



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ECOLOGIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: A INFLUÊNCIA DA
HIDROQUÍMICA NA COMPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DAS
COMUNIDADES DE INVERTEBRADOS AQUÁTICOS EM UM
AQUÍFERO CÁRSTICO.**

ANDRÉ VIEIRA DE ARAÚJO

SALVADOR- BA

2017

**ECOLOGIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: A INFLUÊNCIA
DA HIDROQUÍMICA NA COMPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO
DAS COMUNIDADES DE INVERTEBRADOS AQUÁTICOS
EM UM AQUÍFERO CÁRSTICO.**

André Vieira de Araújo

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Co-orientador: Prof. Dr. Doriedson Ferreira Gomes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

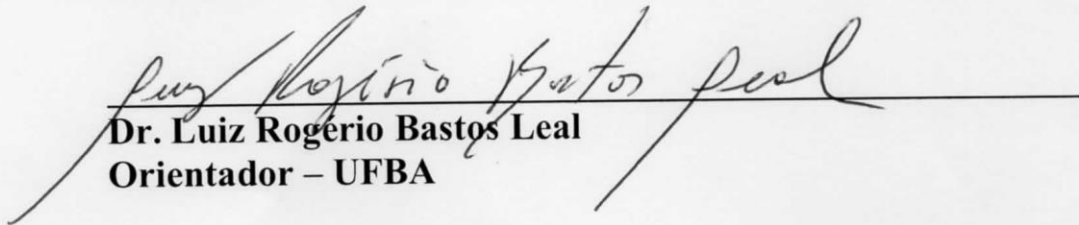
2017

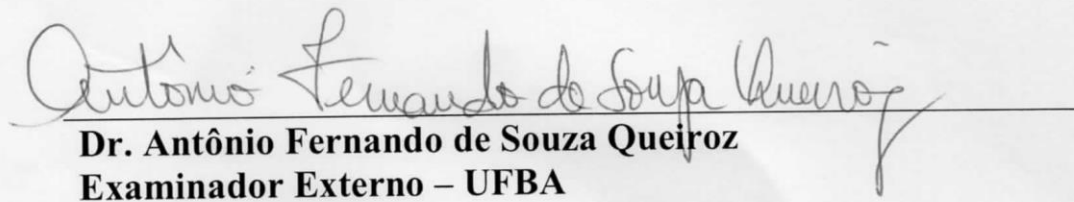
ANDRÉ VIEIRA DE ARAÚJO

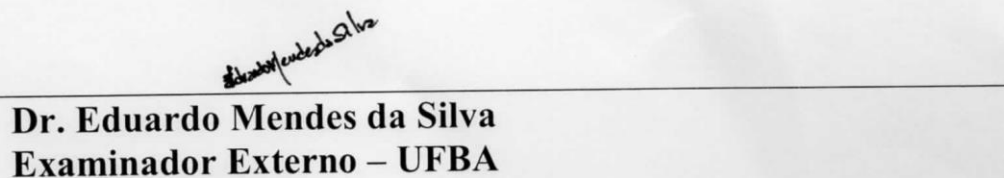
**“ECOLOGIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: INFLUÊNCIA
DA HIDROQUÍMICA NA COMPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO
DAS COMUNIDADES DE INVERTEBRADOS AQUÁTICOS
EM UM AQUÍFERO CÁRSTICO”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, em 22/05/2017.

DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:


Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Orientador – UFBA


Dr. Antônio Fernando de Souza Queiroz
Examinador Externo – UFBA


Dr. Eduardo Mendes da Silva
Examinador Externo – UFBA

Salvador – BA
2017

A todos que percorrem o árduo caminho em busca do conhecimento,

Dedico....

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer:

A meus familiares, em especial meu pai Daniel e minha mãe Marlene, pelo amor incondicional e total apoio e confiança.

À minha companheira, Isla Ribeiro de Almeida, pelo apoio em todas as minhas escolhas e paciência durante todo o tempo que dediquei a essa empreitada.

Aos meus orientadores, Luiz Rogério e Doriedson Gomes.

Aos amigos Gilmar D' Oliveira por sua inestimável contribuição nas figuras; Lucas Salles Queiroz pelo apoio e dicas durante toda a etapa da pós-graduação.

Ao casal Manoel Bernardo Junior e Lorena Bahia, pelo acolhimento em Salvador e por todo o carinho.

Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, por todo suporte.

À Universidade Federal da Bahia, em especial ao Instituto de Geociências, que me deu a oportunidade para aprender um pouco sobre Geologia Ambiental e Hidrogeologia.

A toda equipe da Sociedade Espeleológica Azimute, por todas as horas de boas cavernadas.

A todos, o meu mais sincero agradecimento,

André Vieira de Araújo

RESUMO

A fauna de águas subterrânea também conhecida como estigofauna fornece uma contribuição única e importante para diversos estudos ecológicos. No Brasil estudos de caracterização e distribuição de invertebrados em água subterrânea têm crescido significativamente. No entanto, aspectos ecológicos sobre a influência do habitat em invertebrados aquáticos, tais como anfípodes, ostracodas e copépodos, nas águas subterrâneas apresentam dados incipientes e fragmentados. Dessa forma, com este trabalho, objetivou-se amostrar simultaneamente a água e a fauna aquática encontrada em uma série de nove cavernas ao longo do rio Salitre, bem como discutir a influência da hidroquímica na estrutura da comunidade de invertebrados aquáticos subterrâneos ao longo de um eixo longitudinal, em uma bacia cárstica. Além disso, analisou-se o papel da dispersão e da vicariância aliada a mudanças climáticas para explicar o padrão biogeográfico de uma espécie de crustáceo endêmico da área amostrada. A amostragem foi realizada na bacia hidrográfica do rio Salitre, no centro norte do Estado da Bahia, durante as estações de seca e chuva, entre 2015 e 2016. Um total de 438 indivíduos, pertencentes a quatorze taxa, foram registrados em todas as amostras pertencentes aos seguintes grupos, em ordem decrescente de abundância relativa: Copepoda- Cyclopoida, Harpacticoida (58%), Ostracoda (20%), Acari (8%), Amphipoda (6%), Insetos - larvas (5%), Gastropoda (2%). Os pontos do aquífero caracterizados por águas mais cloretadas com maior concentração de nitratos, foram os que apresentaram maior riqueza e diversidade. Entretanto, a fauna encontrada nesses pontos foi caracterizada como abundante em organismos resistentes à poluentes (Ostracoda e larvas de insetos Chironomidae). As águas bicarbonatadas com menor concentração de nitrato foram as que apresentaram uma maior abundância e diversidade de invertebrados estigóbios, isto é, que são exclusivamente subterrâneos. Os resultados mostram que, apesar do aquífero possuir dois cenários geoquímicos no que diz respeito às classes químicas de água, essa condição parece não afetar a distribuição da espécie estigóbia *Spelaeogammarus trajanoae*. A vicariância, aliada a mudanças climáticas, pode ter um papel maior que a dispersão, para explicar a distribuição dessa espécie no aquífero cárstico estudado.

Palavras-chave: Aquíferos cárstico; Estigofauna; Caverna; Hidroquímica; Rio Salitre-BA.

ABSTRACT

Groundwater fauna also known as stygofauna provide a unique and important contribution to several ecological studies. In Brazil studies of the characterization and distribution of invertebrates in groundwater have grown significantly. However, ecological aspects on the influence of habitat on aquatic invertebrates such as amphipods, ostracods and copepods in groundwater present incipient and fragmented data. The objective of this work was to simultaneously sample the water and aquatic fauna found in a series of nine caves along the Salitre River as well as to discuss the influence of hydrochemistry on the structure of the community of underground aquatic invertebrates along an axis longitudinal in a karst basin. In addition, we analyzed the role of dispersion and vicariance allied to climatic changes to explain the biogeographic pattern of a crustacean species endemic to the area sampled. Sampling was carried out in the Salitre river basin in the north central state of Bahia during the dry and rainy seasons between 2015 and 2016. A total of 438 individuals belonging to fourteen taxa were recorded in all samples belonging to the following group Copepoda - Cyclopoida, Harpacticoida (58%), Ostracoda (20%), Acari (8%), Amphipoda (6%), Insects - larvae (5%), Gastropoda (2%). The points of the aquifer characterized by more chlorinated waters with higher concentration of nitrates were those that presented greater richness and diversity. However, the fauna found at these points was characterized as abundant in organisms resistant to pollutants (Ostracoda and insect larvae Chironomidae). The bicarbonated waters with lower concentration of nitrate were those that presented a greater abundance and diversity of stygobiont invertebrates, that is to say, that they are exclusively subterranean. The results show that although the aquifer possesses two geochemical scenarios with respect to the chemical classes of water, this condition does not seem to affect the distribution of the species *Spelaogammarus trajanoae*. The vicariance allied to climatic changes may play a greater role than the dispersion to explain the distribution of this species in the karstic aquifer.

Keywords: Karstic aquifers. Groundwater fauna. Biogeography. Hydrochemistry.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	7
CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1: The influence of hydrochemistry in the distribution to groundwater fauna of karst aquifer from a semi-arid region of Brazil.....	16
CAPÍTULO 3 - ARTIGO 2: Aspectos preliminares sobre o padrão biogeográfico de <i>Spelaeogammarus trajanoae</i> (Koenemann & Holsinger, 2000) Ordem Amphipoda no Aquífero cárstico da bacia do rio Salitre, Centro Norte do Estado da Bahia.....	37
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES	56
APÊNDICE A – Justificativa da participação dos autores nos artigos.....	57

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Esta dissertação é um estudo multidisciplinar sobre os aspectos ecológicos da água subterrânea de um aquífero cárstico. A seguir, estão descritos o referencial teórico que contextualiza o objeto de estudo, a localização da área, os objetivos e a justificativa para realização desta pesquisa.

Aquíferos cársticos

Cavernas fazem parte de um relevo rochoso chamado de carste, o relevo cárstico é formado por grandes volumes de rochas carbonáticas localizadas em áreas de recarga e descarga de águas, que drenam por percolação natural ou através de cavernas, formando os aquíferos cársticos (ZHANG et al. 2000).

As rochas calcárias, sendo muito propícias à ação dos processos de dissolução, de forma mais acelerada e intensa que na maior parte das outras litologias, tende a exibir uma paisagem característica denominada carste. São característicos ao carste: zonas sem correntes de água superficiais, a existência de cavidades subterrâneas pelas quais circulam corrente de águas subterrânea e grande rapidez da infiltração das chuvas e outras águas superficiais (SILVA, 2002; PESSOA, 2005).

As características superficiais e subterrâneas do carste são o produto de processos integrados do ciclo hidrológico e geoquímico. As características marcantes dessas paisagens cársticas são o resultado da ação da água que percorre passagens e condutos, esculpindo com o passar do tempo sua estrutura geológica (FORD & WILLIAMS, 2007).

Carste é um tipo de paisagem em que a troca entre as águas subterrâneas e superficiais resultam em um complexo e imprevisível aquífero (BONACCI et al., 2009). Sistemas de aquíferos cársticos são geralmente estruturados como uma rede ramificada caracterizada por uma série de condutos bem organizados, mas extremamente heterogêneos.

Os aquíferos cársticos fornecem aproximadamente 25% de toda a água utilizada para o abastecimento público no mundo, sendo, portanto, de grande importância econômica, além

disso, podem abrigar uma importante fauna sendo, portanto, alvo de estudos ecológicos (GILLIESON, 1996).

Ecologia da água subterrânea

A água subterrânea pode ser armazenada ou transmitida através de diferentes tipos de espaços vazios em rochas, que fornece uma vasta gama de habitat para uma diversidade de organismos. (GIBERT et al., 1994).

A biota encontrada na água subterrânea é conhecida como estigofauna. Os organismos encontrados na água subterrânea que não ocorrem nas águas superficiais são conhecidos como estigóbios e possuem adaptações para o ambiente subterrâneo. Essas adaptações geralmente incluem redução ou total ausência de olhos, a evolução de longos apêndices sensoriais que permitem movimento no escuro e um alongamento na forma do corpo permitindo deslocamento em pequenos espaços vazios. Os estigóbios são geralmente incolores e muitas vezes translúcidos. Em comparação com seus parentes na superfície, os estigóbios são de crescimento lento e vida longa (GIBERT, 1994; HUMPHREYS, 2009).

Os estigóbios invertebrados podem ser encontrados em qualquer ambiente subterrâneo, vivendo em espaços vazios dentro de rochas, variando em escala de espaços porosos entre grãos, em aquíferos porosos ou em fraturas, piscinas e rios subterrâneos em cavernas. Estigóbios apresentam uma gama de estratégias tróficas que vai do pastoreio de bactérias e biofilme de fungos, a predação de outros invertebrados (GIBERT et al. 1994). Outros organismos que normalmente vivem na superfície, mas também podem explorar os recursos em águas subterrâneas, são chamados estigófilos; enquanto estigóxenos são organismos que ocorrem em ambientes superficiais e são encontrados em águas subterrâneas apenas acidentalmente (HUMPHREYS, 2009).

Hidrogeologia e a ecologia da água subterrânea

A fauna exclusiva da água subterrânea pode proporcionar uma gama de serviços ecológicos, como consequências do papel que contribuem para ciclos biogeoquímicos e manutenção da qualidade da água através das suas interações com a comunidade microbiana, por isso, podem ser úteis como indicadores de boa qualidade das águas subterrâneas (TOMLINSON & BOULTON, 2010) e são cientificamente importantes por ser um

extraordinário exemplo de uma antiga fauna sobrevivente a longos períodos de mudança geológica e climática (HUMPHREYS, 2001; HANFLING et al. 2009).

Vários autores têm destacado a natureza interdisciplinar da ecologia das águas subterrâneas e a necessidade de colaboração entre ecólogos, biólogos e hidrogeólogos (GIBERT et al., 1994; HANCOCK et al., 2005; HUMPHREYS 2009; STEUBE et al., 2009).

Hidrogeologia é o estudo das características químicas e físicas das águas subterrâneas. A água subterrânea pode ser armazenada ou transmitida através de diferentes tipos de espaços vazios em rochas. A permeabilidade é uma propriedade intrínseca das rochas para a transmissão de fluidos; e a condutividade hidráulica é a capacidade das rochas para transmitir água e é dependente da permeabilidade. Um requisito comum das investigações hidrogeológicas é a caracterização do aquífero. Isso implica na compreensão das distribuições espaciais de fluxo e armazenamento de água, e como esses variam ao longo do tempo. Estudos das propriedades de aquífero (permeabilidade, transmissibilidade, armazenamento), distribuições de fratura, o fluxo nas zonas insaturada e saturada, ressurgências e testes com traçadores, podem contribuir para a caracterização do aquífero. Essas investigações são utilizadas para desenvolver modelos conceituais de como aquíferos funcionam, e onde massas de águas subterrâneas são ligadas entre si. A caracterização do aquífero e o desenvolvimento de um bom modelo conceitual são essenciais para a modelagem das águas subterrâneas, que é usada para investigar o fluxo e o transporte de contaminantes e garantir um uso sustentável dos recursos hídricos.

A estrutura das comunidades biológicas das águas subterrâneas pode ajudar a caracterizar aquíferos, indicando o grau de conectividade hidráulica dentro de aquíferos, e o grau de conectividade hidráulica entre uma parte de um aquífero e as águas de superfície (DOLE-OLIVIER & MARMONIER, 1992; ARIETTI & EDWARDS, 2006; HANH, 2006; BORK et al., 2009).

Estudos sobre a ecologia da água subterrânea podem ajudar a identificar o tempo de residência da água, e as interações com as águas superficiais e possíveis contaminantes. Hanh (2006), propôs um índice de fauna das águas subterrâneas que indica a quantidade de troca hidrológica entre as águas superficiais e subterrâneas. Águas subterrâneas com um elevado grau de intercâmbio com as águas de superfície foram identificadas como aquelas com altos níveis de oxigênio e detritos, e uma alta variabilidade na temperatura. Essas águas subterrâneas têm uma diversidade mais elevada e abundância de organismos endêmicos da água subterrânea chamados de estigóbios e proporções também mais elevadas de organismos

acidentais isto é, que não são frequentes na água subterrânea. O Índice da fauna de águas subterrâneas foi testado na Coréia do Sul por Bork e colaboradores (2009), que descobriram que enquanto a hidroquímica refletiu principalmente a origem hidrogeológica das águas (aluvião ou rocha), a variabilidade nas comunidades faunísticas refletiu o grau de interação entre água de superfície e águas subterrâneas. O entendimento da interação entre as águas superficiais e subterrâneas envolve múltiplas vertentes de provas; e dados da fauna aquática subterrânea são úteis em conjunção com a hidroquímica e dados microbiológicos para construir um quadro completo do sistema.

