do grupo 6 necessitam de ajustes para adequação ao padrão de potabilidade estabelecido pela legislação brasileira em vigor. No setor 3, as águas são de boa qualidade, contudo, estão mais vulneráveis à contaminação antrópica, já que o aquífero local é raso, poroso e livre, estando susceptível a dinâmicas de mobilização de contaminantes sob superfície. As águas do setor 4 (grupos 3, 4 e 5) estão predominantemente controladas por processos geogênicos que definem as características hidrogeoquímicas naturais, e precisam de alguns ajustes para torná-las aptas para o consumo.

A metodologia usada para este ensaio científico mostrou-se eficaz para a realização de mapeamentos de hidroquímica e qualidade da água, com procedimentos cartográficos relativamente simples e objetivos. Vale ressaltar que existem múltiplas possibilidades de abordagem, por meio de análises espaciais avançadas e um robusto banco de dados, possibilitando, para estudos futuros, produtos de grande valor para a gestão integrada de recursos hídricos. Por fim, este tipo de mapeamento poderá contribuir com as ações de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, mediante a delimitação de áreas prioritárias, o monitoramento de zonas de riscos de contaminação, além de

intervenções de engenharia que eventualmente busquem o saneamento ambiental das águas subterrâneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o financiamento do projeto de pesquisa (código 001). Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia e ao Núcleo de Bacia Hidrográfica

da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), o suporte técnico e científico. À Associação de Condutores de Visitantes de Lençóis (ACVL), o apoio logístico. Aos revisores, a importante contribuição, por meio de dicas e sugestões para o aperfeiçoamento científico deste artigo.

FONTE DE FINANCIAMENTO

CAPES.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. (2003) *Os domínios de natureza no Brasil*. São Paulo: Ateliê Editorial.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). (2012) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, D.C.
- BRASIL. (2005) Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente.
- _____. (2008) Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. *Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008*. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, e dá outras providências. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente.
- _____. (2011) Ministério da Saúde. *Portaria nº 2.914/MS, de 12 de dezembro de 2011*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília: Ministério da Saúde.
- CAO, Y.; TANG, C.; SONG, X.; LIU, C.; ZHANG, Y. (2016) Identifying the hydrochemical characteristics of rivers and groundwater by multivariate statistical analysis in the Sanjiang Plain, China. *Applied Water Science*, v. 6, n. 2, p. 169-178. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0215-5>
- CONCEIÇÃO, F.T.; MAZZINI, F.; MORUZZI, R.B.; NAVARRO, G.R.B. (2014) Influências Naturais e Antrópicas na Qualidade da Água Subterrânea de Poços de Abastecimento Público na Área Urbana de Marília (SP). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 227-238. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p227-238>
- CONSULTORIA ESTATÍSTICA E QUALIDADE (ESTATCAMP); DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS E CONSULTORIA ESTATÍSTICA (DIGUP). (2016) *Action Stat*. São Carlos.
- CORTES, J.E.; MUÑOZ, L.F.; GONZALEZ, C.A.; NIÑO, J.E.; POLO, A.; SUSPES, A.; SIACHOQUE, S.C.; HERNÁNDEZ, A.; TRUJILLO, H. (2016) Hydrogeochemistry of the formation waters in the San Francisco field, UMV basin, Colombia - A multivariate statistical approach. *Journal of Hydrology*, v. 539, p. 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.010>
- COSTA, C.W.; MORAES, M.C.P.; CANÇADO, C.J.; GUERRERO, J.V.R.; MARANGON, F.; LORANDI, R.; LOLLO, J.A.; MOSCHINI, L.E. (2015) Potencial de Contaminação de Aquíferos por Atividades Antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio - Município de Leme - SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 1, p. 218-225. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p218-225>
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. (1983) *Hidrologia subterrânea*. 2. ed. Barcelona: Omega. 2v.
- ESRI. (2010) *ArcGIS (Version 10)*. Los Angeles: Environmental Systems Research Institute, Inc.
- FARSADNIA, E.; ROSTAMI KAMROOD, M.; MOGHADDAM NIA, A.; MODARRES, R.; BRAY, M.T.; HAN, D.; SADATINEJAD, J. (2014) Identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps. *Journal of Hydrology*, v. 509, p. 387-397. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.050>
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979) *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc.
- GÜLER, C.; THYNE, J.D.; MCCRAY, J.E.; TURNER, K.A. (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 4, p. 455-474. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- HASSANE, A.B.; LEDUC, C.; FAVREAU, G.; BEKINS, B.A.; MARGUERON, T. (2016) Impacts of a large Sahelian city on groundwater hydrodynamics and quality: example of Niamey (Niger). *Hydrogeology Journal*, v. 24, n. 2, p. 407-423. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-015-1345-z>

