XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DE PADRÕES DE ISÓTOPOS DA ÁGUA NO ESCOAMENTO DE BASE EM UMA BACIA COSTEIRA

Camyla Innocente[1]; Alondra Beatriz Alvarez Perez [2]; João Henrique Macedo Sá [3]; Pedro Ferreira Arienti[4] & Pedro Luiz Borges Chaffe[5]

RESUMO - As características químicas e isotópicas da água podem fornecer informações importantes sobre origem e composição da água no hidrograma. O objetivo deste trabalho foi investigar os controles dos parâmetros químicos do escoamento de base em uma bacia costeira. A bacia hidrográfica da Lagoa do Peri encontra-se em uma região de transição entre clima tropical e temperado, coberta por Mata Atlântica e com formação geológica de granito e dique. Foram coletadas amostras de água em diferentes fontes (precipitação, perfil do solo, nascentes, banhado, rios e lagoa) para análise de parâmetros químicos da água (δ^2H, $\delta^{18}O$, pH e condutividade elétrica). No total, analizou-se 144 amostras, em cinco diferentes dias de campanha de junho a setembro de 2018. Os resultados apontam que o fracionamento dos isótopos aumenta conforme a água que chega na bacia hidrográfica segue o percurso solo – rio – lago. O maior fracionamento ocorre na lagoa. A composição da água varia de acordo com o estado de umidade, sendo que em situações extremas de seca e umidade a composição da água está pouco relacionada a área de drenagem.

Palavras-Chave – Escoamento de base, parâmetros químicos não conservativos, isótopos

ABSTRACT– The chemical and isotopic characteristics of water provide important information about the baseflow water source and composition. The objective of this paper was to investigate the controls on the chemical composition of the baseflow of a coastal catchment. The Peri Lagoon watershed is located in a region between tropical and temperate climate, covered by Atlantic Forest and with geological formation of granite and dike. Water samples were collected from different sources (precipitation, soil profile, springs, wetland, rivers and lagoon) for analysis of chemical parameters of water (δ^2H, $\delta^{18}O$, pH and electrical conductivity). In total 144 samples were analyzed from five different campaign from June to September 2018. The results indicate that the fractionation of the isotopes increases as the water arrives in the basin follows the route: soil, river and lagoon. The largest fractionation occurs in the lagoon. The composition of the water varies according to the state of humidity, and in extreme situations of drought and humidity the composition of the water is poorly related to the drainage area.

Keywords – Baseflow, nonconservative chemical parameters, isotopes

INTRODUÇÃO

O entendimento de como a estrutura da bacia está relacionada ao ciclo hidrológico e aos processos biogeoquímicos ainda é um desafio importante (Beven, 2016). As características químicas do escoamento de base podem fornecer informações importantes sobre as mudanças de fontes de água

1) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. camylainnocente@gmail.com
2) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. alondra_920@hotmail.com
3) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. jhmsa88@gmail.com
4) Universidade Federal de Santa Catarina, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. pedropp1995@gmail.com
5) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. pedro.chaffe@ufsc.br

(Fischer *et al.*, 2015) e tempo de residência. O escoamento de base é a porção do escoamento que vem do armazenamento de água subterrânea e outras fontes atrasadas em relação a água da chuva. Muitos estudos em todo o mundo têm monitorado os padrões químicos do escoamento de base para entender melhor o caminho da água dentro da bacia hidrográfica (Asano e Uchida, 2010; Egusa *et al.*, 2016; Fischer *et al.*, 2015; Peralta-Tapia *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2016).

A partir da análise de características químicas é possível definir a composição isotópica da água para diferentes fontes (e.g. água intersticial, água subterrânea). Geralmente os pontos com água mais jovem são alimentados com água proveniente do perfil do solo. Pontos mais baixos são alimentado diretamente pelo lençol freático, com uma maior interação da água com as rochas (Egusa *et al.*, 2016; Peralta-Tapia *et al.*, 2015). A partir das características isotópicas da água é possível calcular a composição da água na rede de drenagem. Essas soluções são chamadas de *end-member* (EM), e a utilização dessa técnica é chamada de *end-member mixing analyses* (EMMA).

Neste trabalho foi investigado os controles dos parâmetros químicos do escoamento de base em uma bacia costeira. Primeiramente foi verificado o fracionamento dos isótopos dentro da bacia. Em seguida foi definido os EM e calculado a composição do escoamento baseado na assinatura isotópica de cada EM. Foi analisado a relação entre a composição da água em relação a área de drenagem. Por fim, avaliou-se a relação à composição da água de cada EM com as características não conservativas da água.

MATERIA E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo se encontra no sul da Ilha de Santa Catarina, ao sul do Brasil (Figura 1), com clima subtropical, verão quente e sem estação seca. A precipitação média anual é de 1800 mm. A bacia hidrográfica da Lagoa do Peri possui 20 km², a lagoa contida dentro da bacia hidrográfica tem uma área superficial de 5,7 km² (Fontes *et al.*, 2013). A Bacia Hidrográfica do Peri é cercada por morros cobertos por alguns remanescentes da Mata Atlântica em dois estágios – intermediário e avançado -, campo de criação de gado e restinga de vegetação costeira, que a mantém separada do Oceano Atlântico (Silva, 2000) (Figura1b). A única comunicação de saída da Lagoa em direção ao Oceano Atlântico é por meio de rio denominado Sangradouro, onde está localizado o principal ponto de coleta água doce para abastecimento do sul da Ilha de Santa Catarina. A geologia predominante é granito e dique (Figura 1b) caracterizando assim rochas fraturadas.