Hidrogeólogos também podem estar envolvidos na determinação da localização de insumos de águas subterrâneas para cursos de água superficiais, utilizando métodos tais como medição de fluxo e as medições de temperatura (HANCOCK et al., 2005). A presença de uma estigofauna em rios poderia potencialmente também ser usada como prova de entradas subterrâneas. Estudos de ecologia de águas subterrâneas podem fornecer informações na conectividade hidráulica dentro de aquíferos ou cavernas. Pipan & Culver (2007), investigaram grupos de crustáceos em gotejamentos de caverna. Eles demonstraram que alguns desses crustáceos estão presentes dentro de vários sistemas de cavernas, enquanto outros têm uma extensão lateral limitada, e algumas espécies parecem estar limitadas a uma única fonte de gotejamento.

Esses vários atributos indicam que a água subterrânea pode ser tão interessante para os biólogos, quanto para hidrogeólogos, e que ambas as disciplinas têm muito a aprender entre si. Trabalhando juntos para conseguir uma melhor gestão para utilização sustentável, a conservação e remediação de águas subterrâneas.

Hidroquímica e a ecologia da água subterrânea

As águas subterrâneas naturais, como consequência de sua composição química, bem como das condições do meio onde se encontram, apresentam uma série de propriedades ou características físicas e químicas, como: cor, turbidez, temperatura e condutividade elétrica, concentração de íons, que variam de acordo com o espaço e no tempo (RAVE, 2009).

A mobilidade geoquímica dos elementos dissolvidos na água está relacionada com a capacidade de trânsito no sistema litosfera-biosfera-hidrosfera-atmosfera, e está sujeita a fatores como a capacidade do elemento participar de processos de troca iônica, de suas ligações com a litosfera e biosfera e da solubilidade, que depende do potencial iônico de cada um dos íons dentre outros fatores geoquímicos (RAMAGE, 2005).

Alterações na química básica da água subterrânea podem provocar mudanças na composição das espécies, que trazem implicações para o funcionamento, e conseqüentemente, para os serviços ecológicos que uma comunidade pode fornecer. Boulton e colaboradores (2008), discutiram os fundamentos do funcionamento do ecossistema da água subterrânea, indicando que as diferenças sutis na química da água pode alterar a ecologia das águas subterrâneas.

Mudanças no equilíbrio iônico da água relacionadas às quantidades de cálcio, magnésio, sulfato e bicarbonato em soluções, apresentaram influência na diversidade da estigofauna que ocorre ao longo de uma vasta gama de água subterrânea salinizada, na Austrália (HUMPHREYS, 2009).

Estudos com Ostracoda, crustáceo que produz um escudo calcário, indicam que sua distribuição foi predominantemente determinada pela saturação do carbonato e diferenças no pH (KARANOVIC, 2007). Águas com pH baixo, com valores de Eh indicando um ambiente redutor, ou com uma concentração de nitrogênio em excesso, raramente contém Ostracoda (REEVES et al., 2007).

A fauna das águas subterrâneas é sensível a alterações nas características da água que habitam, e há cada vez mais evidências do potencial da fauna como indicadores (monitores) da qualidade das águas subterrâneas (SINTON, 1984; MALARD et al. 1996; SIMON & BUIKEMA, 1997; PLÉNET et al. 1992; MOSSLACHER et al. 2001; NOTENBOOM et al. 1994).

Assumindo que o aquífero tenha tamanho e conectividade suficiente é esperado que a água subterrânea de boa qualidade apresente uma estigofauna (KORBEL & HOSE, 2011), enquanto que uma biota estigóbia pode estar ausente, esgotada ou composta de diferentes espécies em águas subterrâneas contaminadas (MALARD et al., 1996; WOOD et al., 2008).

Descrição geral da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Salitre possui uma área de 13.467,93 km². A bacia é dividida em três sub-regiões, do sul para o norte: Alto, Médio e Baixo Salitre. 9°30'S, e 40°30'W (Silva, 2006).

Na bacia, as rochas do Proterozóico Superior (Grupo Una: Formação Bebedouro e Formação Salitre) e coberturas calcárias Cenozóicas (Formação Caatinga), são denominadas de domínio de aquífero cárstico (SILVA, 2006; RIBEIRO, 2005). O carste do Grupo Una apresenta sistemas de cavernas muito extensas incluindo a maior do Brasil, Toca da Boa

Vista, com 108km de galerias mapeadas. Contígua aos carbonatos Una, a Formação Salitre, encontra-se uma área cárstica, formada de rochas calcárias, relativamente recentes (Quaternário), referida como Formação Caatinga (AULER & FARRANT, 1996). Esses calcários foram formados por remodelagem dos calcários Una devido ao intemperismo, erosão e transporte de sedimentos durante carstificação da Formação Salitre. Esse último foi exposto no início do Paleogeno, há cerca de 65 milhões de anos atrás, enquanto a carstificação da Formação Caatinga provavelmente teria começado há cerca de 2,5 milhões de anos atrás.

A bacia está inserida no bioma caatinga. O clima é semiárido, com média anual pluviométrica de 490mm, concentradas entre os meses de fevereiro e maio. A temperatura média anual é cerca de 30°C (AULER et al., 2009).

Contextualização e apresentação do problema

Aquíferos cársticos, como os demais ecossistemas aquáticos, são ameaçados por diversas atividades antrópicas ligadas principalmente a agricultura e a mineração (SILVA, 2006). Para avaliar as resposta dos organismos que habitam o aquífero aos componentes químicos (contaminantes ou não), é necessário que se façam várias abordagens, dentre elas a caracterização da comunidade zooplancônica e do comportamento hidroquímico das águas subterrâneas e superficiais da bacia do rio Salitre.

- i) Há diferenças na hidroquímica da unidade geológica da bacia do rio Salitre?
- ii) Se houver, essa diferença condiciona a distribuição dos organismos?
- iii) Se afirmativo, em que medida?

Objetivos

O objetivo geral é investigar simultaneamente a fauna de invertebrados e as características físicas e químicas da água subterrânea em cavernas e mananciais da região cárstica da bacia do rio Salitre.

Objetivos específicos

- a) Discretizar estatisticamente e caracterizar os grupos hidroquímicos existentes no sistema aquífero na área estudada.
- b) Examinar a influência da hidroquímica na comunidade de invertebrados nos sistemas cársticos estudados.
- c) Caracterizar a distribuição das espécies endêmicas ao longo do aquífero.

Justificativa

A região cárstica da bacia do salitre é reconhecidamente de grande interesse político e econômico, por possuir valiosa reserva de água. O uso intensivo da agricultura irrigada, principalmente em Mirangaba e Campo Formoso, cresceu de forma desordenada na última década, e tem criado situações claras de conflito no uso das águas, fazendo dessa bacia um natural foco de interesse no gerenciamento de recursos hídricos no Estado (SANTOS et al., 2011). Esses fatores se configuraram como os principais motivos para se levantar dados qualitativos e quantitativos que possam auxiliar a buscar formas rápidas e seguras para diagnosticar a qualidade dos corpos hídricos, inseridos no contexto deste trabalho.

Dois artigos que são apresentados nos capítulos a seguir foram produzidos como resultado desta pesquisa. O primeiro artigo intitulado: “The influence of hydrochemistry in the distribution to groundwater fauna of karst aquifer from a semi-arid region of Brazil,” foi submetido ao periódico internacional *Hydrobiologia*, ISSN: 0018-8158.

O segundo artigo denominado “Aspectos preliminares sobre o padrão biogeográfico de *Spelaeogammarus trajanoae* (Koenemann & Holsinger, 2000) Ordem Amphipoda no aquífero cárstico da bacia do rio Salitre, centro-norte do Estado da Bahia,” a ser submetido à *Revista Brasileira de Espeleologia*: ISSN 2179- 4952.

Referências

- ARIETTI, M. & EDWARDS, B. Groundwater invertebrates in chalk boreholes and their significance in public water supply. Internal report for Three Valleys Water. 40 pp.2006.
- AULER A.S. & FARRANT, A.R. A brief introduction to karst and caves in Brazil. *Proc Univ Bristol Spelaeol Soc* 20:187–200.1996.
- AULER, A.S., SMART, P.L., WANG, X., PILÓ, L.B., EDWARDS, R.L. & CHENG, H. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology*. 2009. 106:142–153. doi:10.1016/j.geomorph.2008.09.020.
- BONNACCI, O., PIPAN T, CULVER, D. A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geology* 56: 891–900. 2009. DOI: 10.1007/ s00254-008-1189-0.
- BORK, J., BERKHOFF, S. E., BORK S. & HANH, H.J Using subsurface metazoan fauna to indicate groundwater-surface water interactions in the Nakdong River floodplain, South Korea. *Hydrogeology Journal* 17 (1), 61-75.2009.

- BOULTON, A. J., FENWICK, G.D., HANCOCK, P.J. & HARVEY, M.S. Biodiversity, functional roles and ecosystem services of groundwater invertebrates. *Invertebrate Systematics* 22 (2), 103-116. 2008.
- DOLE-OLIVIER, M. J. & MARMONIER, P. Ecological requirements of stygofauna in an active channel of the Rhone River. *Stygologia* 7 (2), 65-75.1992.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. London: John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- GIBERT J, VERVIER P, MALARD F, Laurent R Reygrobellet JL. 1994. Dynamics of communities and ecology of karst ecosystems: examples of three karsts in eastern and southern France. In: Groundwater Ecology (Eds J. Gibert , D.L. Danielopol & J.A. Stanford), Academic Press, San Diego, CA, 425– 450 p.
- GILLIESON, D. Caves: Process, development and management. Blackwell Publishers Inc., 324 pp, 1996.
- HANH, H. J. The GW-Fauna-Index: a first approach to a quantitative ecological assessment of groundwater habitats. *Limnologica* 36 (2), 119-139.2006.
- HANCOCK, P. J., BOUTON A. J. & HUMPHREYES, W. F. Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater. *Hydrogeology Journal* 13 (1), 98-111.2005.
- HANFLING, B., DOUTERELO-SOLER , I., KNIGHT, L. & PROUDLOVE, G. Molecular studies on the *Niphargus kochianus* group (Crustacea: Amphipoda: Niphargidae) in Great Britain and Ireland. *Cave and Karst Science* 35 (1-2), 35-40.2009.
- HUMPHREYES W.F . Groundwater calcrete aquifers in the Australian arid zone: the context to an unfolding plethora of stygal biodiversity. *Rec West Aust Mus (Suppl)* 64:63–83.2001.
- HUMPHREYES, W. F. Hydrogeology and groundwater ecology: does each inform the other? *Hydrogeology Journal* 17 (1), 5-21.2009.
- KARANOVIC, I. Candoninae Ostracodes from the Pilbara Region in Western Australia. *Crustac Monogr* 7:1–432.2007.
- KORBEL, K.L. & HOSE, G.C. A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health. *Hydrobiologia* 661 (1), 329-349. 2011.
- MALARD F, MATHIEU J, REYGROBELLET J.L. Biomonitoring groundwater contamination: application to a karst area in southern France. *Aquat Sci* 28:158–187.1996.
- MOSSLACHER, F., GRIEBLER, C. & NOTENBOOM, J. Biomonitoring of groundwater systems: methods, applications and possible indicators among the groundwater biota, pp 173–182. 2001.
- NOTENBOOM, J., PLÉNET, S. & TURQUIN, M-J. Groundwater contamination and its impact on groundwater animals and ecosystems.1994. In: Gibert J, Danielopol DL, Stanford JA (eds) Groundwater ecology. Academic, London, pp 477–504.

- PESSOA, P.F.P., Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG. Dissertação de Mestrado. UFMG 2005, 575 p.
- PIPAN, T. & CULVER, D.C. Copepod distribution as an indicator of epikarst system connectivity. *Hydrogeology Journal* 15(4), 817-822. 2007.
- PLÉNET, S., MARMONIER, P., GIBERT, J., STANFORD, J.A., BODERGAT, A.M., SCHMIDT, C.M. Groundwater hazard evaluation: a perspective for the use of interstitial and benthic invertebrates as sentinels of aquifer metallic contamination. Proc. First Int. Conf. groundwater ecology. Am Water Resour Assn, Bethesda, MD, pp 319–32.1992.
- RAMAGE, L. Hidrogeoquímica do sistema aquífero granular cenozoico do município de Porto Alegre, RS. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- RAVE, J. C. G. Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: Acuífero costero del municipio de Turbo. 2009. 296 f. Dissertação (Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos) – Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2009.
- REEVES, J., DECKKER, P., HALSE, S. Groundwater Ostracods from the arid Pilbara region of northwestern Australia: distribution and water chemistry. *Hydrobiologia* 585:99–118.2007.
- RIBEIRO, S. H. S. Estudo das águas subterrâneas da bacia do rio Salitre, Bahia. Salvador. 2005. 109f. Monografia (Graduação)-Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.
- SILVA, A.B. Hidrogeologia de Meios Cársticos. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 2002.
- SILVA, A. B. Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia – Salvador: CBPM, 2006. – (Série Arquivos Abertos; 24). Organização e síntese por: Luiz Luna Freire de Miranda e Luiz Rogério Bastos Leal.2006.
- SIMON, K.S. & BUIKEMA, A.L. Effects of organic pollution on an Appalachian cave: changes in macroinvertebrate populations and food supplies. *Am Midl Natur* 138:387–401.1997.
- SINTON, L.W. The macroinvertebrates in a sewage-polluted aquifer. *Hydrobiologia* 119:161–169.1984.
- STEUBE, C., RICHTER, S. & GRIEBLER, C. First attempts towards an integrative concept for the ecological assessment of groundwater ecosystems. *Hydrogeology Journal* 17, 23-35.2009.
- TOMLINSON, M. & BOULTON, A. Ecology and Management of subsurface groundwater dependent ecosystems in Australia – a review. *Marine and Freshwater Research* 61, 936-949.2010.
- WOOD, P. J., GUNN, J. & RUNDLE, S. D. Response of benthic cave invertebrates to organic pollution events. *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* 18 (6),909-922.2008.

CAPÍTULO 2

THE INFLUENCE OF HYDROCHEMISTRY IN THE DISTRIBUTION TO GROUNDWATER FAUNA OF KARST AQUIFER FROM A SEMI-ARID REGION OF BRAZIL.

André Vieira de Araújo ^a, Luiz Rogério Bastos Leal ^a, Doriedson Ferreira Gomes ^b

^a NEHMA /UFBA - Instituto de Geociências - Universidade Federal da Bahia Campus Ondina - Salvador (BA) - CEP 40210-340 , e-mail: anddrevieira@gmail.com

^b Departamento de Botânica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA, Brazil.

Keywords: Groundwater ecosystems; Groundwater fauna; Cave; Pollution.

ABSTRACT

We investigated how hydrochemical characteristics of karst aquifer may affect the distribution and composition of its associated Stygofauna assemblage (groundwater fauna). Along a north-south axis of a aquifer of Bahia State (Brazil), we detected clear physical and chemical differences in several variables, such as of temperature, total organic carbon and nitrate concentration. These variables have been shown to strongly affect the aquatic invertebrate community. Precisely, we observed that the most abundant faunal groups of included Crustaceans, with Copepoda, Ostracoda and Amphipoda. Locations characterized chlorine content and/or higher concentration of nitrates presented the greatest richness and diversity. However, at these locations, the associated fauna was characterized by a relatively high abundance of pollutants resistant taxa such as Ostracoda and larva Chironomidae. Locations characterized by higher bicarbonated and lower concentration of nitrate presented greater abundance and diversity of stygobitic organisms (i.e., obligate inhabitants of groundwater). These results suggest that the abundance and richness of stygobitic is affected for anthropogenic determinants.

Introduction

Caves are geological elements that are part of the rocky relief known as karst. Karstic systems are composed of large volumes of carbonate rocks located in areas of important water recharge and discharge, which drain by natural percolation, or through sinks (caves), forming karst aquifers (Zhang et al. 2000).

These karst aquifers form ecosystem type characterized by abundant microorganisms, including meiofauna (i.e., organisms ranging from 0.1 to 1mm in length) and macro-invertebrates (i.e., organisms visible to the naked eye). These ecosystems thus harbor different faunal groups, including species of surface water (i.e., accidental occurrence) and highly specialized organisms living exclusively in these groundwater ecosystems (i.e., Stygobitic) having evolved strategies to meet the constraints of energy-limited environments e.g., low light and heat (Langecker 2000).