- HENTATI, A.; KAWAMURA, A.; AMAGUCHI, H.; ISERI, Y. (2010) Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. *Geomorphology*, v. 122, n. 1-2, p. 56-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.05.013>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2016) *Cidades - Estimativas de população*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2016/estimativa_tcu.shtm>. Acesso em: 17 mar. 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). (2016). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP*. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 18 nov. 2016.
- ISERI, Y.; MATSUURA, T.; IIZUKA, S.; NISHIYAMA, K.; JINNO, K. (2009) Comparison of pattern extraction capability between self-organizing maps and principal component analysis. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, v. 69, n. 2, p. 37-47.
- JIN, Y.H.; KAWAMURA, A.; PARK, S.C.; NAKAGAWA, N.; AMAGUCHI, H.; OLSSON, J. (2011) Spatiotemporal classification of environmental monitoring data in the Yeongsan River basin, Korea, using self-organizing maps. *Journal Environment Monitoring*, v. 13, n. 10, p. 2886-2894. <https://doi.org/10.1039/c1em10132c>
- KOHONEN, T. (2001) *Self-Organizing Maps*. 3. ed. Nova York: Springer.
- KOPPEN, W. (1948) *Climatologia con un estudio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura e Economica.
- LIU, P.; HOTH, N.; DREBENSTEDT, C.; SUN, Y.; XU, Z. (2017) Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions – Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches. *Science of the Total Environment*, v. 601-602, p. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.146>
- MATTOS, J.B.; CRUZ, M.J.M.; DE PAULA, F.C.F.; SALES, E.F. (2017) Tipologia hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas na área urbana do município de Lençóis, Bahia, Nordeste do Brasil. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 3, p. 281-295. <https://doi.org/10.14295/rasv31i3.28852>
- _____. (2018). Spatio-seasonal changes in the hydrogeochemistry of groundwaters in a highland tropical zone. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 88, p. 275-86. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.023>
- MATTOS, J.B.; DE PAULA, F.C.F. (2017). Análise geoambiental de uma microbacia hidrográfica no município de Lençóis, Chapada Diamantina (Bahia), Brasil. *Sociedade & Natureza*, v. 29, n. 1, p. 91-107. <https://doi.org/10.14393/SN-v29n1-2017-6>
- MENEZES, J.P.C.; BERTOSSI, A.P.A.; SANTOS, A.R.; NEVES, M.A. (2014) Correlação entre uso da terra e qualidade da água subterrânea. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 173-186. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522014000200008>
- MENEZES, J.P.C.; BITTENCOURT, R.P.; FARIAS, M.S.; BELLO, I.P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L.F.C. (2016) Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 519-534. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522016145405>
- MIOTLINSKI, K.; POSTMA, D.; KOWALCZYK, A. (2012) Variable infiltration and river flooding resulting in changing groundwater quality – A case study from Central Europe. *Journal of Hydrology*, v. 414-415, p. 211-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.034>
- MOURA, C.C.; GASTMANS, D.; KIANG, C.H.; MODESTO, R.P.; RODRIGUES, P.F.; RUBY, E.C.; BORGES, E.V. (2015) Concentrações de nitrato nas águas subterrâneas em áreas rurais do município de São José do Rio Preto (SP). *Águas Subterrâneas*, v. 29, n. 3, p. 268-284. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i2.27980>
- NEWMAN, B.D.; HAVENOR, K.C.; LONGMIRE, P. (2016) Identification of hydrochemical facies in the Roswell Artesian Basin, New Mexico (USA), using graphical and statistical methods. *Hydrogeology Journal*, v. 24, n. 4, p. 819-839. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-016-1401-3>
- NGUYEN, T.T.; KAWAMURA, A.; TONG, T.N.; AMAGUCHI, H.; NAKAGAWA, N.; GILBUENA JR., R.; BUI, D.D. (2015a) Identification of spatio-seasonal hydrogeochemical characteristics of the unconfined groundwater in the Red River Delta, Vietnam. *Applied Geochemistry*, v. 63, p. 10-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.07.009>
- NGUYEN, T.T.; KAWAMURA, A.; TONG, T.N.; NAKAGAWA, N.; AMAGUCHI, H.; GILBUENA JR., R. (2015b) Clustering spatio-seasonal hydrogeochemical data using self-organizing maps for groundwater quality assessment in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Hydrology*, v. 522, p. 661-673. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.023>
- OLIVEIRA, G.A.; NASCIMENTO, E.L.; ROSA, A.L.D.; LAUTHARTTE, L.C.; BASTOS, W.R.; BARROS, C.G.D.; CREMONESE, E.R.; BENTO, A.Q.; MALM, O.; GEORGIM, J.; CORTI, A.M. (2015) Avaliação da qualidade da água subterrânea: Estudo de caso de Vilhena – RO. *Águas Subterrâneas*, v. 29, n. 2, p. 213-223. <https://doi.org/10.14295/rasv29i2.28399>
- REISSLER, J.; MANZIONE, R.L. (2016) Classificação do uso da terra em área de afloramento do sistema aquífero guarani entre 2002 e 2011: o caso da bacia do ribeirão do Jacú, Tejuapá/SP. *Águas Subterrâneas*, v. 30, n. 2, p. 172-189. <https://doi.org/10.14295/rasv30i2.28512>
- SAKO, A.; BAMBA, O.; GORDIO, A. (2016) Hydrogeochemical processes controlling groundwater quality around Bomboré gold mineralized zone, Central Burkina Faso. *Journal of Geochemical of Exploration*, v. 170, p. 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.009>
- SAWYER, C.N.; McCARTY, P.L.; PARKIN, G.F. (2000) *Chemistry for sanitary engineers*. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill.
- SCHAIDER, L.A.; ACKERMAN, J.M.; RUDEL, R.A. (2016) Septic systems as sources of organic wastewater compounds in domestic drinking water wells in a shallow sand and gravel aquifer. *Science of the Total Environment*, v. 547, p. 470-481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.081>