Para as análises foi separado a bacia hidrográfica em quatro diferentes regiões (Figura 2a). A Região 1 é caracterizada por pequenas bacias de encosta que sofrem influência direta do mar e há pouca interferência humana.

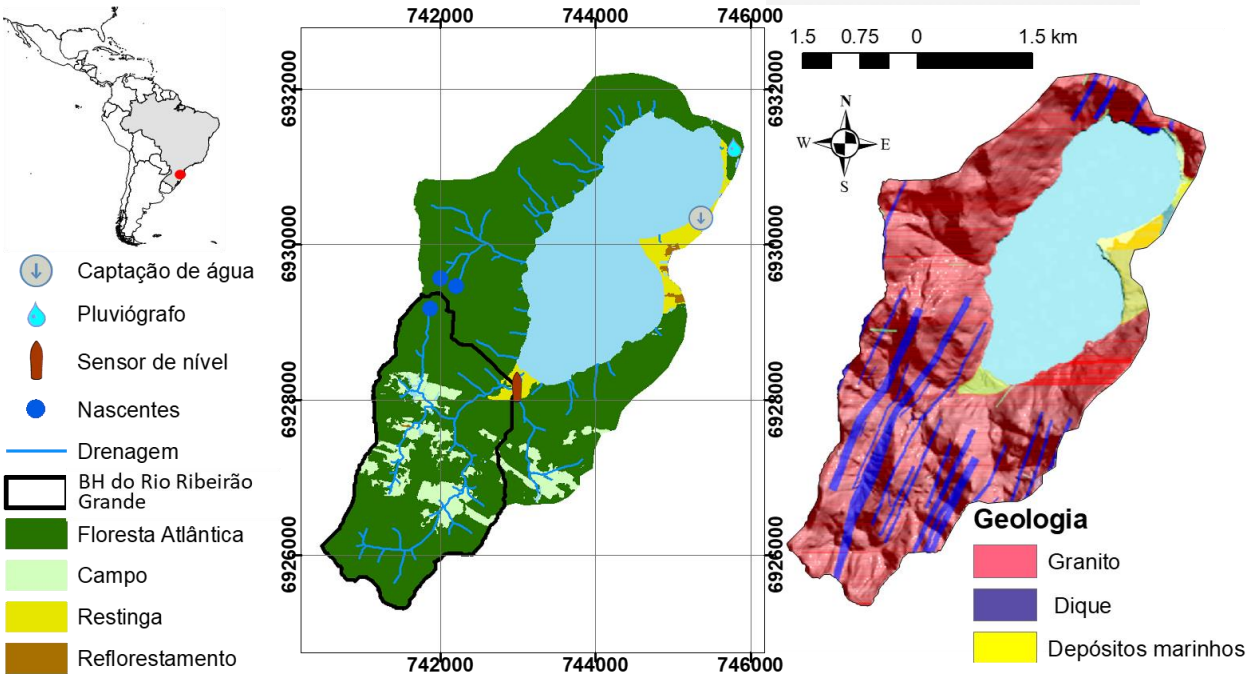


Figura 1- Localização, cobertura vegetal e formação geológica da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri. Onde BH é bacia hidrográfica.

Na Região 2 (Figura 2a) há uma presença muito forte de rochas fraturadas, que pode fazer com que haja uma grande transferência de água subterrânea entre as bacias hidrográficas (Egusa *et al.*, 2016). A Região 2 é uma bacia hidrográfica que possui 5,30 km², de quarta ordem, a maior ordem em toda a bacia hidrográfica da Lagoa do Peri. Em relação à cobertura vegetal, cerca de 25% da área é coberta por Mata Atlântica em estágio inicial, segundo o levantamento realizado pela Prefeitura Municipal de Florianópolis, porém, por meio de fotos aéreas e saídas a campo, percebeu-se que a Mata Atlântica em estágio inicial é na verdade pastagem para criação de gado e residências.

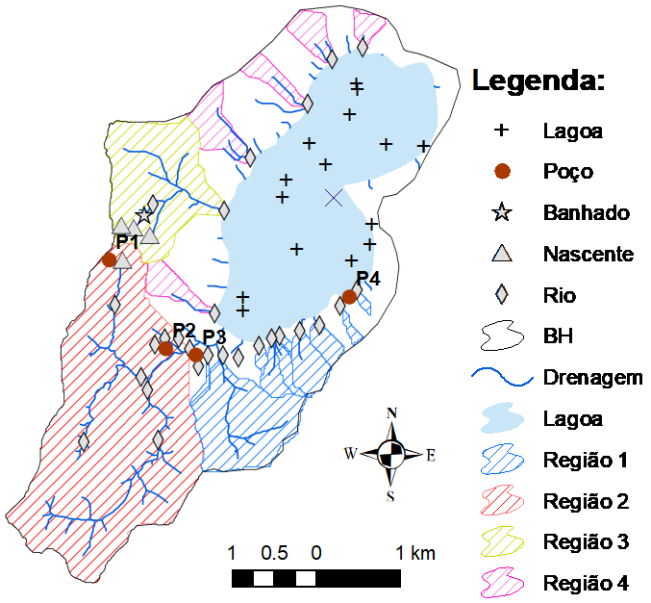
A bacia da Região 3 possui 1,6 km² e é de terceira ordem. Diferentemente da Região 2, esta é coberta inteiramente de Mata Atlântica em estágio avançado e sua formação geológica é totalmente granito. A Região 4 é composta por bacias de encosta, coberta por Mata Atlântica em estágio avançado e que há pouca, ou nenhuma, interferência humana e com pouca presença de rocha fraturada.