While initially considered species-poor habitats, recent synthesis revealed that aquifer in karst are characterized by higher species richness than previously envisioned (Botosaneanu 1986; Moustaine et al., 2013). For instance, Botosaneanu (1986) listed nearly 7000 species exclusively found in subterranean ecosystems. Studies realized in temperate regions revealed that crustaceans often dominate stygobitic fauna (Pipan et al., 2008), with Harpacticoida Cyclopoida as the most divers and abundant groups (Moldovan et al., 2012). Although these studies provided insights to the nature of faunal composition of temperate aquifers, stygofaunal studies realized in tropical regions are far scarcer.

The Brazilian subterranean aquatic fauna has been chiefly the object of ichthyological investigations, which focussed on fish taxonomy and ecology (Mattox et al 2008; Bichuette & Trajano 2006). Regarding to macroinvertebrates, recent studies carried out or conducted in Brazil revealed the presence of 14 macroinvertebrates stygobitic species (Trajano & Bichuette 2010). However, meiofaunal components, such as crustaceans (e.g., Copepoda, Ostracoda and Cladocera) have been typically neglected from Brazilian speleofaunistic surveys.

Seminal studies described several species present in Brazilian karst aquifers. For example, in a cave of Parana State, Nogueira (1959) described a species of the Harpacticoida genus (*Elaphoidella bidens*). Likewise, studies realized in two caves of the karstic areas of Brasilia and Goiás revealed that Cyclopoida (Paracyclops, Tropocyclops, Eucyclops, Microcyclops) and Harpacticoida (*Elaphoidella*) were important faunal groups (Reid & José

1987). Despite this fragmentary knowledge, information on groundwater meiofauna remains scarce, impeding an adequate understanding of the factors shaping the structure of stygofauna communities. In turn, this lack of fundamental knowledge may compromise our ability to properly gauge environmental management strategies for these ecosystems.

Here, we investigated whether a range of groundwater variables (i.e., chemical, physical and hydrogeological) affects the distribution stygobitic fauna in caves of a single geological unit. In this work we seek to: *i*) identify the distribution of organisms at a regional scale and; *ii*) to determine whether relationships exist between the stygofauna and the environmental variables surveyed. Overall, this approach will allow us to determine which variables of the geological unit under investigation the distribution of stygofauna organisms.

Study area and sample sites

Located in the north-central part of the state of Bahia (Brazil), in the Salitre River basin is a sub-basin of the São Francisco River (**Figure 1**).

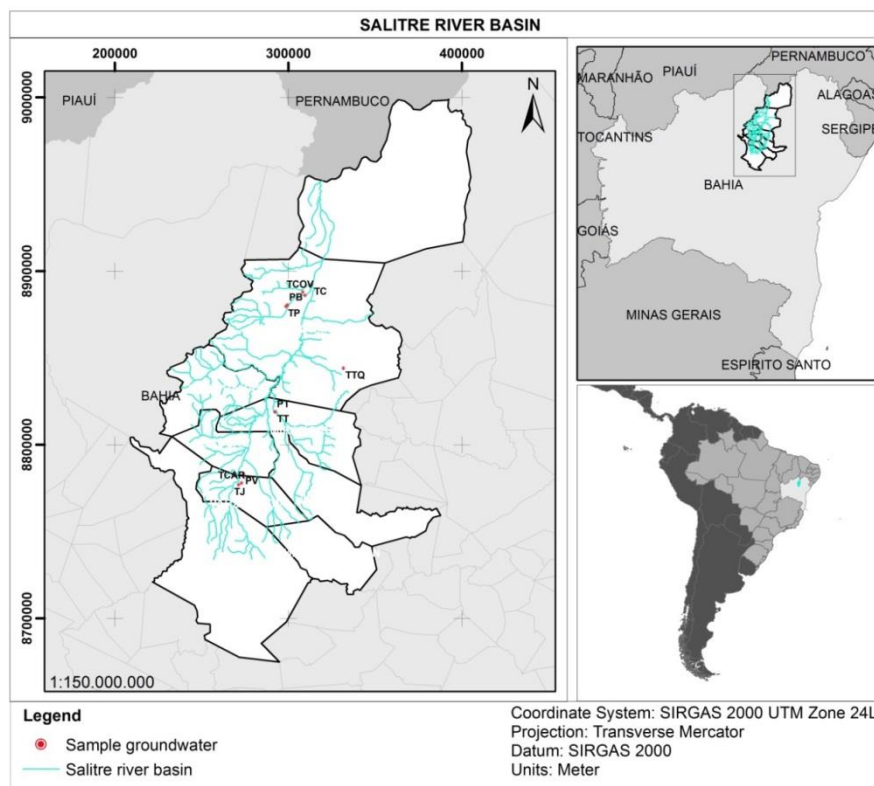


Figure 1. Basin of the Salitre River, indicating the sampling locations (Figure of the authors).

The hydrographic basin of the Salitre River has an area of 13,467.93 km² and is divided into three sub-regions, namely the Upper, Middle and Lower Salitre (Silva, 2006). In this hydrographic basin, the rocks of the Upper Proterozoic (i.e., the Una Group: Bebedouro Formation and Salitre formation) and cenozoic calcareous coverings (Caatinga Formation) are denominated by a karst aquifer domain (Silva, 2006; Ribeiro, 2005). The Una karst group features an extensive cave system. Contiguous to the Carbonates Una, the Salitre Formation, is a karst area formed of relatively recent calcareous (Quaternary) rocks, referred to as the Caatinga Formation (Auler & Farrant, 1996). The vegetation cover most of this basin's landscape is typical of Caatinga (i.e., drought-resistant) semi-arid climate (i.e., 490 mm of rainfall, yearly, concentrated between the months of February and May), average annual temperature of 30 ° C (Auler et al., 2009).

Methods

In the Lower and Upper sub-regions, samplings occurred in October 2015 (dry season) and April 2016 (rainy season), from 11 discrete sampling locations (**Table 1**).

Table 1. Coordinates and respective altitude of the sampling locations for each of the three sub-regions.

Sub-regions		Sampling locations	UTM_X	UTM_y	Altitude
Upper Salitre	TJ	Toca da Jurema	269896	8776668	551
	TCAR	Toca do Carlito	273037	8778064	575
	PV	Poço Verde	274184	8783194	573
	TT	Toca da Trincheira	292433	8818968	527
	PT	Poço Trincheira	292433	8818968	527
Medium	TTQ	Toca da Tiquara	331808	8844146	750
	TP	Toca do Pitu	298614	8879755	535
	PB	Poço Buraco	308148	8885794	506
	TM	Toca do Martiliano	309639	8886107	515
	TCOV	Toca do Convento	308300	8887978	518
Lower Salitre	TC	Toca do Cesário	313602	8892326	499

However, some locations (TCOV, TTQ, TCAR and TJ) were not sampled in both seasons and samples from the tubular wells did not involve faunal collection. Given these discrepancies in sampling procedure, the results pertaining to these locations are only used for descriptive purposes. At all locations, we analysed *in situ* the following variables: temperature ($^{\circ}$ C); electrical conductivity (μ S / cm); pH (pH units); dissolved oxygen (mg / L) and oxygen saturation (%); total solids dissolved (g / L) and ORP Reduction potential (mv). These variables were sampled using a multiparameter probe of the Horiba brand (model U-50G).

All hydrochemical analyzes were performed by Merieux Nutrisciences Salvador-BA as follow: metals determination was obtained by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Total nitrogen was determined by titulometric method. Finally, ions determination was obtained by ion chromatography with conductivity detection (**Table 2**).

The biological collections were carried out using plankton-trawling methods, with 60 μ m mesh net. These samples were conditioned in plastic flask with Transeau solution.

The organisms collected were identified at the lowest possible taxonomic level, using a stereomicroscope and specialized bibliography. For some groups however, identification was only possible at the family level (or higher) due to the limited knowledge of the groundwater biota of this region.

Table 2. Methodological references of hydrochemical analyzes.

Parameters	Techniques	Methodology
Metals	(ICP-MS)	Det.: SMWW, 22 ^a Ed. 2012, Method 3125 B EPA 3010 A: 1992 e EPA 3005: 1992
Anions	Ion chromatography	300.0: 1993, 300.1: 1999, POP PA 032 - Rev. 10 EPA
Total phosphorus	Colorimetric	Det.: SMWW, 22 ^a Ed. 2012 - Method 4500 P - Prep: SMWW, 22 ^a Ed. 2012 – Method 4500 P - B
Organic carbon	Oxidation	SMWW, 22 ^a Ed. 2012 - Method 5310 B e C
Total nitrogen	Titulometric	POP PA 005 - Rev. 07

Statistical analyses

Between the sampling locations, the relative similarity in biotic and abiotic variables was established through Cluster analysis (Bray-Curtis) and the taxonomic diversity was determined by using the Shannon- Winner and Simpson Indexes. The integrated analyses between the abiotic and biotic variables were performed using canonical correspondence (CCA). All statistical analyses were performed using the PAST 3.0 program, using transformed data (i.e., $\log x + 1$). The Hydrochemical diagrams were made using Qualigraf Software (FUNCEME, 2015).

Results

Environmental characteristics

In terms of physical and chemical variables (**Table 3** and **4**), sampling demonstrates clear dissimilarities along the sub-regions of the Salitre aquifer. For example, electrical conductivity, dissolved oxygen, salinity and total dissolved solids show significant differences between the Lower and Upper regions. Total salinity, dissolved solids and consequently the electrical conductivity, are shown to decrease from the Upper to Lower Salitre regions. By contrast, groundwater's dissolved oxygen and oxidation potential increased from the Upper to Lower Salitre regions. However, in terms of pH we observed little differences among regions with the water of the PV location (Upper Salitre) being slightly more acidic than any of the others sampling locations. Overall, we observed a difference in temperature of 3 °C between the sampling locations from the highest (TP) and lowest (TC) mean temperature.

Table 3. Summary of the averaged physical and chemical variables of the different sampling location of the Upper and Lower Salitre karst aquifer.

SAMPLE	EC μs/cm	pH	D.O mg/L	TDS mg/L	ORP mv	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na mg/L	K mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	COT mg/L
Upper SALITRE														
PV	1385	6.67	4.48	888.5	122.5	158	43.25	31.87	7.03	307	62.2	226.5	12.95	0.9
PT	897.5	7.36	5.31	574.5	107.5	57.45	27.45	134	9.55	339.5	31.25	56.3	5.97	0.9
TT	1640	7.09	5.63	1051.5	127	183.5	31.75	88.2	6.27	186.5	65.05	261	54.7	1.6
Lower SALITRE														
TC	439	7.51	8.57	282.5	166.5	86.5	10.78	5.42	1.38	128.5	8.33	15.14	29.75	1.95
TM	677	7	6.75	433	146.5	120.5	13.15	9.92	1.69	243	12.1	36.55	15.65	0.9
TP	609	6.97	6.4	389.5	118.5	90.3	34.65	17.1	4.11	274.5	30.8	39	1.14	2.25
PB	655	6.97	5.91	225.5	109	77.8	29.6	16	3.2	285	28.45	39.45	2.38	0.9

Table 4. Means, standard deviation and variance of the physical and chemical parameters of the karst aquifer of the Salitre River.

SAMPLE	EC		pH			D.O			T			TDS			ORP			
	μs/cm	SD	VAR	SD	VAR	(mg/L)	SD	VAR	°C	SD	VAR	(mg/L)	SD	VAR	Mv	SD	VAR	
Upper SALITRE																		
PV	1385	7.07	50	6.67	0.16	0.02	4.48	1.00	1.01	27.84	0.52	0.27	888.5	4.95	24.5	122.5	27.58	760.5
PT	897.5	70	4900.5	7.36	0.05	0.0024	5.305	0.18	0.03	29.23	0.03	0.0008	574.5	44.55	1985	107.5	12.02	144.5
TT	1640	438.4	192200	7.09	0.30	0.09	5.625	0.488	0.24	24.16	0.50	0.25	1051.5	280.7	78805	127	14.14	200
Lower SALITRE																		
TC	439	147.1	21632	7.51	0.30	7.84	8.57	2.8	7.84	24.96	0.57	0.32	282.5	91.22	8321	166.5	51.62	2664.5
TM	677	11.31	128	7.00	0.31	1.77	6.75	1.33	1.77	24.95	0.28	0.08	433	7.07	50	146.5	21.92	480.5
TP	609	25.46	648	6.97	0.29	1.38	6.4	1.17	1.38	28.78	1.48	2.18	389.5	16.26	264.5	118.5	7.78	60.5
PB	655	24.04	578	6.97	0.06	4.81	5.91	2.19	4.81	30.31	1.80	3.23	225.5	258.1	66613	109	14.14	200

Hydrochemical analysis

A Piper diagram was used to classify the different water samples and to determine their possible geochemical features (**Figure 2**). According to the, hydrochemical data obtained (**Table 3**), two geochemical scenarios can be distinguished. The first one suggests that high salinity waters (with predominance of Na^+ , Cl^- and SO_4^{2-} ions) represented by the Trincadeira Cave (TT) and Poço Verde (PV) samples, occurring under both the dry and rainy season in the Upper Salitre aquifer. The second geochemical scenario includes the group of samples with the bicarbonate, calcium and magnesium facies, which can be described as calcium bicarbonate. Samples of the Cesário Cave (TC), Martiliano Cave (TM) and Pitu Cave (TP), in the Lower Salitre region.

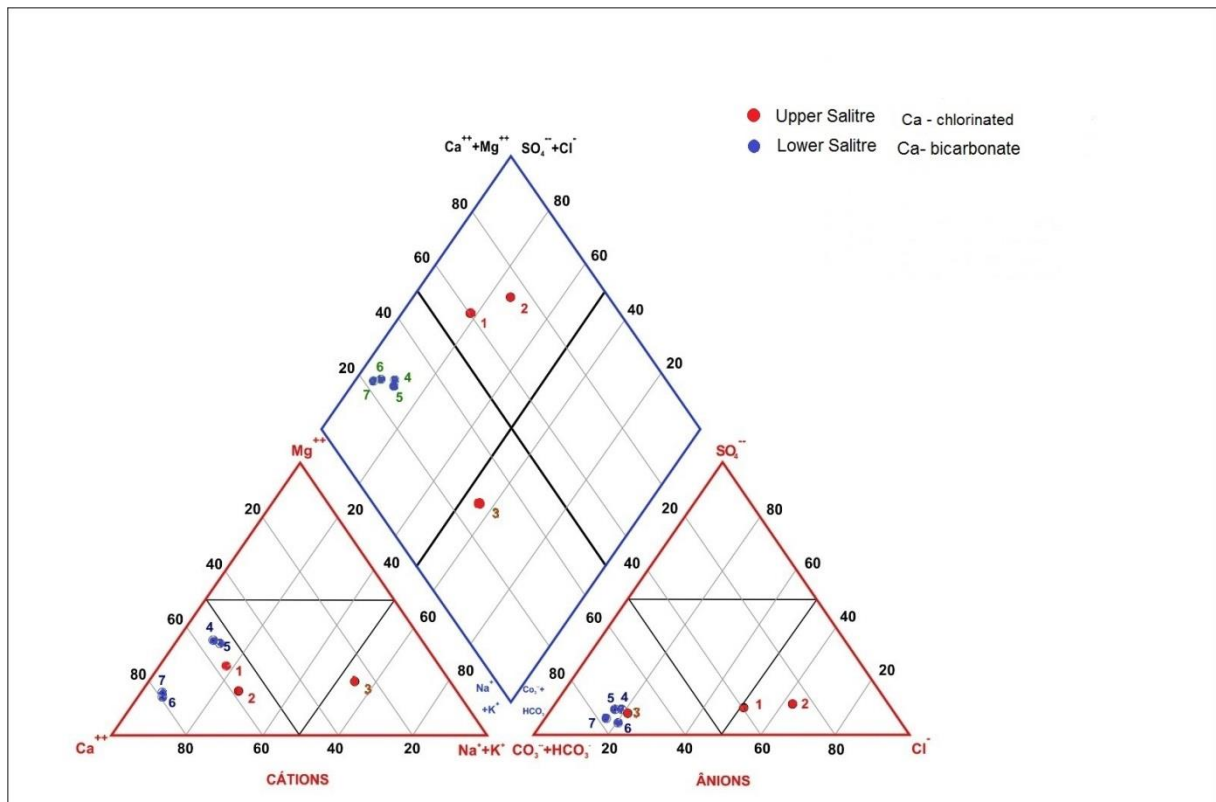


Figure 2. Piper diagram representing the two different groundwater chemical groups measures of water found in of the groundwater of the karst aquifer of the Salitre River, in under the two sampling periods seasons (i.e., dry and rainy).