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). (2005) *Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea. Diagnóstico do Município de Lençóis, Estado da Bahia*. Salvador: CPRM. 22 p.

SILVA, A.B.; BRITO, J.M.; SILVA, R.A.; BRAZ, A.S.; SILVA FILHO, E.D. (2017) Parâmetros físico-químicos da água utilizada para consumo em poços artesianos na cidade de Remigio-PB. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 2, p. 109-118. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i2.28807>

SILVA, D.D.; MIGLIORINI, R.B.; SILVA, E.C.; LIMA, Z.M.; MOURA, I.B. (2014) Falta de saneamento básico e as águas subterrâneas em aquífero freático: região do Bairro Pedra Noventa, Cuiabá (MT). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 1, p. 43-52. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522014000100005>

THE MATHWORKS INC. (2017) *MatLab R2017a*. Natick: The Mathworks Inc.

TRINDADE, A.L.C.; ALMEIDA, K.C.B.; BARBOSA, P.E.; OLIVEIRA, S.M.A.C. (2017) Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 1, p. 13-24. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016131457>

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; MATSUMURA TUNDISI, J.E. (2008) Conservação e uso sustentável de recursos hídricos. In: BARBOSA, F.A. *Ângulos da água: desafios da integração*. Belo Horizonte: Editora UFMG. p. 83-157.

WANG, J.; HE, J.; CHEN, H. (2012) Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*, v. 432, p. 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.005>

WARD JR., J.H. (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, v. 58, n. 301, p. 236-244.