Monitoramento

Foram realizados cinco dias de campanhas de monitoramento de escoamento de base ao longo do ano de 2018, de junho a setembro com espaçamento temporal de aproximadamente três semanas entre as campanhas (Figura 2b). A coleta de água para análise das características químicas (δ^{2}H‰, δ^{18}O‰, pH e condutividade elétrica) foi feita em quatro diferentes fontes: i) água do perfil do solo; ii) água da lagoa; iii) escoamento de base (nascentes, banhado e rio); iv) precipitação.

Diferente das demais amostras, as amostras de precipitação foram coletadas sempre posterior a um evento (Figura 2c), o pluviômetro está localizado ao lado do pluviógrafo (Figura 1a). A localização das coletas de amostras é mostrada na Figura 2a.

(a)



(b)

	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
Data	06/06 08/06	26/06	16/07 17/07	14/08	27/09
Q_e	0,54	0,47	0,57	0,31	1,38
Região 1	7	2	9	9	9
Região 2	9	12	11	11	11
Região 3	-	4	6	4	4
Região 4	-	-	4	-	4
Lagoa	9	-	3	-	4
Rio	12	11	22	17	21
Nascente	1	2	3	3	2
Poço	3	4	4	3	4
Banhado	-	1	1	1	1

(c)

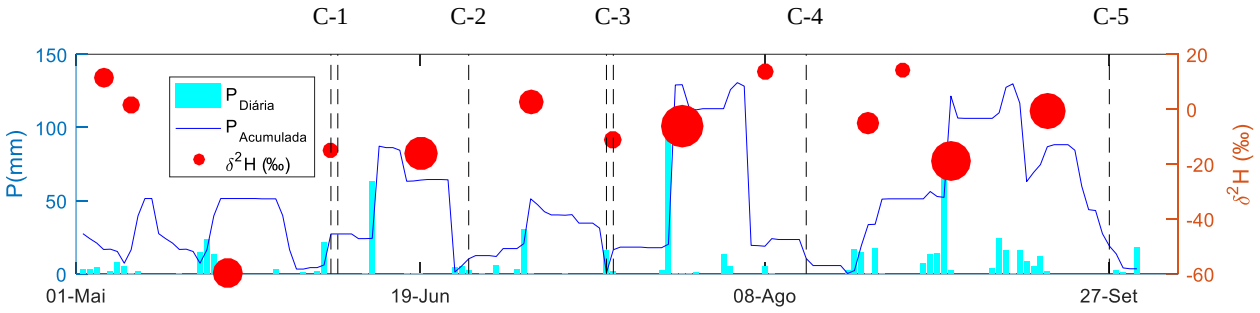


Figura 2 – a) Pontos onde foi coletada água, ao menos uma vez, durante as campanhas de monitoramento hidrológico sob condições de escoamento de base, onde BH é bacia hidrográfica; b) Informações sobre as campanhas realizadas no ano de 2018, onde Q_e é vazão específica em mm.dia^{-1}; c) Hietograma diário e precipitação acumulada nos dez dias anteriores ($P_{Acumulada}$). Os círculos em vermelho apresentam os valores do δ^2H‰ e variam seu diâmetro conforme o volume da precipitação, variando entre 11 a 89 mm. As linhas pontilhadas indicam os dias em que foram realizadas as campanhas de monitoramento de escoamento de base.

As coletas de água para análise de isótopos foram feitas de modo a evitar o efeito da evaporação. Para coletar a água do perfil do solo foram instalados quatro poços dentro da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri (Figura 2a), com profundidades de 1,2, 0,6 2,1 e 1,2 m, para os poços P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Primeiramente o poço era esvaziado, esperava-se o poço encher novamente para então coletar a água. A montante do poço P1 foi aterrado o terreno para a construção de um lago artificial.

A água da Lagoa foi coletada por meio de uma bomba manual a um metro de profundidade. Coletou-se água em locais espacialmente distribuídos, os quais variaram entre as campanhas de amostragem. A coleta do escoamento de base foi feita diretamente no rio em locais onde havia água corrente.

A coleta da água da chuva foi feita por meio de um pluviômetro. O pluviômetro utilizado é constituído de um cano de PVC de 5 cm de diâmetro e 60 cm de altura, no topo há um funil feito de

garrafa de plástico com capacidade de cinco litros com diâmetro de 20 cm. Foi colocado dentro do tubo de PVC uma bola de pingue-pongue para diminuir a interação direta entre a água e o ar, além de aumentar a tensão superficial que ajudava a diminuir a evaporação. A cada coleta o pluviômetro era esvaziado e limpo.