Except for TP, all points sampled in both seasons are characterized by nitrate levels beyond permitted Brazilian legislation for drinking water (i.e., 10 mg / L). In the Lower Salitre region TC sampling, we observed an increase in nitrate levels from the dry to the rainy season (15.4 mg L⁻¹ to 44.1 mg L⁻¹). By contrast, the Upper Salitre was characterized by a decrease in nitrate concentration between the dry and rainy seasons (**Table 5** and **6**).

Descriptive biotic data

In this study, a total of 438 individuals belonging to 14 taxa were recorded. In decreasing order of relative abundance, these organisms belong to the following groups Copepoda- Cyclopoida, Harpacticoida (58%), Ostracoda (20%), Acari (8%), Amphipoda (6%), Insecta (larvae) (5%), Gastropoda (2%). The number of individuals from each group is reported in **Table 7**.

The Pitu and Trincheira caves presented the greatest individuals abundance, with 39% and 19% of all collected individuals (respectively). The number of individuals per sampling location is shown in **Figure 3**. The highest diversity was found at Trincheira cave, which presented eight 8 out of the 14 sampled taxa. Some taxa however, were found at a unique location. For example Bosmidae, Parastenocarididae Bathynellacea, and *Pongycarcinia xyphidiorus* were found at TT, TCOV, TP and TJ, respectively. Overall, we found four stygobitic taxa in this study (**Fig. 4a-d**). The Syncarida Bathynellacea was found in Pitu cave and this is the first record for this order in subterranean waters of the northeast region of Brazil. The Harpacticoida of the family Parastenocarididae collected in the Convento Cave, which is a first record for this family in Brazilian groundwater.

Quantitative biotic data

The cluster analysis for the five sampling locations shows high levels of similarity. The dendrogram reveals that TC1 (dry season) is the most distant point from the other samples, while the Upper Salitre TT and PV locations present the most similarity (**Figure 5**). The greatest diversity was observed in Trincheira cave (TT) and Poço Verde (PV) points (**Figure 6 and 7**).

Table 5. Hydrochemical parameters of the karst aquifer of the Salitre River under the dry season.

Sample	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	COT (mg/L)
TC	69	6.76	2.92	1.06	6.48	5.06	107	15.4	0.08	1.6
TM	140	15.2	12.3	1.89	42.6	13.6	245	14.1	0.04	<1
TP	87.3	31	15.4	3.37	35.7	31.6	257	0.54	0.04	3.6
TT	247	38.6	11.3	6.84	315	86.2	218	61.8	0.03	2.3
PV	189	48.1	57.4	7.72	229	81.5	289	13	0.04	<1
PB	92.1	32.6	17.1	3.51	36.4	31.4	269	7.23	<1	<1
PT	69.9	22.9	125	8.19	69.1	30.4	289	8	0.02	<1

Table 6. Hydrochemical parameters of the karst aquifer of the Salitre River under the rainy season.

Cave	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	COT (mg/L)
TC	104	14.8	7.92	1.69	23.8	11.6	150	44.1	0.03	2.3
TM	101	11.1	7.54	1.49	30.5	10.6	241	17.2	0.02	<1
TP	93.3	38.3	18.8	4.84	42.3	30	292	1.74	0.03	<1
TT	120	24.9	63.4	5.69	207	43.9	155	47.6	0.03	<1
PV	127	38.4	44.7	6.34	224	42.9	325	12.9	0.01	<1
PB	63.5	26.6	14.9	2.88	40.4	29.2	301	1.96	0.03	<1
PT	45	32	143	10.9	43.5	32.1	390	3.93	0.01	<1

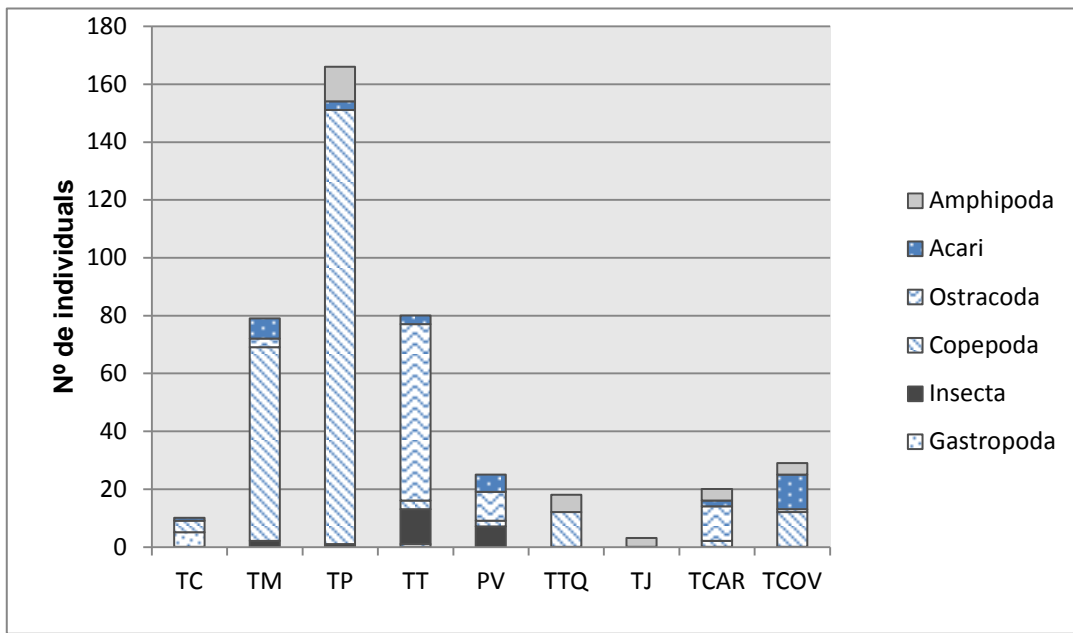


Figure 3. Individual abundances and their relative frequency at all sampling locations.



Figure 4. Stygobitic taxa found in the karst aquifer of the Salitre River. A) *Spaleogammarus trajanoae* B) *Pongycarcinia xyphidiorus* C) Parastenocarididae, D) Bathynellacea. The size of organisms ranges from 0.5 mm to 15 mm. Photos of the authors.

Table 7. Relative taxonomic abundance for each sampling locations of the karst aquifer of Salitre region.

. * Stygobitic.

Taxa	TC (dry)	TC (rainy)	TM (dry)	TM (rainy)	TP (dry)	TP (rainy)	TT (dry)	TT (rainy)	TJ	PV (dry)	PV (rainy)	TTQ	TCOV2	TCAR
Gastropoda														
Hydrobiidae	2							1						
Planorbidae	3													
Hexapoda														
Diptera														
Chironomidae				2						5	2			
Chaoboridae							1	8						
Collembola							1	0	3					
Arachnida														
Acari		1	3	4		3	3			1	5		12	2
Crustacea														
Copepoda														
Cyclopoida		2	1	65		150	1	1			2	12	10	2
Harpacticoida	1	1	1				1							
*Parastenocarididae													2	
Cladocera														
Bosmiidae							2							
Ostracoda				3			1	60		3	7		1	12
Syncarida														
*Bathynellacea							4							
Amphipoda														
Artesiidae														
* <i>Spelaeogammarus trajanoae</i>					5	7			3			6	4	4
Isopoda														
Calabozoidae														
* <i>Pongycarcinia xyphidiorus</i>									2					

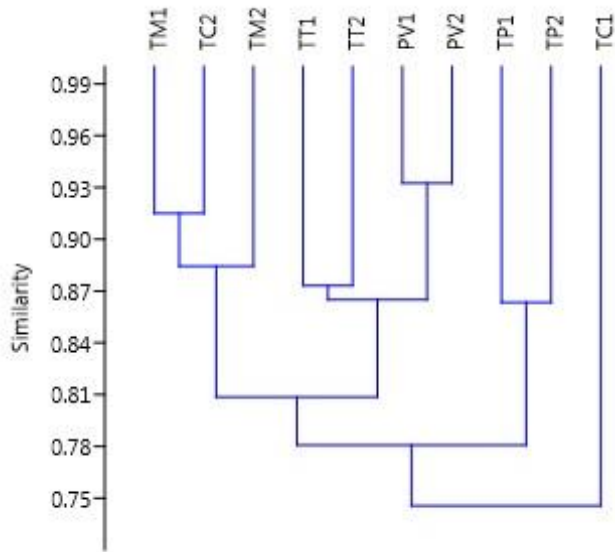


Figure 5. Cluster analysis (Bray-Curtis) between sampling locations conducted under two sampling campaigns (dry and rainy seasons).

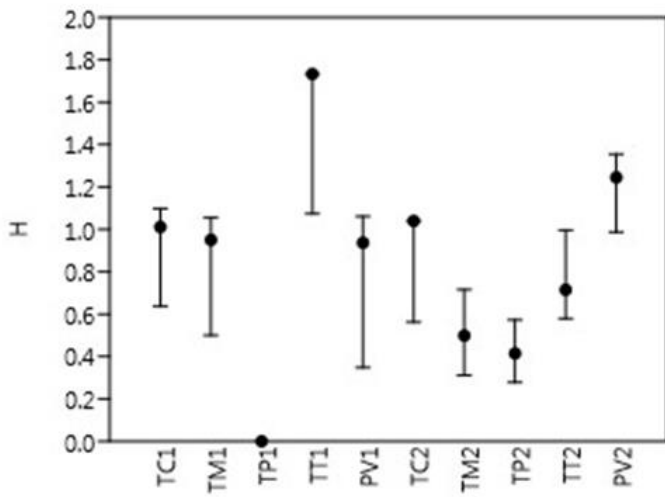


Figure 6. Shannon-winner diversity index of groundwater fauna in the karst aquifer of the Salitre River.

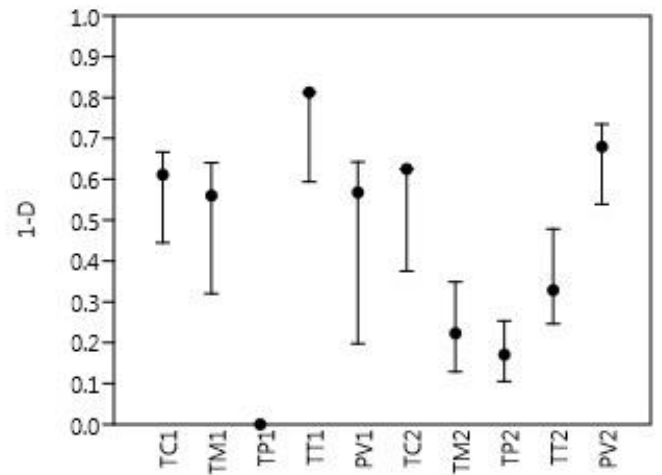


Figure 7. Simpson diversity index of groundwater fauna in the karst aquifer of the Salitre River.

The Canonical Correspondence Analysis revealed that the distribution of Cyclopoïd Copepods and the *Spaleogammarus* and Bathylenacea stygobitic was explained by the variables ‘temperature’ and ‘total organic carbon’. Likewise, the presence of taxa Ostracoda and Chironomidae was explained by the variables ‘total dissolved solids and chloride. The TT sampling location (Upper Salitre) is characterized by higher nitrate concentrations for both seasons, while TC and TM points (Lower Salitre), are positively correlated with the variable ‘total phosphorus’, ‘dissolved oxygen’ and ‘Oxi Reduction Potential (ORP)’ for both sampling periods (**Figure 8**). The first two canonical axes represent 59% of the variation (i.e., 32% in axis 1 and 27% in axis 2).

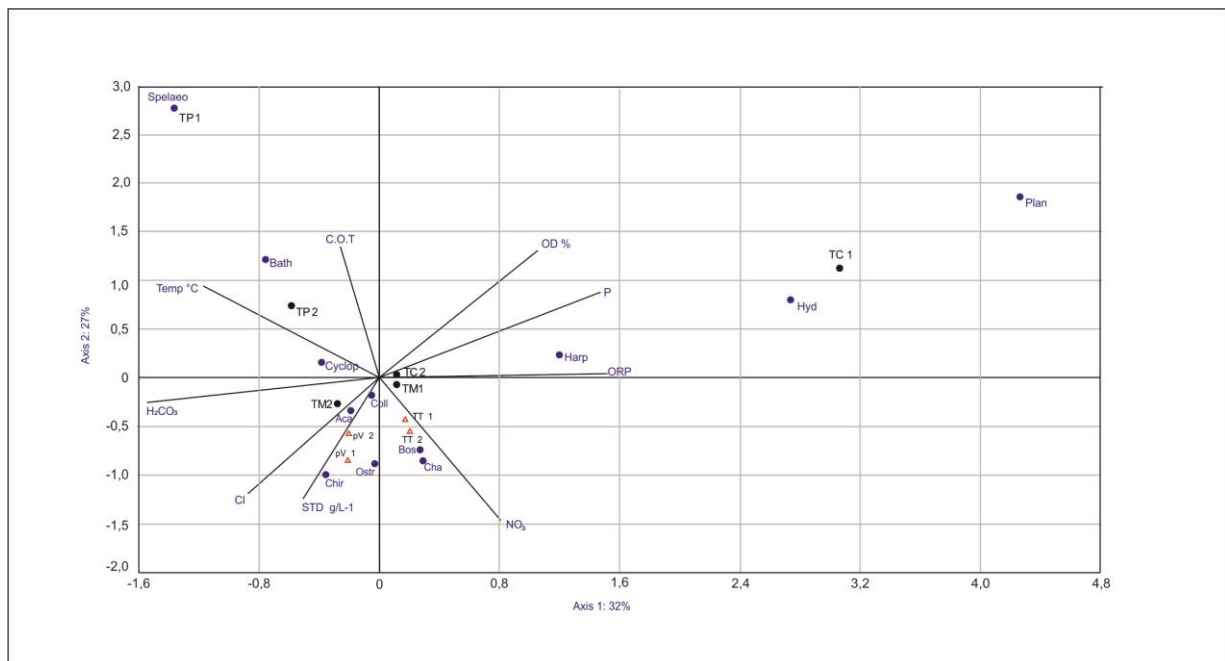


Figure 8. Canonical Correspondence Analysis for the biotic and abiotic data of 10 samples of the karst aquifer of the Salitre River as sampled during the two seasons (dry [October 2015] and rainy [April 2016]).

Discussion

Geochemistry

This study shows that the groundwater sampled in the Salitre basin displays the typical characteristics of a karstic composition, namely high concentrations of calcium and magnesium originating from the limestone lithology. However, we observed a clear distinction in the compositional spectrum of the hydrochemical facies. This is demonstrated by the higher content of chlorine, versus bicarbonated calcium in the Upper and Lower Salitre regions, respectively. Overall, this chemical composition is in accordance with the study conducted by Brito et al. (2005) in the Salitre region, which revealed high concentrations of bicarbonates and chlorine (63.4% bicarbonates and 36.6% chlorine).

While the high concentrations of nitrates found are in discrete regions of the Salitre hydrological basin is of concerns, those results are not entirely surprising. The agricultural activities of the region are widespread with typical releases of fertilizer and manure resulting from livestock production. Combined with lack of basic sanitation, these practices are bound to impact groundwater quality of the Salitre River valley (Oliveira et al., 2010; Brito et al., 2005).

Biotic and abiotic variables among regions

Between themselves, most of the sampling locations are highly similar, in terms of biotic and abiotic variables (**Figure 6**). This is probably the results of the environmental characteristics (i.e., bedrock and topography) which creates relatively homogeneous conditions, allowing the establishment of a similar invertebrate communities in both sub-regions of the Salitre aquifer. The Pitu cave (TP) the low concentration of nitrates and above average temperature (compared to the other locations sampled) is the likely explanation to the low similarity with respect to other locations. The effects of ambient temperature on the distribution of aquatic fauna is well known to play a determinant role on the viability of mesophilic bacteria (Battin et al., 2001; Arscott et al 2001). However, few studies have considered the biogeochemical relationships between bacterias and the transit of nitrate within aquifers (Rivett et al., 2008; Bohlke et al., 2002).

Among all the points represented in the Bray-Curtis similarity dendrogram (**Figure 6**), the sample collected at Cesario cave during the dry period (TC1) stands-out by its highest dissimilarity level. Indeed, this point is characterized by the lowest levels of any cations and anions, as revealed by the hydrochemical analyzes. This location also stands-out by its highest

inter-seasonal abiotic and biotic variability. In fact, seasonal variations in water dynamics may influence the composition of the invertebrate communities (Souza-Silva et al., 2012; Simões et al., 2013). Given that many meiofaunal groups are important colonizers of interstitial environments (because of their size and shape), any changes in water dynamics may have important directional effects on the colonization success of these organisms (Schmid-Araya 1997). Additionally, populations of microarthropods generally exhibit transient behaviour in terms of presence and absence in function of the underground water discharge levels (Brancelj 2002; Pipan & Culver 2005).

