

INVESTIGAÇÃO DO CONCEITO DE ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA EM PEQUENAS BACIAS COSTEIRAS

Camyla Innocente^{1*} & *Debora Yumi de Oliveira*² & *Paula Cunha David*³ & *Alondra Beatriz Perez*⁴ & *Vinicius Bogo Portal Chagas*⁵ & *Pedro Luiz Borges Chaffe*⁶

Resumo – A área elementar representativa (REA) é a menor área que representa o comportamento médio de uma bacia. A REA é útil para discretização espacial na modelagem hidrológica e na escolha de escala de monitoramento. Este trabalho investigou a existência de uma REA para vazão, temperatura, condutividade, função largura e índice topográfico em dez bacias de contribuição (0,015 a 1,135 km²) da Lagoa do Peri, localizada em Florianópolis, Santa Catarina. Para o escoamento de base, a área elementar não foi encontrada, provavelmente, sendo maior que 1,135 km². Para a condutividade elétrica, que está relacionada ao tipo de solo, a REA é maior que 0,12 km². Foi verificada relação entre a temperatura e a área, mas ainda não foi possível determinar uma REA para esta variável. Com relação à geomorfologia das bacias, o índice topográfico médio não apresentou relação direta com a área, mas seu comportamento dentro da bacia sim. O mesmo aconteceu com a função largura.

Palavras-Chave – Área elementar representativa, escoamento de base, monitoramento

INVESTIGATING THE REPRESENTATIVE ELEMENTARY AREA CONCEPT IN SMALL COASTAL WATERSHEDS

Abstract – The representative elementary area (REA) is the smaller area that represents the average behavior of a basin. REA is useful for spatial discretization in hydrological modeling and selection of the monitoring scale. This work investigated the existence of a REA for flow, temperature, conductivity, width function and topographic index of ten subbasins (0.015 to 1.135 km²) of the Peri lagoon, located in Florianópolis, Santa Catarina. For the baseflow, an elemental area was not found, it is probably greater than 1.135 km². For the electrical conductivity, which is related to the soil type, REA is greater than 0.12 km². The relation between temperature and area was verified, but it was not possible to determine the REA for this variable. Regarding basin geomorphology, the average topographic index did not have direct relationship with the area, but its behavior within the basin did, as well as the width function.

Keywords – Representative elementary area, base flow, field measurement

¹ *Mestranda do programa de pós-graduação de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: camylainnocente@gmail.com

² Mestranda do programa de pós-graduação de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: debora.ydo@gmail.com

³ Graduanda do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: paulacunhadavid@gmail.com

⁴ Graduanda do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: alondra_920@hotmail.com

⁵ Mestrando do programa de pós-graduação de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: vbchagas@gmail.com.

⁶ Professor do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: pedro.chaffe@ufsc.br

INTRODUÇÃO

Muitos avanços na hidrologia aconteceram com investigação de questões aparentemente simples como “Onde os rios começam?”, “O que controla a zona crítica em diferentes ecossistemas?” (Grant e Dietrich, 2017) ou “Qual a menor área que representa o comportamento de uma bacia?”. As respostas a esses questionamentos geralmente dependem de observações em campo e monitoramento de longo prazo (McDonnell e Beven, 2014; Tetzlaff *et al.*, 2017). Bacias de primeira ordem podem conter o segredo da resposta da bacia à precipitação, uma vez que correspondem a maior parte da área de uma bacia de qualquer ordem superior (Carlston, 1963).

Existem indícios de que o comportamento das bacias seja regido por alguns padrões como o aumento da densidade de drenagem com a vazão (Godsey e Kirchner, 2014); surgimento de nascente em função da área e declividade (Montgomery e Dietrich, 1988); e aumento exponencial de área acumulada com a ordem de rio (Horton, 1945). Gupta *et al.* (1986) propuseram a existência de uma área elementar representativa (REA) dos processos hidrológicos, tendo como hipótese que a bacia é formada por sub-bacias e que, a partir de uma determinada área, as sub-bacias se comportarão, em média, da mesma maneira. Essa hipótese foi investigada para o comportamento do escoamento de base (Woods *et al.*, 1995), para o índice topográfico (Woods e Sivapalan, 1997; Wolock e Survey, 1995), e para parâmetros de modelos de geração de vazão (Wood *et al.*, 1988). Em todos os trabalhos houve indícios de que essa hipótese é verdadeira. Em um trabalho mais recente os resultados mostraram-se contrários a essa hipótese (Karlsen *et al.*, 2016).

Uma motivação para investigar a REA vem de sua importância prática, pois, se comprovada essa hipótese, seria muito útil para discretização espacial na modelagem hidrológica e escolha de escala de monitoramento. Além disso, a definição da interação entre a escala de variabilidade dos parâmetros hidrológicos com o incremento de área ajudaria no entendimento do comportamento dos processos hidrológicos.

Este trabalho questiona “Existe uma área elementar representativa para o comportamento hidrológico de bacias costeiras?”. Foram realizados monitoramento de vazão, temperatura e condutividade, sob condições de escoamento de base, e cálculo de características morfológicas do terreno, utilizando a função largura (WIDTH) e índice topográfico de dez pequenas bacias de contribuição da lagoa do Peri (0,015 a 1,135 km²). As bacias estão localizadas em Florianópolis, no parque municipal da lagoa do Peri.