A notação do valor dos isótopos é em partes por mil, e é calculada seguindo a equação:

$$\delta_{Amostra} = \left(\frac{R_{Amostra}}{R_{Referência}} - 1\right) \times 1000 \quad (1)$$

onde δ é desvio relativo, R é a razão entre o isótopo que se quer mensurar e o isótopo mais leve do mesmo elemento químico. A razão de referência utilizada para o cálculo foi é VSMOW (*Vienna - Standard Mean Ocean Water*) sendo esta igual a zero.

Mediu-se o pH em laboratório, onde a sonda foi recalibrada no máximo a cada 10 medições. A medição de condutividade elétrica foi feita sempre no local de coleta da amostra. A sonda de condutividade elétrica foi calibrada em laboratório no início do período de monitoramento, diferentemente da sonda de pH, esta sonda não precisa ser recalibrada com frequência. Em cada ponto de monitoramento foi gravado as coordenadas com um GPS com o erro, dentro da floresta, médio de 5 metros.

Cálculo da composição da água de diferentes fontes

Para particionar a fração do escoamento de base da água usamos um modelo de mistura de dois componentes. A proporção da fração de cada *end-member* dá-se pela resolução do sistema:

$$A = p1 \times EM1 + p2 \times EM2 \quad (2)$$

$$1 = p1 + p2 \quad (3)$$

onde A é a assinatura isotópica da amostra do escoamento de base, EM1 e EM1 são as assinaturas isotópicas dos *end-member* determinados e p1 e p2 é a proporção de cada EM. Foi considera apenas a assinatura isotópica baseado no δ^2H‰, uma vez que o δ^{18}O% e o δ^2H‰ são correlacionados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Valores de isótopos na bacia hidrográfica da Lagoa do Peri

O fracionamento de isótopos no ciclo da água ocorre principalmente por causa da evaporação. As moléculas mais leves passam mais facilmente para o estado de vapor. Quando mais positivo o valor do δ^2H, mais enriquecida está a amostra de ^{2}H. A Figura 3 mostra os valores médios de δ^2H das amostras coletadas nesse estudo. A Reta Mundial das águas meteóricas, em dados atuais (VSMOW), é expressa por:

$$\delta^2H = (8{,}17 \pm 0{,}07)\delta^{18}O + (11{,}27 \pm 0{,}65) \quad (4)$$

inclinações menores que 8,17 indicam que a água sofreu fracionamento por causa da evaporação.

O valor médio de δ^2H precipitação foi ponderado pelo volume da precipitação. Ao contrário do que se esperava, a água do perfil do solo não enriqueceu em relação a precipitação. Isso pode ter

ocorrido porque, como a água coletada nos poços é atrasada em relação a água da chuva, a janela temporal da coleta dos poços não foi em resposta a chuva que caiu sobre a bacia durante o mesmo período de monitoramento.

A média da água coletada nos poços foi igual a média dos rios, podendo mostrar que os poços estão representando bem a composição isotópica do escoamento de base. Por fim, é possível perceber que há um grande enriquecimento de ^{2}H na lagoa, por efeito da evaporação, como esperado.

O caminho preferencial da água ao entrar na bacia hidrográfica é o solo, do solo aos rios e dos rios a lagoa. Pode-se perceber que a água evapora durante todo o processo desde a entrada até a saída e isso é perceptível na Figura 4a. A mudança mais brusca entre as declividades, como já esperado, foi do rio para a Lagoa.

Na Figura 4b a variação do valor de $\delta^2 H$ também diminui conforme muda de compartimento, isso é esperado porque o tempo em que a água permanece nos compartimentos varia. Na lagoa, por exemplo, é provável que a água coletada seja proveniente de uma mistura da água atrasada em relação a precipitação e que em cinco meses a entrada de precipitação não faça variar o $\delta^2 H$

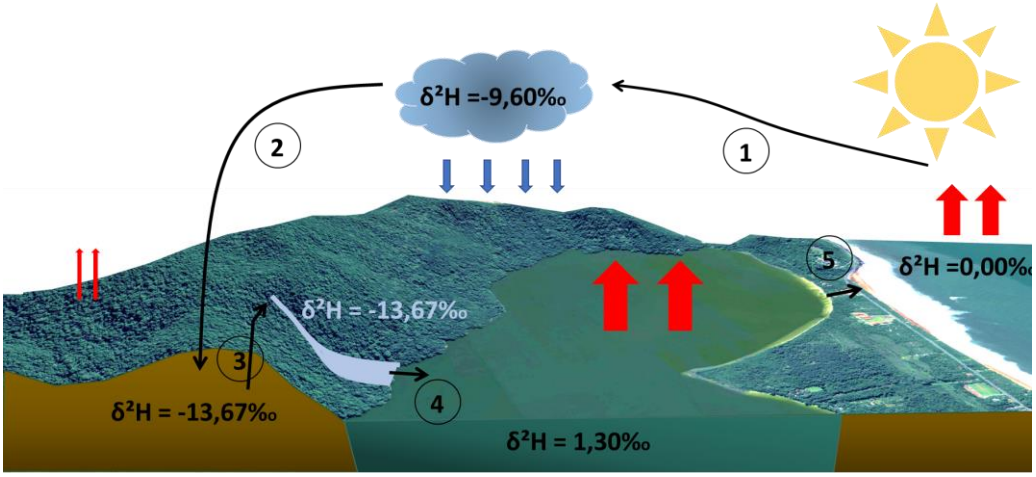


Figura 3 – Visualização do caminho preferencial da água dentro da bacia hidrográfica da lagoa do Peri. Os valores mostrados referem-se aos valores médios de isótopo para diferentes compartimentos durante o período de monitoramento. As setas em vermelho representam a evaporação, as setas em azul representam a precipitação.