The biological richness in the waters of the karst aquifer of the Salitre region

Considering the number of sampled locations (9) of the Salitre karst aquifer, it is notable that, as a whole, the faunal assemblage shows little diversified with, only 14 taxa found. By comparison, Simões et al. (2013) found 20 taxa for a karst aquifer of the Goiás State. Together, these results suggest that tropical groundwater communities are of low diversity compared to those of temperate regions (Culver 1982; Botosaneanu 1986; Ward & Voelz 1990; Gibert et al., 1994; Moustaine et al., 2013). However, the apparent simplicity of these communities may be an artefact of the relative lack of attention given to Brazilian groundwater fauna particularly considering its meiofauna. Furthermore, taxonomical identification chiefly conducted at low resolution likely contributes to an apparent lack of diversity. In the present study, the Acari and Ostracoda groups are in fact underestimated with respect to rate diversity. This is revealed by different morphospecies are included in the same taxa.

Here, we show that the proportion of stygobitic was relatively high, with four species (30%) of the total community, all of which are Crustaceans. Among these, the amphipods, represented by the genus *Spelaeogammarus* (da Silva Brum, 1975), has the widest distribution, given the latter was recorded in both the Upper and Lower Salitre. By contrast, other stygobitic were sampled at a single location. For example, an isopod of the *Pongycarcinia sp* genus (Messana, Baratti & Benvenuti, 2002) was only recorded at the Jurema cave (TJ; Upper Salitre), and two new stygobitic not yet identified at lower taxonomic levels were likewise found at restricted sampling locations. The copepoda of the family Parestenocarididae and the Syncarida (Bathynellacea) were sampled at the Convento cave and the Pitu cave, respectively.

Relationship between the physical and chemical components and the biotic components of the Salitre karst aquifer

Sampling locations that presented the greatest taxonomical diversity occur in the Upper Salitre (**Fig. 7**). Interestingly, these locations also present the highest levels of nitrate, greater electrical conductivity and salinity. Such relatively higher diversity is chiefly explained by the presence of insect larvae, especially the family Chironomidae and Crustaceans, presenting short life cycle (e.g., Cladocera and Ostracoda). According to Malard et al. (1996), stygobitic species disappear almost completely in polluted aquifers that are colonized by ubiquitous opportunistic species such as Oligochaetes and Ostracodas. Insect larvae of the Chironomidae family are widely known for their bioindication of polluted environments in surface waters (Rosenberg, 1992).

The first axis of the CCA analysis (**Figure 8**) shows a positive correlation between the samples of the TC location and high concentrations of dissolved oxygen and total phosphorus. The high ORP levels are themselves negatively correlated with the ions concentration of this karstic systems. This result was also observed by Drew et al., (1995). It is unclear however, why no relationship exists between these aforementioned environmental variables and the relatively low biological diversity found at this location. The CCA's second axis explains only 27% of the relationships between the invertebrate communities and the environmental parameters measured. This axis shows a positive correlation between temperature and total organic carbon concentration and a negative correlation with nitrate concentration. Also, three taxonomic groups are positioned on this axis, namely Cyclopoida, the stygobitic Bathynellacea and *Spelaeogammarus*. As groundwater ecosystems are dependent on the entry of oxygen and carbon, the surveyed variables are of high relevance for the structure of aquifer invertebrate communities (Korbe et al., 2013; Thulin & Hanh, 2008). However, few studies have demonstrated that dissolved organic carbon may be a limiting factor due to its importance in the biogeochemical carbon cycle in underground environments (Simon and Benfield 2002).

When noticing a difference in the structure of the community with the greater abundance and diversity of stygobitic in the points with lower concentration of nitrate and the greater richness and abundance of organisms considered resistant to pollution in waters with higher nitrate content, the present study corroborates with the authors Who studied the effect of pollutants mainly on the composition of invertebrate communities in groundwater,

suggesting that these invertebrates may be good examples of bioindicators. (Nielsen et al., 2009).

Conclusions

This study furthers our knowledge of the richness and distribution of invertebrate groups in a karst aquifer of the semiarid Brazilian landscape. Precisely, we found that crustaceans form the main taxa of the study aquifer, with Copepoda and Ostracoda being the most frequent classes.

Sampling groundwater at distant locations of the same karstic aquifer allowed us to obtain a detailed distribution pattern of stygobitic species. From the point of view of hydrochemistry, we found that the aquifer is characterized by two geographic regions, with distinct chemical profiles. Also, our results revealed the wide distribution of a stygobitic species by its occurrence in both regions. Conversely, two stygobitic species were only found in the single region presenting high and low levels of bicarbonate nitrate, respectively.

Analysis of stygofauna shows that the abundance and richness of stygobitic were minor at locations affected by high concentrations of nitrate, demonstrating that the karst's community structure may be affected to both natural and man-induced gradients alike. Overall, this study seeks to understand the factors of most importance to the structure of the invertebrate community a karst aquifer, considering natural and anthropogenic determinants. These information may be of clear relevance for the establishment of adequate standards for groundwater quality.

Acknowledgements

This study was possible because of the support provided by NEHMA research group of the Federal University of Bahia (UFBA). We are also indebted to Paola and Angelica from the Botanical Laboratory (IBIO – UFBA), which provided precious help for taxonomic identification and statistical analyzes. We also wish to thank Jorgean Silva and Gilmar D'Oliveira from SEA and the drivers Deraldo and Mota (UFBA) for help during the field surveys.

References

1. Arscott, D. B., K. Tockner & J. V. Ward, 2001. Thermal heterogeneity along a braided flood plain river (Tagliamento River, northeastern Italy). *Can. J. Fish. aquat. Sci.* 58: 2359–2373.
2. Auler AS, Farrant AR (1996) A brief introduction to karst and caves in Brazil. *Proc Univ Bristol Spelaeol Soc* 20:187–200.
3. Auler AS, Smart PL, Wang X, Pilo´ LB, Edwards RL, Cheng H (2009) Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology* 106:142–153. doi:10.1016/j.geomorph.2008.09.020
4. Battin, T.J., Wille, A., Sattler, B., Psenner, R., *Phylogenetic and functional heterogeneity of sediment biofilms along environmental gradients in a glacial stream*, *Applied and Environmental Microbiology*, **67**(2): 799–807, 2001.
5. Bichuette, M. E., Trajano, E. 2006. Morphology and distribution of the cave knifefish *Eigenmannia vicentespelaea Triques*, 1996 (Gymnotiformes: Sternopygidae) from Central Brazil, with an expanded diagnosis and comments on subterranean evolution. *Neotropical Ichthyology*, 4(1): 99-105.
6. Böhlke, J. K., Wanty, R., Tuttle, M., Delin, G., and Landon, M.: Denitrification in the recharge area and discharge area of a transient agricultural nitrate plume in a glacial outwash sand aquifer, Minnesota, *Water Resour. Res.*, 38, 1105, doi:10.1029/2001WR000663, 2002.
7. Botosaneanu L. 1986. *Stygofauna Mundi. A Faunistic, Distributional, and Ecological Synthesis of the World Fauna inhabiting Subterranean Waters (incl. the marine interstitial)*. Brill EJ, Dr. W. Backhuys, Leiden, The Netherlands.
8. Brancelj, A. (2002). Microdistribution and high diversity of copepod (Crustacea) in a small cave in central Slovenia. *Hydrobiologia* 477: 59–72.
9. Brito, L. T. de L., Srinivasan, V.S., Silva ,A. S., Gheyi, H. R., Galvão, C. O. & Hermes L. C. (2005) Influência das atividades antrópicas na qualidade das águas da bacia hidrográfica do Rio Salitre *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.4, p.596-602.
10. Culver, D. C. 1982. *Cave Life, Evolution and Ecology*. Cambridge, Massachusetts and London. Harvard University Press.
11. Di Lorenzo T, Galassi D.M.P.(2013) Agricultural impact on Mediterranean alluvial aquifers: do groundwater communities respond? *Fundam Appl Limnol* 2013;182(4):271–82.
12. Drew DP, Orvan J, Pulido Bosch A, Salaga I, Sarin A, Tulipano L (1995) The characteristics of karst groundwater systems. In *Cost action-65 Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas*, Final report, European Commission, EUR 16547, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 349–369.

13. Gibert J, Culver DC, Dole-Olivier MJ, Malard F, Christman MC, Deharveng L. Assessing and conserving groundwater biodiversity: synthesis and perspectives. *Freshw Biol* 2009;54:930–41.
14. Korbel KL, Hancock PJ, Serov P, Lim RP, Hose GC. (2013) Groundwater ecosystems change with landuse across a mixed agricultural landscape. *J Environ Qual* 2013;42: 380–90.
15. Langecker TG. 2000. The effects of continuous darkness on cave ecology and cavernicolous evolution. In : Wilkens H., Culver D.C. and Humphreys W.F. (eds) *Subterranean Ecosystems. Ecosystems of the World* 30, Elsevier, Amsterdam, 135-157.
16. Malard F, Plénet S, Gibert J. 1996. The use of invertebrates in groundwater monitoring : a rising research field. *Ground Water Monitoring and Remediation* **16**, 103-116.
17. Mattox, G.M.T., Bichuette, M. E., Secutti, S., Trajano, E., 2008. Surface and subterranean ichthyofauna in the Serra do Ramalho karst area, northeastern Brazil, with updated lists of Brazilian troglobitic and troglophilic fishes: *Biota Neotropica*, 8 (4): 145-152.
18. Messana, G., M. Baratti, D. Benvenuti. 2002. *Pongycarcinia xiphidiourus* n. gen. n. sp., a new Brazilian Calabozoidae (Crustacea Isopoda). *Tropical Zoology* 15: 243-252.
19. Moldovan OT, Meleg IN, Perşoiu A (2012) Habitat fragmentation and its effects on groundwater populations. *Ecohydrology* 5: 445–452. doi: 10.1002/eco.237
20. Moustaine R. E., Chanlaoui, A., Rour, E. H. 2013. Groundwater fauna can be used as indicator of anthropogenic Meknes area, Morocco. *International Journal of Biosciences*. Vol. 3, No. 10, p. 139-152, 2013. p. 10-27. p. 93-110.
21. Nogueira, M.H. 1959. O gênero *Elaphoidella* (Harpacticoida - Cop.-Crust.) nas águas do Paraná. *Dusenía* 8: 61-68.
22. Notenboom J, Plénet S, Turquin MJ. 1994. Groundwater contamination and its impact on groundwater animals and ecosystems. In : Gibert J., Danielopol D.L. and Stanford J.A. (eds) *Groundwater Ecology*, Academic Press, New York, 477-504.
23. Oliveira, C. N. Campos, V.P. Medeiros, Y.D.P (2010). Avaliação e identificação de parâmetros importantes para a qualidade de corpos d' água no semiárido baiano. Estudo de caso: Bacia hidrográfica do rio Salitre. *Quim. Nova*, Vol. 33, No. 5, 1059-1066, 2010.
24. Pipan T, Navodinik V, Novak T, Janžekovič F (2008) Studies of the fauna of percolation water of Huda Luknja, a cave in isolated karst in northeast Slovenia. *Acta carsologica* 37: 141–151.
25. Pipan, T. & D. C. Culver. (2005). Estimating biodiversity in the epikarstic zone of a West Virginia cave. *Journal of Cave and Karst Studies* 67: 103–109.
26. Reid, J.W., C.A. José. 1987. Some copepoda (Crustacea) from caves in Central Brazil. *Stygologia* 3: 70-82.

27. Ribeiro, S. H. S. Estudo das águas subterrâneas da bacia do rio Salitre, Bahia. Salvador. 2005. 109f. Monografia (Graduação)-Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.
28. Rivett, M.O. Buss, S.R. Morgan, S.R. P. Smith, J.W.N. Bemment, C.D.(2008) Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *water research* 42 (2 0 0 8) 4 2 1 5 – 4 2 3 2.
29. Rosenberg, D. M. Freshwater biomonitoring and Chironomidae. *Neth. J. Aquatic Ecol.*, v. 26, n. 24, p.101-122, 1992.
30. Schmid-Araya, J. M. (1997). Temporal and spatial dynamics of meiofaunal assemblages in the hyporheic interstitial of a gravel stream. In Gibert J., J. Mathieu & F. Fournier (eds), *Groundwater/Surface Water Ecotones: Biological and Hydrological Interactions and Management Options*. International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge, 29–41.
31. Silva, A. B. (2006) Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia – Salvador : CBPM, 2006. – (Série Arquivos Abertos ; 24). Organização e síntese por: Luiz Luna Freire de Miranda e Luiz Rogério Bastos Leal.
32. Simões,L.B. Ferreira,T.C.S. Bichuette, M.E.(2013) Aquatic biota of different karst habitats in epigeal and subterranean systems of Central Brazil – visibility versus relevance of taxa. *Subterranean Biology* 11: 55–74 (2013) doi: 10.3897/subtbiol.11.5981.
33. Simon KS, Benfield EF (2002) Ammonium retention and whole stream metabolism in cave streams. *Hydrobiologia* 482: 31–39. doi: 10.1023/A:1021257822591.
34. Souza-Silva M, Liria CCS, Sampaio FAC, Ferreira RL (2012) Transitory aquatic taxocenosis in two neotropical limestone caves. *Revista Brasileira de Espeleologia* 2: 29–41.
35. Thulin, B., Hahn, J.H., *Technical Report: Ecology and living conditions of groundwater fauna*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, 2008.
36. Trajano, E. Bichuette, M. E., 2010. Diversity of Brazilian subterranean invertebrates, with a list of troglomorphic taxa *Subterranean Biology* 7: 1-16, 2009 (2010).
37. Ward JV, Voelz NJ. 1990. Gradients analysis of interstitial meiofauna along a longitudinal stream profile. *Stygologia* 5, 93–99.
38. Zhang, D.D., Peart, M., Zhang, Y.J., Zhu, A., Cheng, X. 2000. Natural water softening processes by waterfall effects in karst areas. *Desalination*, 129: 247-259.

CAPÍTULO 3

**ASPECTOS PRELIMINARES SOBRE O PADRÃO
BIOGEOGRÁFICO DE *Spelaeogammarus trajanoae* (Koenemann
& Holsinger, 2000), ORDEM AMPHIPODA, NO AQUÍFERO
CÁRSTICO DA BACIA DO RIO SALITRE, CENTRO NORTE
DO ESTADO DA BAHIA.**

André Vieira de Araújo ^a, Luiz Rogério Bastos Leal ^a, Doriedson Ferreira Gomes ^b

^a NEHMA /UFBA - Instituto de Geociências - Universidade Federal da Bahia Campus Ondina - Salvador (BA) -
CEP 40210-340 , e-mail: anddrevieira@gmail.com

^b Departamento de Botânica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA, Brasil.

Resumo - A distribuição da espécie *Spelaeogammarus trajanoae*, crustáceo aquático pertencente à ordem Amphipoda e endêmico das cavernas do norte da Bahia foi determinada em sete cavernas distribuídas no sentido norte-sul do aquífero cárstico da bacia do rio Salitre, foram também analisadas as condições hidroquímica de cada ponto amostrado. Os crustáceos encontrados habitam exclusivamente águas subterrâneas. Essa distribuição localizada pode sugerir uma dispersão na direção do fluxo dentro do aquífero. Os resultados mostram que apesar do aquífero possuir três diferentes classes químicas de água, essa condição parece não afetar a distribuição da espécie. A vicariância aliada a mudanças climáticas, pode ter um papel maior que a dispersão para explicar a distribuição das populações; visto que, apesar do crustáceo ser encontrado em cavernas separadas por mais de 200km de distância, ele está ausente em cavernas conectadas hidraulicamente, e por vezes está limitado a um único ponto no interior de cavernas extensamente alagadas, demonstrando baixo poder de dispersão.

Palavras-chave: Hidroquímica; Água subterrânea; Amphipoda.

Abstract - The distribution of the species *Spelaeogammarus trajanoae*, Crustacean aquatic endemic of cave in northern Bahia was determined in seven caves distributed in north-south direction of the karstic aquifer of the river basin Salitre, was also analyzed the hydrochemical conditions of each sample point. The crustaceans found exclusively inhabit groundwater. This localized distribution may suggest a dispersion in the flow direction within the aquifer. The results show that despite the aquifer has three different chemical classes of water, this condition does not seem to affect the distribution of the species. The vicariant may have a greater role than the dispersion for explaining the distribution of the species since, although the crustacean be found in separate caverns for over 200 km away it is absent in caves connected hydraulically and is sometimes limited to a single point inside caves extensively flooded demonstrating low power dispersion.