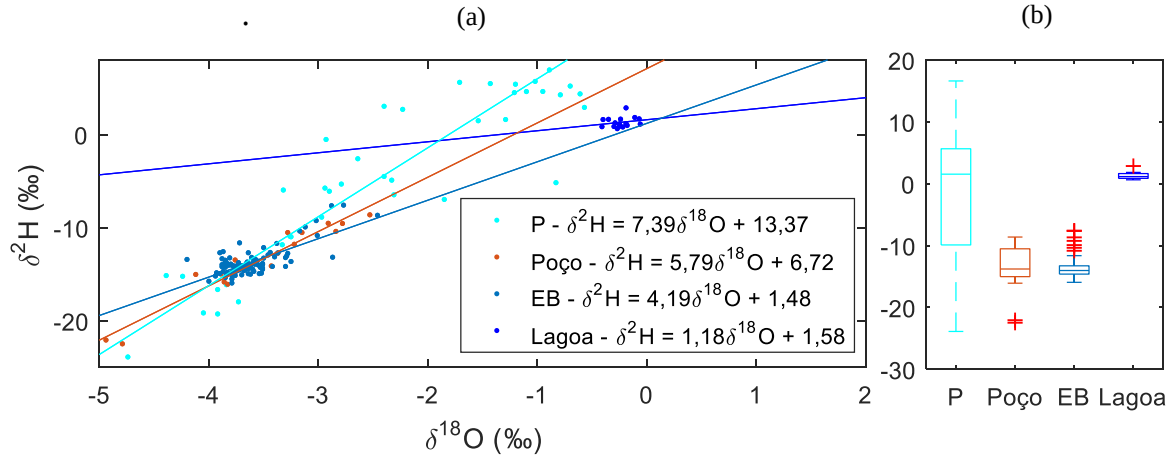


Figura 4 – a) Relação entre $\delta^2 H$ e $\delta^{18} O$ em diferentes fontes de água. b) Variação dos valores das amostras de cada fonte durante o período de monitoramento. Onde P é precipitação, EB é escoamento de base.

Escolha dos *end-member* (EM):

A Figura 5a mostra o comportamento isotópico de cada poço durante as campanhas de monitoramento de escoamento de base. Percebe-se que o valor do δ^2H dos poços diminui conforme a sua proximidade a Lagoa (Figura 5a).

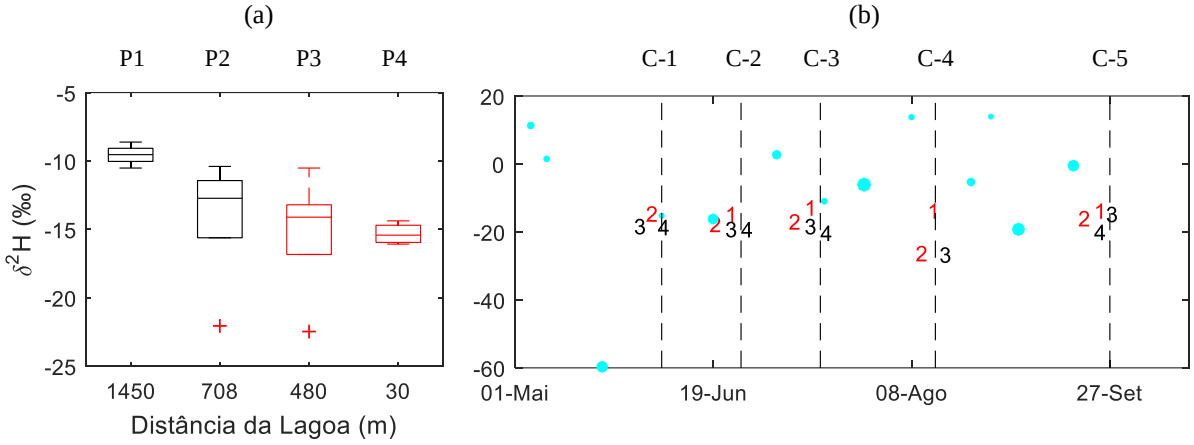


Figura 5 – a) Variação dos valores de isótopos para cada poço (P1, P2, P3 e P4) durante as cinco campanhas de monitoramento. Em preto os poços utilizados como EM1, e em vermelho como EM2 e. b) Variação dos poços e da chuva ao longo do tempo, onde os números correspondem ao número do poço e os círculos em azul a precipitação que variam conforme o volume de precipitação, entre 11 a 89 mm.