Introdução

Carste é um tipo de paisagem em que a troca entre as águas subterrâneas e superficiais resulta em um complexo e imprevisível aquífero (BONACCI et al., 2009). Pela sua própria natureza, aquíferos cársticos e outros ambientes subterrâneos são pouco conhecidos, e ainda assim eles são o lar de um grande número de espécies endêmicas e representantes de espécies antigas que foram abundantes no passado, que hoje são restritas a esses ambientes e são chamadas de espécies relictuais (BOULTON et al., 2003).

A utilização de crustáceos subterrâneos para estudos biogeográficos remonta a década de 80 (BOUTIN & COINEAU, 1988; HOLSINGER et al., 1986; HOLSINGER, 1992; NOTENBOOM, 1991). Holsinger (1994), ressalta que a utilização de padrões de distribuição de anfípodas subterrâneas correlacionados a história geológica, e os aspectos ecológicos, auxiliam no entendimento dos processos evolutivos de especiação.

Spelaeogammarus (da Silva Brum, 1975) é um gênero pertencente à família Artesiidae e ocorre exclusivamente nas águas subterrâneas do Estado da Bahia. Atualmente são conhecidas seis espécies desse gênero, todas foram encontradas em cavernas. Dentre essas está a *Spelaeogammarus trajanoae*, que é endêmica das cavernas calcárias na bacia do rio Salitre (BASTOS-PEREIRA e FERREIRA 2015; SENNA et al., 2014; KOENEMANN & HOLSINGER 2000). Por serem espécies endêmicas, a distribuição dos anfípodas do gênero *Spelaeogammarus* pode lançar luz sobre a forma de invasão e dispersão na região estudada, com base na história conjunta do grupo e do seu meio, na escala de tempo geológica.

A complexidade das interações entre as variáveis bióticas e abióticas, que regem aos padrões de distribuição e abundância das espécies no ambiente subterrâneo, tem atraído à atenção de diversos pesquisadores (PHILLIPS, 2016; PAGE et al., 2008; COUTER & GALARWICZ, 2015; DI LORENZO et al., 2013). No entanto, esses estudos são escassos no Brasil. Neste artigo é analisado o padrão de distribuição longitudinal do anfípode *Spelaogammarus trajanoae* dentro do aquífero cárstico da bacia do rio Salitre, e sua relação com variáveis físicas e químicas no ambiente. No contexto da biogeografia histórica, envolve a descrição da distribuição de uma espécie juntamente com a investigação dos dados geológicos e paleogeográficos, e de eventos que podem ter agido como barreiras responsáveis pela história da distribuição do grupo.

Área de estudo

Localizada no centro-norte do Estado da Bahia, a bacia hidrográfica do rio Salitre é uma sub-bacia do rio São Francisco (Figura 1).

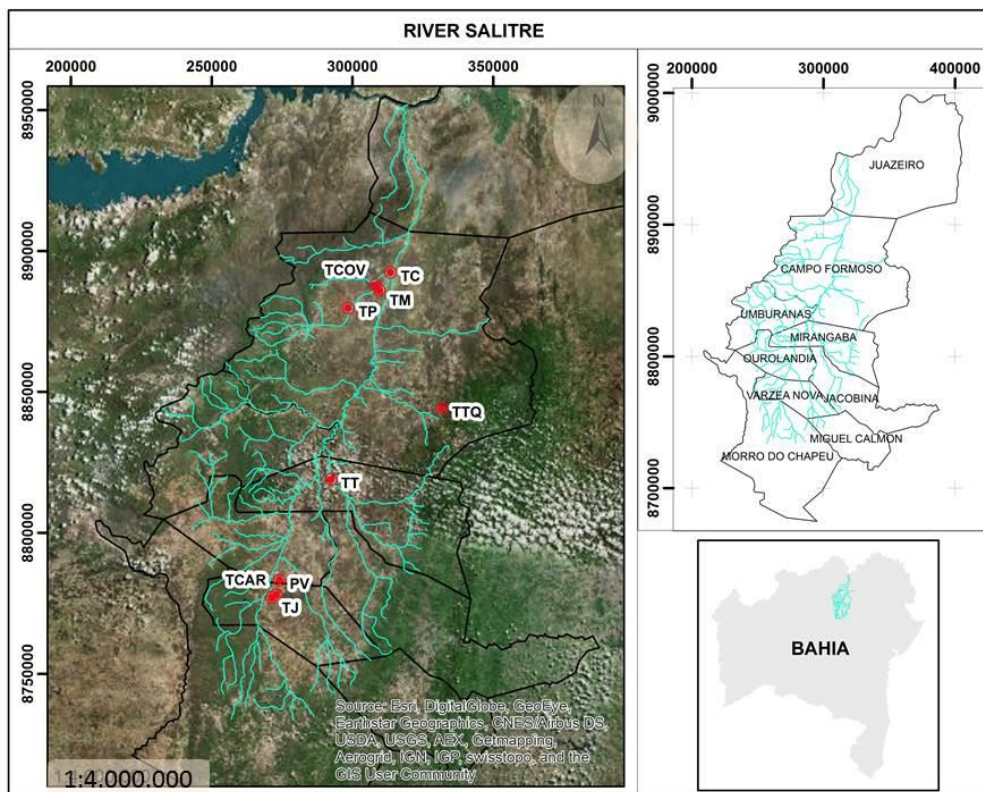


Figura 1. Mapa da bacia do rio Salitre, com os limites dos municípios e pontos de coleta (Figura dos autores).

A bacia hidrográfica do rio Salitre possui uma área de 13.467,93km². A bacia é dividida em três sub-regiões do sul para o norte: Alto, Médio e Baixo Salitre. Por não ter uma forma poligonal, pode-se dizer que o extremo norte da área fica a norte do paralelo 9°30'S, e o extremo sul a norte do paralelo 11°30'S. O limite ocidental fica a leste do meridiano 41°30'W, e o limite oriental a leste do meridiano 40°30'W (SILVA, 2006).

Na bacia, as rochas do Proterozoico superior (Grupo Una: Formação Bebedouro e Formação Salitre) e coberturas calcárias cenozoicas (Formação Caatinga), são denominados de domínio de aquífero cárstico (SILVA, 2006; RIBEIRO, 2005). O carste do Grupo Una apresenta sistemas de cavernas muito extensas incluindo a maior do Brasil, Toca da Boa Vista, com 108km de galerias mapeadas. Contígua aos carbonatos Una, a Formação Salitre, encontra-se uma área cárstica, formada de rochas calcárias a partir de idade muito mais recente (Quaternário), referida como Formação Caatinga (AULER & FARRANT, 1996). Esses calcários foram formados por remodelagem dos calcários Una, devido ao intemperismo, erosão e transporte de sedimentos durante carstificação da Formação Salitre. Esse último foi exposto no início do Paleogeno, há cerca de 65 milhões de anos atrás, enquanto a carstificação da Formação Caatinga provavelmente teria começado há cerca de 2,5 milhões de anos atrás. A cobertura vegetal da maior parte dos terrenos da bacia é esparsa e arbustiva. O clima é semiárido, com média anual de chuvas cerca de 490mm, concentradas entre os meses de fevereiro e maio, e a temperatura média anual de cerca de 30°C (AULER et al. 2009).

Materiais e métodos

As amostragens para execução do estudo, foram realizadas nos meses de outubro de 2015, período seco; e abril de 2016, período chuvoso; em água subterrânea de cavernas situadas nas sub-regiões do baixo médio e alto Salitre. A (**Tabela 1**) apresenta as coordenadas dos pontos de amostragem localizadas na bacia.

Tabela 1. Coordenadas dos pontos de amostragem.

Sub-região	Legenda	UTM_X	UTM_y	Elev.	
Alto Salitre	TJ	Toca da Jurema	269896	8776668	551
	TCAR	Toca do Carlito	273037	8778064	575
	PV	Poço Verde	274184	8783194	573
	TT	Toca da Trincheira	292433	8818968	527
	PT	Poço Trincheira	292433	8818968	527
médio	TTQ	Toca da Tiquara	331808	8844146	750
	TP	Toca do Pitu	298614	8879755	535
	PB	Poço Buraco	308148	8885794	506
	TM	Toca do Martiliano	309639	8886107	515
	TCOV	Toca do Convento	308300	8887978	518
Baixo Salitre	TC	Toca do Cesário	313602	8892326	499

Foram analisadas, *in situ*, as variáveis: temperatura (°C); condutividade elétrica (mS/cm); pH; Oxigênio dissolvido (mg/L); saturação do oxigênio (%); sólidos totais dissolvidos (g/L); ORP potencial de oxirredução (mv); com o auxílio de uma sonda multiparâmetros da marca Horiba (modelo U-50G);

As análises hidroquímicas foram realizadas pelo laboratório Merieux Nutrisciences Salvador-BA. Essas seguiram as seguintes técnicas analíticas: Determinação de Metais por Espectrometria de Emissão Óptica de Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES); Determinação de nitrogênio total por método titulométrico; Determinação de Íons por Cromatografia Iônica com detecção por condutividade.

As coletas biológicas foram realizadas através de métodos de arrasto de plâncton com malha de 60 μ , a rede é lançada na água e puxada com ajuda de uma corda, após três lançamentos a água filtrada pela rede é acondicionada em potes plásticos com solução Transeau. Foram utilizados dados conhecidos sobre a presença da espécie disponível na literatura que não foi possível confirmar no presente trabalho.

Os diagramas hidroquímicos foram feitos utilizando o Software Qualigraf (FUCEME,2015).

Resultados

O perfil das características físico-químicas apresentadas na (**Tabela 2**), mostra um gradiente para os parâmetros: salinidade (SAL.), sólidos totais dissolvidos (STD) e consequentemente a condutividade elétrica (C.E.). O gradiente apresenta os maiores valores nas águas das cavernas do alto Salitre notadamente Toca do Carlito (TCAR) e Toca da Trincheira (TT) e vai diminuindo no sentido norte – sul na direção das cavernas do baixo Salitre atingindo o menor valor na Toca do Cesário (TC). Esse gradiente é invertido no que diz respeito ao Oxigênio dissolvido (O.D) com os menores valores encontrados no alto Salitre e crescendo em direção as cavernas do baixo Salitre. A Toca da Tiquara (TTQ) situada no médio Salitre apresenta valores intermediários de ambos os gradientes. Para as variáveis pH e temperatura, não é perceptível esse gradiente. O pH varia pouco entre os pontos amostrados; e a temperatura apresenta uma variação de aproximadamente 3°C entre cavernas, tanto no alto quanto no baixo Salitre.

Tabela 2. Parâmetros físicos químicos da água subterrânea em cavernas do aquífero cárstico do rio Salitre

Cavernas	C.E ($\mu\text{S/cm}$)	pH	OD (mg/L)	OD. (%)	Temp. (°C)	STD (g/L^{-1})	SAL. (%)	ORP (mv)
TC	439	7.5	8.57	105.4	24.96	0.2825	0.025	166.5
TM	677	7	6.75	83.3	24.945	0.433	0.03	146.5
TCOV	636	6.86	6.46	78.4	23.9	0.407	0.03	164
TP	609	6.965	6.4	83.85	28.775	0.3895	0.03	118.5
TTQ	1.170	7.01	7.87	97	25.13	0.75	0.06	117
TT	1.640	7.085	5.625	68.75	24.155	1.0515	0.085	127
P.V	1.385	6.67	4.48	56.4	27.835	0.8885	0.07	122.5
TJ	1.600	7.1	4.7	61	26.8	1.02	0.08	113
TCAR	1.610	6.66	4.93	64.3	28.36	1.03	0.08	158

Combinando os dados das águas coletadas nas cavernas com aquelas coletadas em poços tubulares próximos aos pontos amostrados, observa-se o mesmo padrão de gradiente físico-químico entre as sub-regiões do aquífero cárstico (**Figuras 2,3 e 4**).

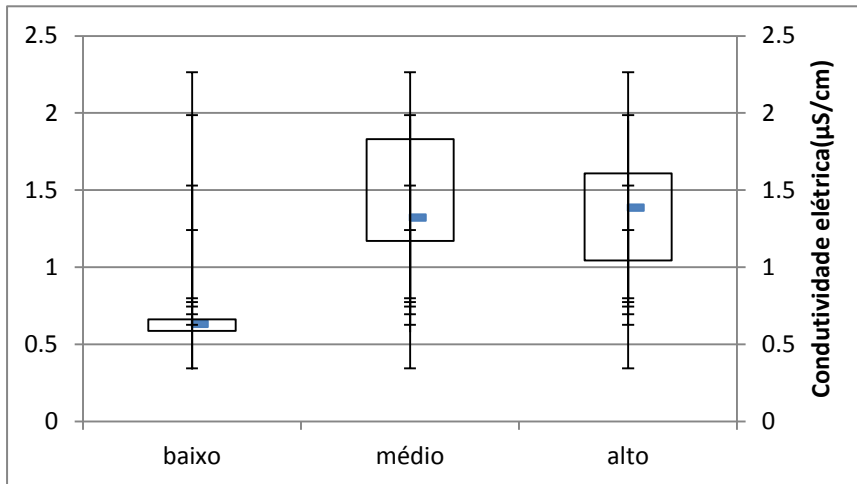


Figura 2. Box-plot da condutividade elétrica nas sub-regiões do aquífero cárstico do rio Salitre.

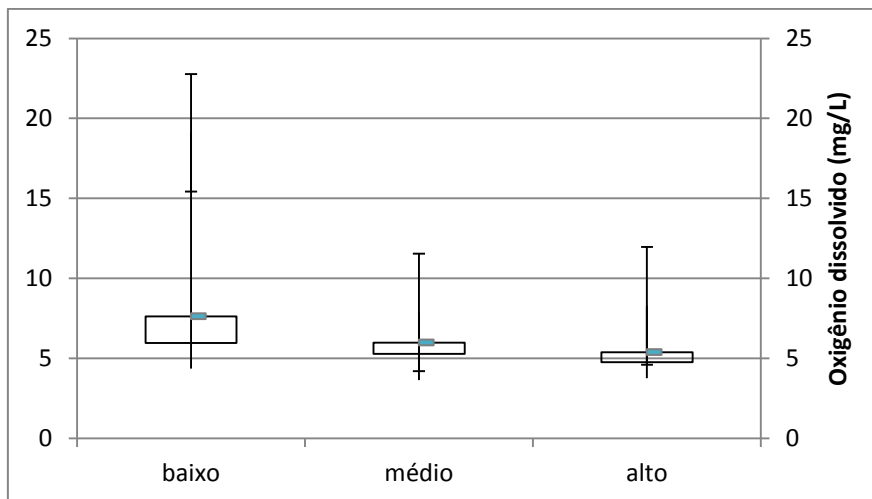


Figura 3. Box-plot do Oxigênio dissolvido nas sub-regiões do aquífero cárstico do rio Salitre.

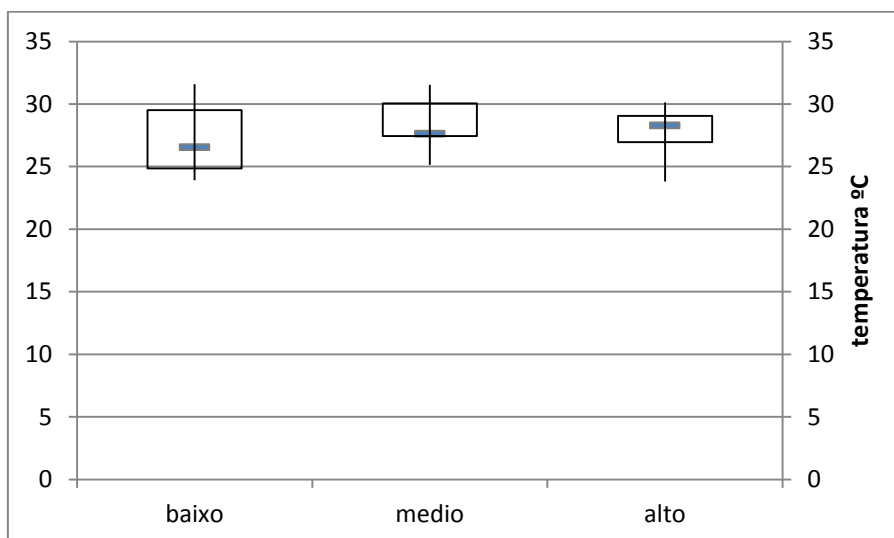


Figura 4. Box-plot da temperatura nas sub-regiões do aquífero cárstico do rio Salitre.

A figura 2 mostra os valores da condutividade elétrica nas águas das sub-regiões da bacia e verificam-se os menores valores nas águas do baixo Salitre e os maiores valores nas águas do médio e alto Salitre; A figura 3 apresenta os dados para a concentração do oxigênio dissolvido na água e percebe-se que as águas mais oxigenadas estão no baixo Salitre; A figura 4 mostra que há pouca variação na temperatura das águas das três sub-regiões.

O diagrama de Piper (**Figura 5**) foi utilizado para classificar as diferentes amostras de água subterrânea e determinar os possíveis cenários geoquímicos, Os resultados das amostras de águas coletadas em poços tubulares próximos aos pontos de amostragem, também foram inseridas para fins de comparação.

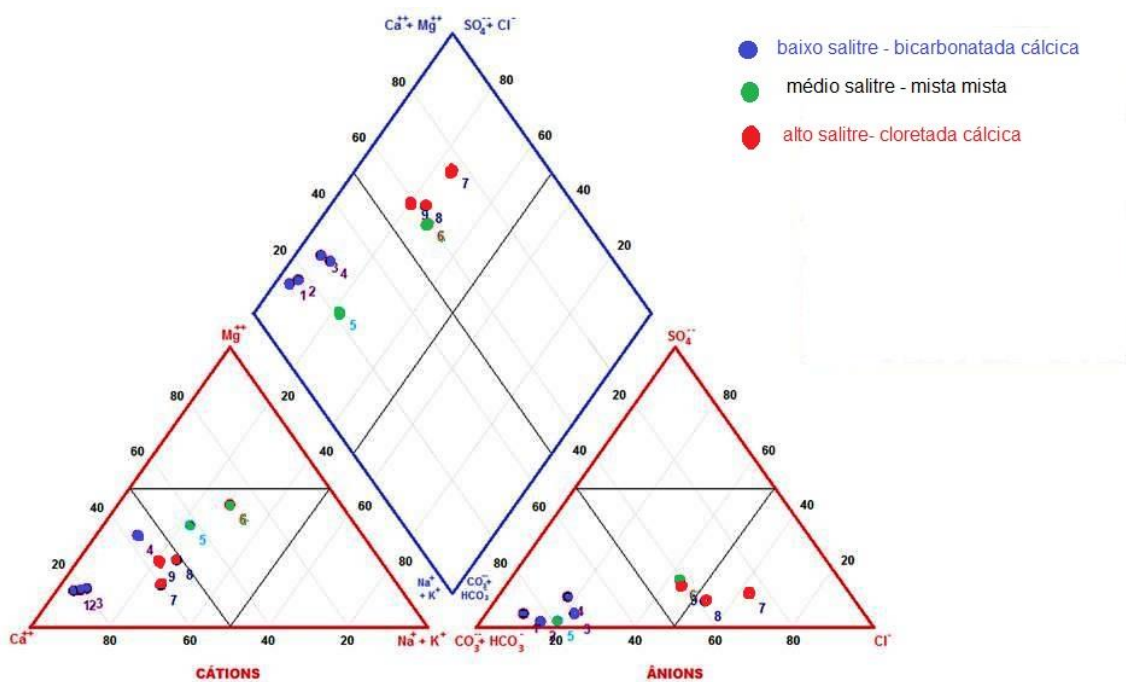


Figura 5. Diagrama de Piper representando os diferentes grupos químicos de água encontrados no aquífero cárstico da bacia do rio Salitre.

O mapa hidrogeológico (**Figura 6**), foi adaptado de Ribeiro (2005), onde foram plotadas as prováveis zonas de circulação da água subterrânea e os pontos onde foram amostradas águas com e sem a presença de *Spelaegammarus trajanoae*.

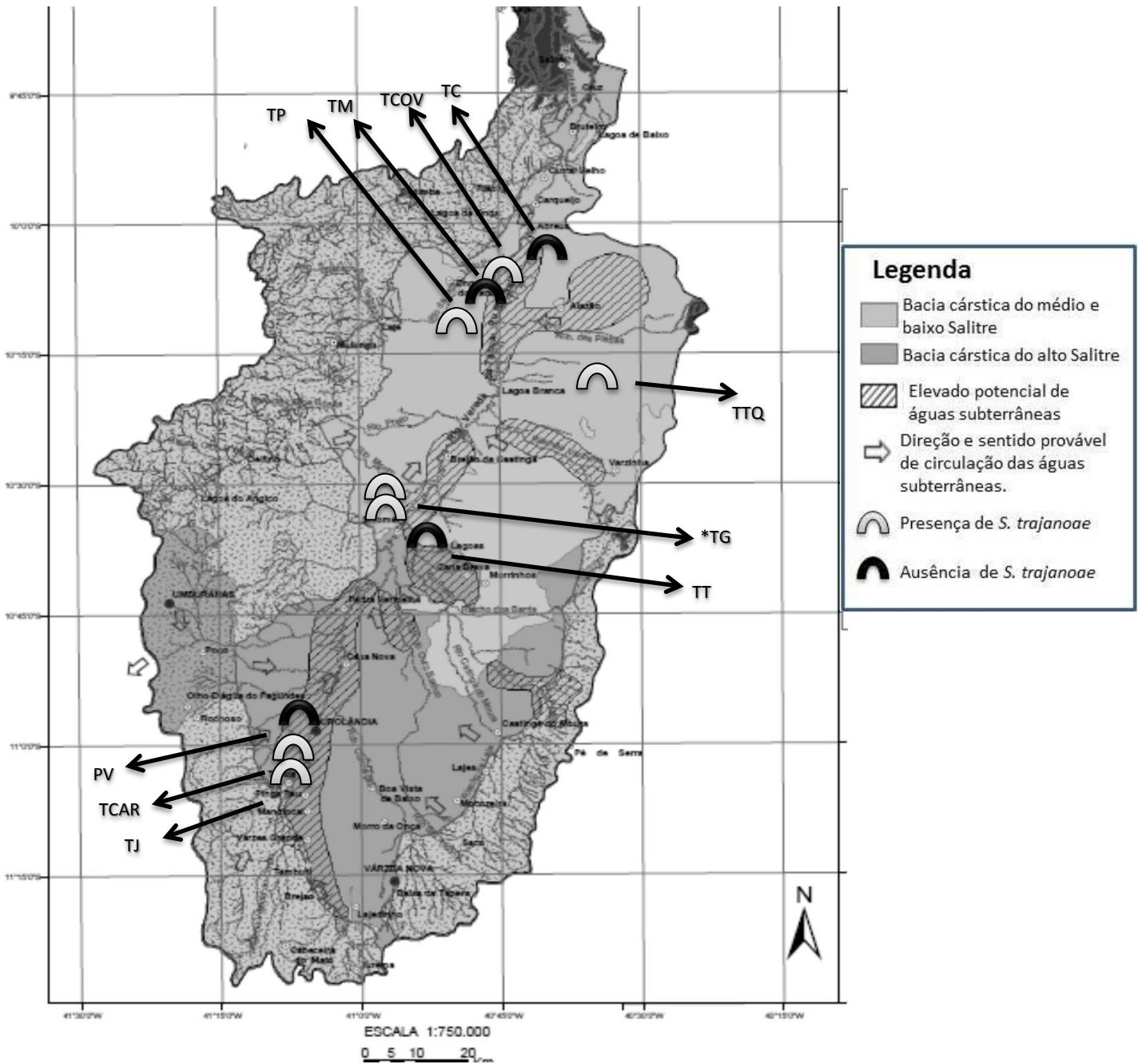


Figura 6. Mapa hidrogeológico apresentando uma possível rota de fluxo nos domínios aquíferos da bacia do salitre (Adaptado de Ribeiro 2005).

Discussão

KOENEMANN & HOLSINGER (2000), registraram a presença de *S. trajanoae* para as seguintes cavernas da bacia do rio Salitre: Toca do Convento, Toca do Pitu, Toca do Gonçalves e Toca do Teodoro. No presente estudo foi confirmada a presença de populações de *S. trajanoae* para cinco cavernas do total de nove amostradas ao longo da bacia, incluindo Toca do Convento e Toca do Pitu. O sistema formado pelas cavernas Toca do Gonçalves e Toca do Teodoro (*TG na Figura 5) na região do médio Salitre não foi possível ser amostrado durante os períodos de coleta da pesquisa devido a um rebaixamento do nível freático, que tornou as galerias da caverna, anteriormente inundadas, em secas, e, conseqüentemente, sem macro – acesso ao lençol freático. A redução dos níveis de água da caverna ao longo da última década, tem sido acompanhada por pesquisas recentes e atribuídas a combinação de dois fatores: A retirada da água através de bombas elétricas para uso na irrigação de tomate e pimentão por agricultores da região; e o longo período de estiagem na região sem chuvas fortes nos últimos três anos(SOUZA - SILVA & FERREIRA, 2016).

Araújo & Peixoto (2014), registraram a ocorrência de *S. trajanoae* na Toca da Tiquara. O presente trabalho registra mais dois novos habitats para *S. trajanoae*: Toca do Carlito e Toca da Jurema. Esses são os registros da espécie mais ao sul da bacia, os primeiros na sub-região do alto Salitre.

Apesar do domínio aquífero cárstico na bacia do Salitre apresentar três regiões distintas com relação aos aspectos hidrogeológicos, esse fato parece não influenciar na distribuição da espécie *S. trajanoae*, uma vez que foi possível registrar exemplares dessa espécie em cavernas do alto, médio e baixo Salitre. A maioria dos estudos de distribuição longitudinal de uma espécie em áreas cársticas, é focado em gradientes hidrogeológicos. Coulter & Galarowicz (2015), atribuíram a diferenças de temperatura e de fluxo da água interferindo nas assembleias de peixes, entre áreas a jusante e a montante. Descontinuidades geomorfológicas, tipos de sedimentos e principalmente impactos de inundações e de mudança nas zonas de descargas mostram algum tipo de interferência na distribuição (LUHMANN et al. 2011; ESSAFI et al. 1992; RESH et al., 1988). Poucos são os estudos relacionando aspectos hidroquímicos à distribuição de invertebrados em água subterrânea.

Di Lorenzo e colaboradores (2003) observaram um gradiente hidroquímico influenciando na distribuição de copepodas subterrâneas na região nordeste da Itália. Isso aponta uma maior concentração de copepodas estigóbios, isto é, exclusivamente subterrâneas na região a montante com menores concentrações de cloreto e sulfato. Outros estudos feitos nas zonas temperadas, mostram uma tendência para a diminuição de espécies estigóbias ao longo de um eixo longitudinal, diminuindo as espécies com o aumento da distância da cabeceira de drenagem da bacia (LAFONT e MALARD 2001; MALARD et al., 2003). Apesar de *S. trajanoae* ter sido encontrada em todas as sub-regiões da bacia estudada, não foram constatados aspectos seguros sobre a influência das variáveis ambientais no tamanho das populações.

O mapa hidrogeológico da bacia do rio Salitre (**Figura 6**) mostra uma circulação das águas subterrâneas congruente com a distribuição da espécie *S. trajanoae*. Sendo uma espécie estritamente subterrânea, se essas populações estiverem trocando genes entre si, isso implica que a espécie pode ser utilizada como um indicador natural de conectividade hidráulica no aquífero. Por outro lado, se essas populações estão atualmente isoladas, alguns aspectos devem ser considerados para explicar sua atual distribuição.

Estudos em escala de tempo geológico mais amplos apresentam a dispersão e a vicariância como os dois principais modelos para explicar a história distribucional de espécies em ambientes cársticos (CULVER et al., 2009). Em ambos os modelos assume-se que as populações ancestrais das águas superficiais estão extintas. No modelo da vicariância, a espécie ubíqua no passado teria invadido várias cavernas a partir da superfície, e após a extinção do ancestral superficial a distribuição atual reflete a invasão do passado. No modelo da dispersão, a colonização das cavernas foram eventos raros, mas subsequentes migrações dentro do aquífero explicam a distribuição atual (**Figura 7**).

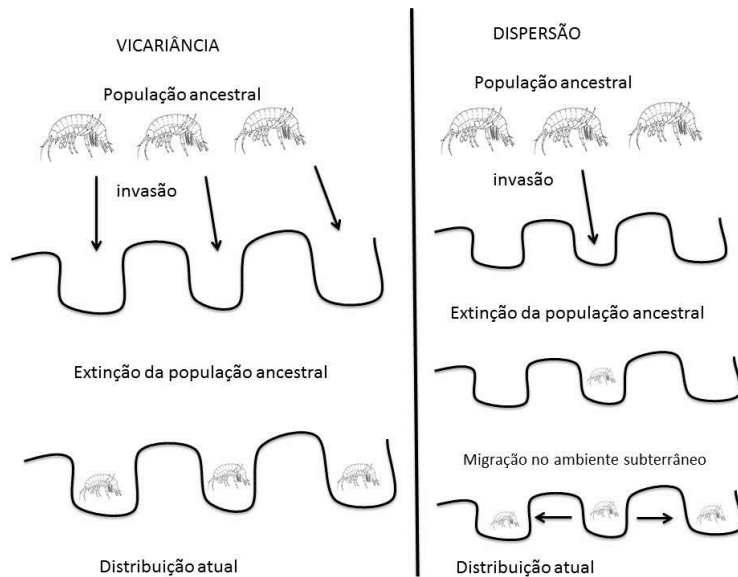


Figura 7. Diagrama dos modelos de vicariância e dispersão de crustáceos em cavernas, adaptado de (CULVER et al.,2009).

Os modelos apresentados no diagrama da (**Figura 7**), podem ser utilizados para explicar o padrão biogeográfico e o processo de especiação do gênero *Spelaeogammarus* nas áreas cársticas do Estado da Bahia. As espécies do gênero *Spelaeogammarus* estão distribuídas em uma série de cavernas, em áreas cársticas descontínuas ao longo de uma distância linear de cerca de 1.200 km, de norte ao sul da Bahia. Os registros para cada espécie, por área cárstica, são: *S. santanensis* -1 caverna, *S. bahiensis* 1 caverna, *S. spinilacertus* - 2 cavernas, *S. titan*- 1 caverna, *S. sanctum* 1 caverna e *S. trajanoae* - 7 cavernas (**Figura 8**). É curiosa a ausência do gênero no carste da bacia do rio Verde e Jacaré, contíguo à bacia do rio Salitre. Futuros estudos na área podem esclarecer essa lacuna.

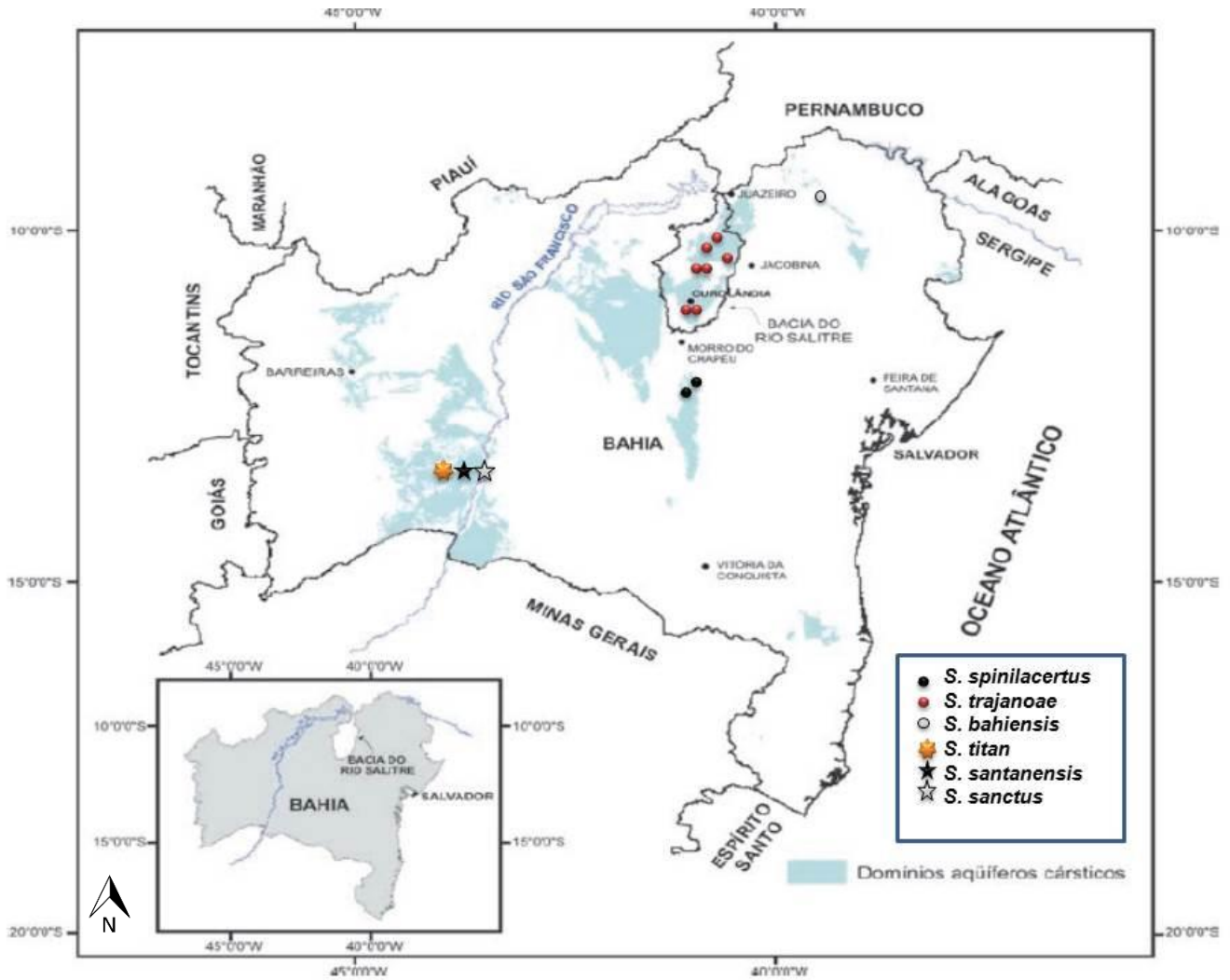


Figura 8. Distribuição das cavernas com registro de espécies do gênero *Spelaeogammarus* na Bahia. Figura dos autores.