Espera-se que quanto mais o poço for sensível a entrada de água nova, maior será a sua variação entre as amostras, ou seja, o poço apresenta uma água jovem com o mesmo comportamento da água da chuva. As maiores variações foram encontradas no poço P2 e P3. Entre os poços, o dia em que os valores de δ^2H tiveram mais discrepância foi o dia com a menor vazão específica (C-4), e o dia em que os valores dos poços estiveram mais próximos entre si foi o dia com a menor vazão específica (C-5) (Figura 5b). Não foi possível verificar graficamente uma relação direta entre os valores dos poços e os valores da chuva (Figura 5b)

Os poços P1 e P4 apresentam os valores extremos da variação da água na rede de drenagem da bacia hidrográfica. Ambos os poços tem profundidades semelhantes (1,2 m), porém o poço P1 está distante da Lagoa e no topo do morro (270,1 m), enquanto que o P4 está perto da Lagoa em região baixa (6,7 m). Esses poços foram usados como EM. Na C-1 não foi coletado a água do P1 (havia água no poço, mas não foi coletada) e na C-4, não foi coletado a água do P4, pois o nível estava muito baixo e a água estava com muito sedimento. Para a C-1 foi utilizado o P2 como EM, e na C-4 foi utilizado o P3 em lugar do P4.

A Figura 6 apresenta o comportamento das amostras dos rios em cada dia de campanha. Nota-se que não há um comportamento dividido por região. Também é possível perceber, que a chuva anterior ao dia de campanha (círculos em ciano) não tem relação direta com o valor dos isótopos no escoamento de base, com exceção das duas primeiras campanhas em que a coleta foi feita dois dias depois da precipitação. Apenas na C-1 o EM não ficou em um dos extremos da variação dos isótopos.

A bacia estava mais úmida na C-5 (Q_e = 1,38 mmd^{-1}), onde os valores de isótopos do escoamento de base estiveram mais próximos aos valores do poço inferior, e na C-4, quando a bacia estava mais seca (Q_e=0,31 mmd^{-1}) os valores ficaram próximos ao poço superior

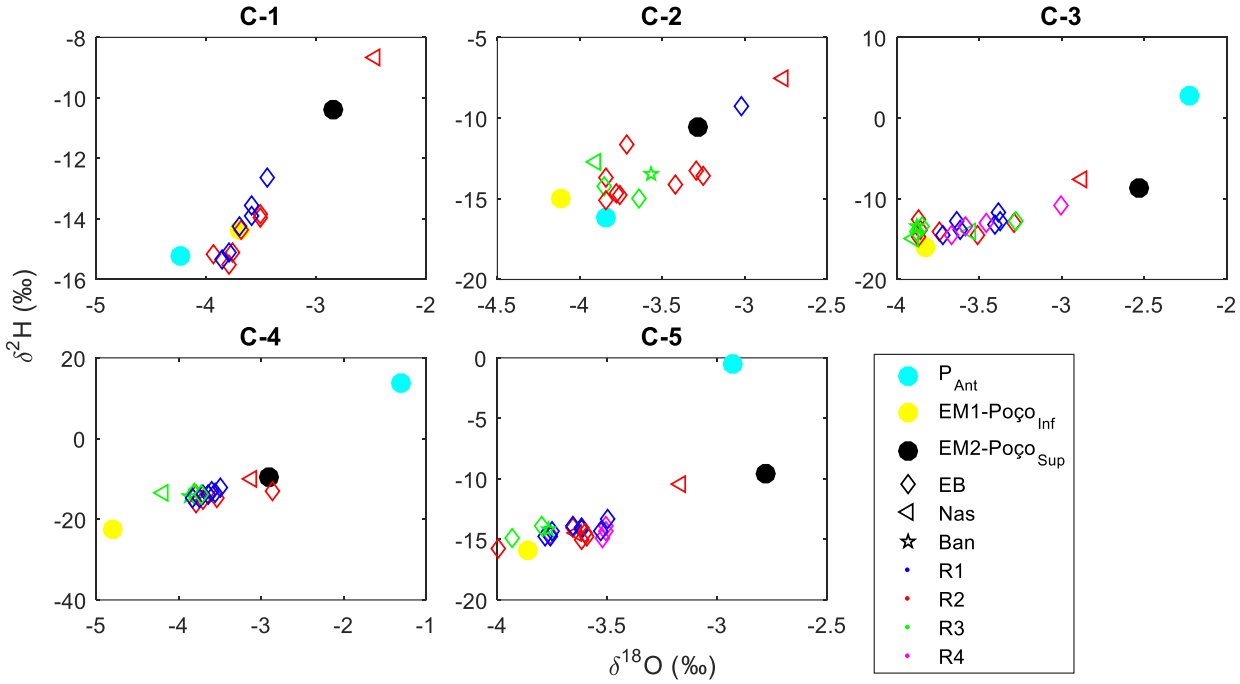


Figura 6 – Valores de isótopos mostrados por campanha, por fonte e região. Nas é nascente, EB é escoamento de base, Ban é banhado;

Relação entre a composição da água e área de drenagem

A Figura 7 mostra a relação entre a composição da água e a área de drenagem. Foram consideradas apenas amostras do escoamento de base onde foi possível estimar a área de drenagem.

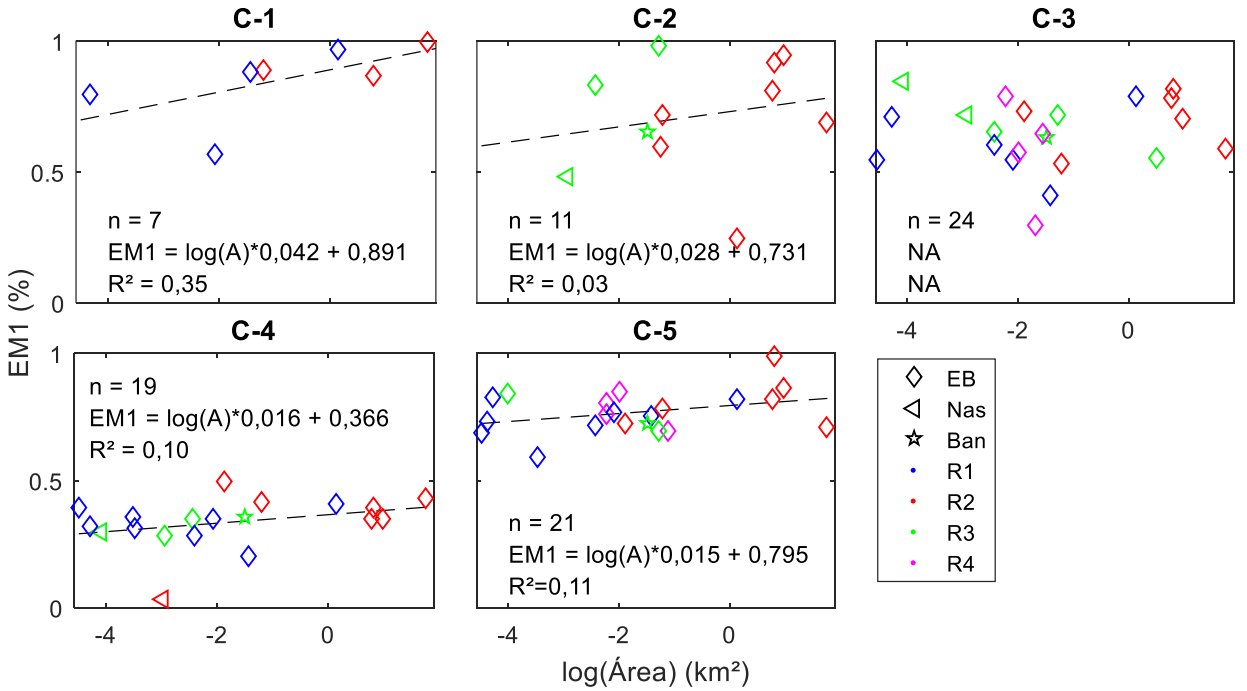


Figura 7 - Relação entre a porcentagem do *end-member*1 (EM1) e a área de drenagem por dia de campanha. Nas é nascente, EB é escoamento de base, Ban é banhado;

Espera-se que a composição da água esteja relacionado diretamente à estrutura da paisagem, como muitos trabalhos já mostraram (*e.g.* Asano e Uchida, 2010; Egusa *et al.*, 2016; Fischer *et al.*, 2015; Peralta-Tapia *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2016). Todos eles mostraram, principalmente uma relação forte com a área de drenagem. Porém, neste trabalho, a composição da água está fracamente relacionada a área de drenagem. Na C-3 todos os pontos das regiões R1, R3 e R4 apontam para uma relação inversa com a área dos outros dias de campanha e não foi ajustado um modelo de regressão com R^2 acima de 0.01. Nos dias de campanha onde foram observados os estados mais extremos de umidade (C-4 e C-5) o coeficiente angular da regressão linear apresentou valores muito baixos (0,015 e 0,016), ou seja, a composição da água varia muito pouco em relação a área.

Relação entre a composição da água com características químicas não conservativas da água

A Figura 8 mostra a relação entre a composição da água e a região da bacia hidrográfica. Espera-se que características químicas não conservativas da água apresentem uma mudança no seu valor de acordo com sua composição (*e.g.* Fischer *et al.*, 2015; Peralta-Tapia *et al.*, 2015). Nessa análise separamos por região os dados, já que tanto o pH, como a CE, estão relacionados diretamente ao solo e a vegetação. Foi descartado um ponto do conjunto da amostra em que o pH estava abaixo de 4, sendo considerado erro de medição.