Holsinger (1986) considera que os anfípodes subterrâneos possuem limitadas habilidades de dispersão, isso devido à ausência de larvas livre – natantes, combinado ao fato de que a maioria dos anfípodes subterrâneos vive em águas rasas e intimamente ligados ao substrato. Segundo Holsinger (1991), dada à combinação de dispersão limitada e alta taxa de endemismo de anfípodes estigóbios, o modelo de vicariância tem uma probabilidade muito maior de fornecer explicações satisfatórias para padrões de distribuição no presente, do que em cenários com base no modelo de centro de origem de dispersão.

A maioria dos trabalhos relacionando a vicariância a padrões de distribuição de anfípodes apontam processos tectônicos, regressões marinhas e disjunções transoceânicas como responsáveis pelas barreiras que permitiram a especiação (BOUTIN & COINEAU, 1988; COINEAU, 1994; HOLSINGER, 1994; FIER et al., 2013). Na escala das áreas cársticas do Estado da Bahia, flutuações paleoclimáticas restringindo anfípodes superficiais em

refúgios de habitat subterrâneos durante longos períodos secos, pode ser uma hipótese plausível para explicar a distribuição e especiação do gênero *Spelaeogammarus*. De acordo com Wang et al.(2004), o interior da Bahia passou por marcantes flutuações climáticas durante os últimos 210.000 anos, sendo que as fases úmidas foram bastante curtas, representando apenas 8% dos últimos 210 milhões de anos.

As populações de *S. trajanoae* na bacia do rio Salitre, apesar de registradas em uma faixa ampla da bacia, não foram encontradas em todas as cavernas amostradas. Já que os parâmetros físico-químicos parecem não ter efeito sobre a distribuição da espécie, não está claro o motivo da ausência da espécie em cavernas como a Toca da Trincheira, Toca do Cesário, e, principalmente, na Toca do Martiliano que é conectada hidraulicamente com a Toca do Convento (ROCHA e GENTHNER, 1997). Mesmo em cavernas em que o lençol freático aflora em mais de um ponto, como é o caso da Toca da Tiquara e Toca do Convento, a espécie foi encontrada restrita a um único ponto, corroborando o baixo poder de dispersão de anfípodes subterrâneos descrito na literatura. É possível que outros fatores (a espécie não estava presente no momento da amostragem ou algum fator ecológico como competição ou predação), justifiquem a ausência das populações nessas cavernas.

No entanto, conjectura-se que a atual distribuição reflete um processo equivalente ao que poderia explicar a distribuição do gênero, porém em uma escala menor de espaço e tempo. Mudanças climáticas a partir do último máximo glacial, poderia ser a causa da redução de uma população que no passado geológico recente teria sido abundante em todo o aquífero cárstico do Salitre. De acordo com Trajano et al. (2016), sob condições secas, o aumento das taxas de extinção são esperadas em habitats subterrâneos, devido a uma drástica falta de aporte de nutriente entre outras condições adversas. Auller (2000), destaca várias evidências que indicam que no passado houve um clima mais úmido na área do presente estudo. Dentre elas citam-se: vales fluviais meandantes hoje secos; terraços fluviais com seixos de grande diâmetro indicando rios com alto gradiente; tufos calcários hoje inativos indicando fluxo de água saturada por bicarbonato de cálcio; fósseis de vertebrados de grande porte, indicando vegetação luxuriante; entre outros. Amostras datadas pelo método U-Th feitas em espeleotemas na Toca da Boa Vista e em tufos calcários da região da bacia do Salitre, apontam o período mais úmido, no máximo glacial, há 18 mil anos atrás. As datações nos tufos indicam que esses depósitos estavam ativos no máximo glacial, sendo interrompido o fluxo de água e a formação dos tufos no início do período Holoceno, cerca de 9 mil anos atrás. Portanto, a quantidade de chuvas era maior, e a vegetação era mais desenvolvida no

final da época glacial, tornando – se cada vez mais seca até o presente (AULER, 2000; AULER et al.,2009).

Futuros estudos com dados genéticos moleculares, podem responder as hipóteses aqui aventadas, para especiação do gênero nas áreas cársticas da Bahia, e isolamento das populações da espécie na bacia do rio Salitre.

Considerações finais

Este estudo apresentou registros de novos habitats para distribuição da espécie *Spelaeogammarus trajanoae*, elevando para 7 o número de cavernas onde a espécie é encontrada na bacia do rio Salitre. Também caracterizou-se o aquífero cárstico em três sub-regiões, do ponto de vista hidroquímico: alto Salitre, representado por águas cloretadas cálcicas; médio Salitre com águas mistas; e baixo Salitre, com águas bicarbonatadas cálcicas. Não foi constatada a influência das características hidroquímicas do aquífero na distribuição da espécie, embora não existe segurança sobre a influência no tamanho das populações.

Conjectura-se que modelo de vicariância, combinado com o efeito de mudanças climáticas em duas diferentes escalas de tempo, pode explicar a distribuição do gênero e das populações da espécie. Longos períodos secos nos últimos 210 milhões, extinguindo os parentes superficiais, e deixando apenas relictos em áreas cársticas na Bahia promovendo a especiação do gênero *Spelaeogammarus*, e a última mudança climática iniciada há 18 mil anos isolando as populações de *S. trajanoae* em algumas poucos refúgios na bacia do rio Salitre.

Aguarda-se por estudos de relógios moleculares, e novas descobertas em outras bacias, que auxiliem no entendimento da evolução, tanto do aquífero cárstico, quanto do gênero *Spelaeogammarus*.

Referências

ARAÚJO, A.V. & PEIXOTO, R.S. The Impact of Geomorphology and Human Disturbances on the Faunal Distribution in Tiquara and Angico Caves of Campo Formoso, Bahia, Brazil. *Ambient Science*, 2014: Vol. 01(1).

- AULER, A.S, SMART P.L, WANG, X, PILO´, L.B, EDWARDS, R.L, CHENG, H. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology* 106:142–153. 2009. doi:[10.1016/j.geomorph.2008.09.020](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.020)
- AULER A.S, FARRANT A.R. A brief introduction to karst and caves in Brazil. *Proc Univ Bristol Spelaeol Soc* 20:187–200.1996.
- AULER A. S. O clima do nordeste brasileiro durante o período glacial. *Revista O carste* Vol 12 (3): 150-151.2000.
- BASTOS-PEREIRA, R. & FERREIRA R.L. A new species of Spelaeogammarus (Amphipoda: Bogidielloidea: Artesiidae) with an identification key for the genus. *Zootaxa* 4021 (3): 418–432. 2015. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.4021.3.2>.
- BONACCI O, PIPAN T, CULVER D. A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geology* 56: 891–900.2009. DOI: 10.1007/s00254-008-1189-0.
- BOULTON A J, HUMPHREYS W.F, EBERHARD S.M. Imperilled subsurface waters in Australia: biodiversity, threatening processes and conservation. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 6: 41–54.2003.
- BOUTIN, C. & N. COINEAU. *Pseudoniphargus maroccanus* n. sp. (subterranean amphipod), the first representative of the genus in Morocco. Phylogenetic relationships and paleobiogeography. *Crustaceana* Suppl. 13: 1-19.1998.
- COINEAU, N. Evolutionary biogeography of the Microparasellid isopod *Microcharon* (Crustacea) in the Mediterranean Basin *Hydrobiologia* 287: 77-93, 1994.
- COUTER A. A., & GALAROWICZ T.L., Fish assemblage and environmental differences upstream and downstream of a cave: a potential reset mechanism. *Environ Biol Fish* (2015) 98:1223–123.1
- CULVER, D.C. PIPAN, T. SCHNEIDER, K. . Vicariance, dispersal and scale in the aquatic subterranean fauna of karst regions. *Freshwater Biology* (2009) 54, 918–929 doi:10.1111/j.1365-2427.2007.01856.x.

DI LORENZO T.,STOCH F.,GALASSI D.M.P. Incorporating the hyporheic zone within the river discontinuum: Longitudinal patterns of subsurface copepod assemblages in an Alpine stream. *Limnologica* 43 (2013) 288– 296. DOI 10.1007/s10531-016-1151-5.

ESSAFI, K., J. MATHIEU & J. L. BEFFY. Spatial and temporal variations of Niphargus populations in interstitial aquatic habitat at the karst/floodplain interface. *Regulated Rivers: research & management* 7: 83-92. (1992).

FIER C., ZAGMAJSTER, M. & FERREIRA, R.L. Two new Amphipod families recorded in South America shed light on an old biogeographical enigma, *Systematics and Biodiversity*, 11:2, 117-139. 2013. DOI: [10.1080/14772000.2013.788579](https://doi.org/10.1080/14772000.2013.788579).

HOLSINGER, J. R. Zoogeographic patterns of North American subterranean amphipod crustaceans. In R. H. Gore & K. L. Heck (eds), *Crustacean Biogeography*. Balkema, Rotterdam: 85-106.1986.

HOLSINGER, J. R. What can vicariance biogeographic models tell us about the distributional history of subterranean amphipods? *Hydrobiologia* 223: 43-45. 1991.

HOLSINGER, J. R. Sternophysigidae, a new family of subterranean amphipods (Gammaridea: Crangonyctoidea) from South Africa, with description of *Sternophysim calceola*, new species, and comments on phylogenetic and biogeographic relationships.*J. Crust. Biol.* 12: 111-124. 1992.

HOLSINGER, J. R. Pattern and process in the biogeography of subterranean amphipods. *Hydrobiologia*,287,p. 131-145.1994.

KOENEMANN, S. & HOLSINGERr, J.R. Revision of the subterranean amphipod genus Spelaeogammarus (Bogidiellidae) from Brazil, including descriptions of three new species and considerations of their phylogeny and biogeography. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 113 (1), 104–123. 2000.

LAFONT, M., MALARD, F. Oligochaete communities in the hyporheic zone of a glacial river, the Roseg River, Switzerland. *Hydrobiologia* 463, 75–81.2001.

LUHMANN AJ, COVINGTON MD, PETERS AJ, ALEXANDER SC, ANGER CT, GRENN JA, RUNKEL AC, ALEXANDER EC Jr. Classification of thermal patterns at karst springs and cave streams. *Ground Water* 49:324–335. 2011.

MALARD, F., GALASSI, D., LAFONT, M., DOLDEC, S., WARD, J.V. Longitudinal patterns mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology* 106:142–153. doi:10.1016/j.geomorph.2008.09.020. 2003.

NOTENBOOM, J. Marine regressions and the evolution of groundwater dwelling amphipods (Crustacea). *J. Biogeogr.* 18: 437-454. 1991.

PAGE, J.T., HUMPHREYS F., W. HUGES J.M. Shrimps Down Under: Evolutionary Relationships of Subterranean Crustaceans from Western Australia (Decapoda: Atyidae: Stygiocarid). *PLoS ONE* 3(2): e1618. 2008. doi:10.1371/journal.pone.0001618.

PHILLIPS, J.D. Biogeomorphology and contingent ecosystem engineering in karst landscapes. *Progress and Physical Geography* 2016, vol. 40 (4) 503-526.

RESH V.H., BROWN A.V., COVICH A.P., GURTZ M.E.LH.W, MINSHALL G.W., REICE S.R., SHELDON A.L., WALLACE J.B. & WISSMAR R.C. 1988. — The role of disturbance in stream ecology. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 7 : 433-455.

RIBEIRO, S. H. S. *Estudo das águas subterrâneas da bacia do rio Salitre, Bahia*. Salvador. 2005. 109f. Monografia (Graduação)-Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

ROCHA, L.F.S.& GENTHNER, C. Gruta do Martiliano- Campo Formoso/BA. *Revista O carste* Vol. 9(4) p. 98-100. 1997.

SENNA, A.R., ANDRADE, L.F., CASTELO-BRANCO, L.P. & FERREIRA, R.L. Spelaeogammarus titan, a new troglotic amphipod from Brazil (Amphipoda: Bogidielloidea: Arteniidae). *Zootaxa*, 3887 (1), 55–67.2014. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.3887.1.3>.

SILVA, A. B. *Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia* – Salvador : CBPM, 2006. – (Série Arquivos Abertos ; 24). Organização e síntese por: Luiz Luna Freire de Miranda e Luiz Rogério Bastos Leal.

SOUZA-SILVA M, MARTINS RP, FERREIRA RL. The first two hotspots of subterranean biodiversity in South America *Subterranean Biology* 19: 1–21 (2016) doi: 10.3897/subtbiol.19.8207.

TRAJANO, E. GALLÃO, J.E. BICHUETTE, M.E. Spots of high diversity of troglobites in Brazil: the challenge of measuring subterranean diversity. *Biodivers Conserv* (2016) 25:1805–1828.

WANG X, AULER AS, EDWARDS RL, CHENG H, CRISTALLI PS, RICHARDS DA, SMART PL, SHEN CC (2004) Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. *Nature* In: Trajano, E. Gallão, J.E. Bichuette, M.E.(2016). Spots of high diversity of troglobites in Brazil: the challenge of measuring subterranean diversity. *Biodivers Conserv* (2016) 25:1805–1828.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

O estudo aqui apresentado apesar de simplificado pode subsidiar futuros trabalhos em detalhe nessa área cárstica de importante suprimento de água na região semiárida e com rara e ainda desconhecida fauna aquática subterrânea.

Referente à fauna da água subterrânea esse estudo apresentou novos dados sobre a riqueza e a distribuição de grupo de invertebrados. Destaque para as descobertas de exemplares de crustáceos componentes da meiofauna desconhecidas pela ciência e que ainda aguardam por especialistas para que sejam formalmente descritos. Esses crustáceos são espécies restritas a água subterrânea. O Syncarida Bathynellacea foi encontrado na Toca do Pitu e este é o primeiro registro pra essa ordem em águas subterrâneas da região nordeste. O Harpacticoida da família Parastenocarididae coletado na Toca do Convento é o primeiro registro para essa família em água subterrânea do Brasil. Também foi possível identificar novos habitats para a espécie endêmica *Spelaeogammarus trajanoae* esses dados sobre a distribuição de *S. trajanoae* tem relevante interesse científico por ser um extraordinário exemplo de uma antiga fauna sobrevivente a longos períodos de mudanças geológicas e climáticas.

A caracterização hidroquímica permitiu classificar o aquífero em três sub-regiões distintas: alto Salitre representado por águas cloretadas cálcicas; médio Salitre com águas mistas e baixo Salitre com águas bicarbonatadas cálcicas. Os pontos do aquífero caracterizados por águas mais cloretadas com maior concentração de nitratos foram as que apresentaram maior riqueza e diversidade. Entretanto, a fauna encontrada nesses pontos foi caracterizada como abundante em organismos resistentes a poluentes (Ostracoda e larvas de insetos Chironomidae). As águas bicarbonatadas com menor concentração de nitrato foram as que apresentaram uma maior abundancia e diversidade de invertebrados estigóbios, isto é, que são exclusivamente subterrâneos.

Análise das estigofauna mostrou que a abundância e riqueza estigóbios foram menores em pontos claramente afetados pelas altas concentrações de nitrato de tal forma que a estrutura da comunidade poderia estar respondendo não somente a gradientes naturais como também induzidas pelo homem.

APÊNDICE

Justificativa da participação dos co-autores na participação em ambos os artigos:

Luiz Rogério Bastos Leal – orientador.

Doriedson Ferreira Gomes – co-orientador.