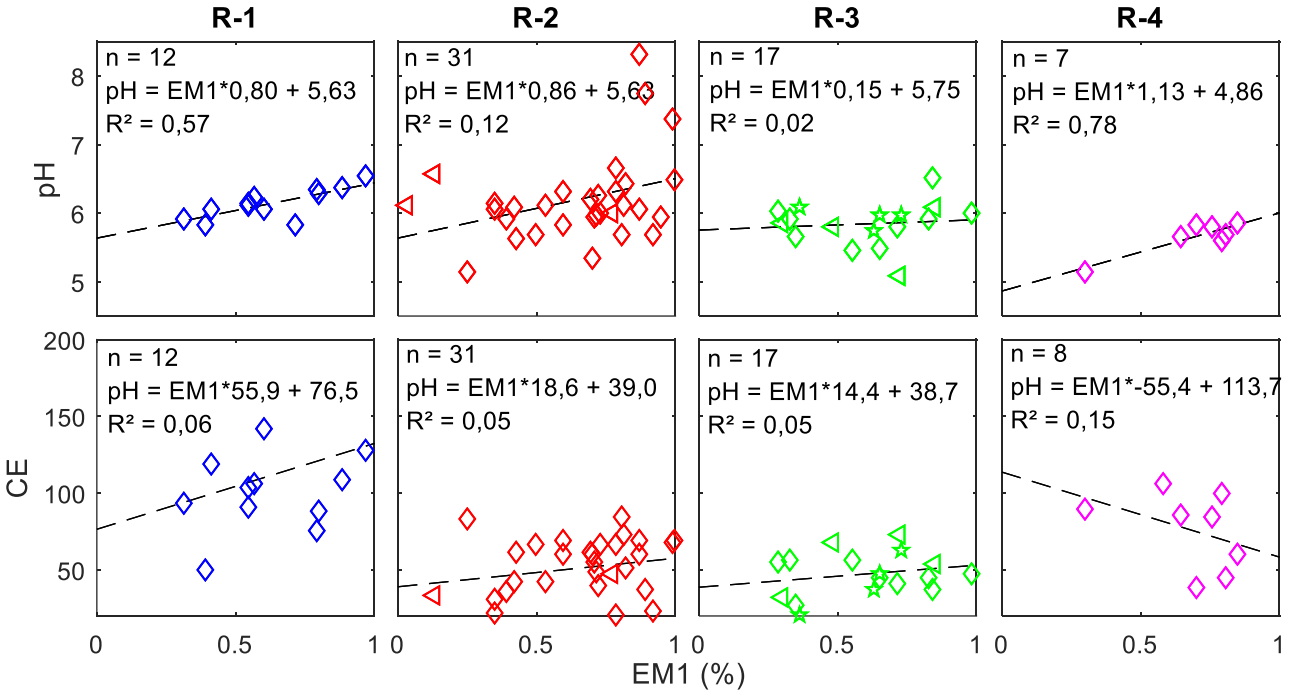


Figura 8 - Relação entre a porcentagem do EM1 e a área de drenagem por dia de campanha. Onde losango representa a amostra coletadas em rios, triângulo representa nascente e estrela representa o banhado.

O pH, que muda conforme a precipitação (valores entre 5,3 a 7,1 com base em dados medidos de janeiro a março de 2018) tem uma relação mais forte com a composição da água do que a condutividade elétrica, que está relacionada diretamente a presença de sólidos dissolvidos no rio.

A R-3, em que os pontos ficam todos localizados nas regiões mais altas foi a que menos se relacionou com o pH. A R-1 (com presença de rochas fraturadas) e R-4 (sem presença de rochas

fraturadas), em que todas as bacias são encaixadas e encostas apresentaram uma maior relação com o pH. Sendo assim, os resultados apontam que a presença de rochas fraturadas não interferiu significativamente na relação entre a composição da água e o pH. Na R-2, onde 25% é coberto por residências e campo para criação de gado, a relação entre a composição da água e o pH teve um R^2 baixo.

CONCLUSÕES

Este estudo foi realizado para elucidar os controles da bacia hidrográfica sobre os parâmetros químicos do escoamento de base. Destacam-se entre esses controles: i) o tempo de permanência da água muda para cada compartimento da bacia (solo, rios e lagoa); ii) o estado de saturação da bacia controla a proporção da água de diferentes fontes no escoamento de base em relação a área de drenagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelas bolsas ao CAPES, ao CNPQ e à FAPESC. Ao CNPQ pelo financiamento da pesquisa através do projeto MCTI/CNPQ/Universal 14/2014. A FLORAM e Projeto Lontras por ceder barco e pessoal para a realização do monitoramento.

REFERÊNCIAS

ASANO, Y.; UCHIDA, T. (2010). Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments? *Hydrological Processes*, v. 24, n. 5, p. 666–671.

BEVEN, K.(2016). Advice to a young hydrologist. *Hydrological Processes*, v. 30 n. 20, p 3578-3582.

EGUSA, T.; OHTE, N.; ODA, T.; SUZUKI, M. (2016). Quantifying aggregation and change in runoff source in accordance with catchment area increase in a forested headwater catchment. *Hydrological Processes*, v. 30, n. 22, p. 4125–4138.

FISCHER, B. M. C.; RINDERER, M.; SCHNEIDER, P.; EWEN, T.; SEIBERT, J. (2015). Contributing sources to baseflow in pre-alpine headwaters using spatial snapshot sampling. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 26, p. 5321–5336.

FONTES, M. L. S.; TONETTA, D.; DALPAZ, L.; ANTÔNIO, R. V.; PETRUCIO, M. M. (2013). Dynamics of planktonic prokaryotes and dissolved carbon in a subtropical coastal lake. *Frontiers in Microbiology*, v. 4, n. APR, p. 1–9.

PERALTA-TAPIA, A.; SPONSELLER, R. A.; ÅGREN, A.; TETZLAFF, D.; SOULSBY, C.; LAUDON, H. (2015). Scale-dependent groundwater contributions influence patterns of winter baseflow stream chemistry in boreal catchments. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 120, n. 5, p. 847–858.

SBROGLIA, R. M.; BELTRAME, Â. D. V. (2012). O zoneamento, conflitos e recategorização do parque municipal da lagoa do Peri, Florianópolis/SC. Boletim de Geografia, v. 30, n. 1, p. 5–18.

SILVA, A. Á. DE S. DA (2000). Parque Municipal da Lagoa do Peri subsídios para o gerenciamento ambiental. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 113 p.

SINGH, N. K.; EMANUEL, R. E.; MCGLYNN, B. L. (2016) Variability in isotopic composition of base flow in two headwater streams of the southern Appalachians. *Water Resources Research*, v. 52, n. 6, p. 4264–4279.