O monitoramento de temperatura e condutividade foi motivado devido ao emprego desses como traçadores para separação de eventos (Lange e Haensler, 2012), sendo importante a investigação do comportamento destas variáveis dentro de uma mesma bacia, para futuros estudos nessa área. A função largura e o índice topográfico foram escolhidos para análise da morfologia da bacia devido à importância do que essas funções representam. A função largura tem sido usada como parâmetro de entrada de modelos hidrológicos que se baseiam na geomorfologia da bacia, para auxiliar na estimativa do tempo de percurso das partículas que formam o escoamento superficial (Rigon *et al.*, 2016). Este índice descreve melhor a geometria de drenagem do que as Leis de Horton (Snell e Sivapalan, 1994). O índice topográfico também é muito utilizado para modelagem hidrológica, e consagrou-se como um índice que demonstra a conexão entre a geração de escoamento e a estrutura de drenagem de uma bacia (Woods e Sivapalan, 1997).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Foram monitoradas dez bacias de contribuição da Lagoa do Peri (Figura 1) com áreas variando de 0,015 a 1,135 km². A bacia da lagoa do Peri fica no Parque Municipal da Lagoa do Peri, no município de Florianópolis, com cobertura vegetal de Floresta Atlântica (Figura 1). A precipitação, dada a proximidade entre as bacias, é considerada uniforme. As condições geológicas estão mostradas na Figura 1.

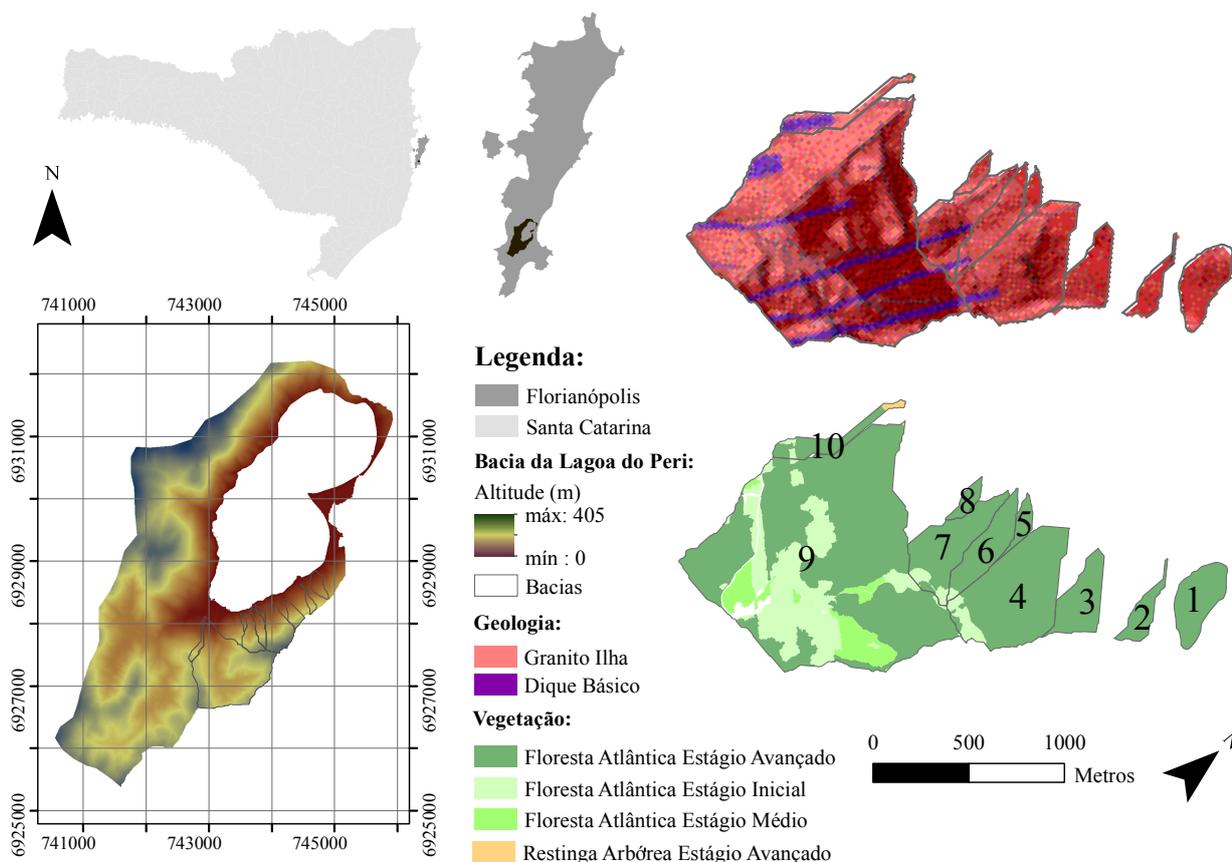


Figura 1 – Figura de localização das bacias estudadas, com descrição da formação geológica e tipo de cobertura vegetal.

Monitoramento de escoamento de base

O monitoramento da vazão de base foi feito no exutório das bacias apresentadas na Figura 1 para investigar se a variação da vazão específica com a área diminuía em relação ao acréscimo de área. Isso porque, em um conjunto de amostras aleatórias, que seguem uma distribuição definida, quanto maior o número de amostras, menor será a variação em relação à média, e mais bem definida será o comportamento. Se as vazões forem tratadas como amostras aleatórias, a variação deve diminuir conforme aumenta a área, tendo como pressuposto que uma bacia é composta por um conjunto de sub-bacias, onde o incremento do número de amostras pode ser pensando com o incremento de área (Woods *et al.*, 1995).

O monitoramento de vazão de base ocorreu nos dias 14/03/2017, 01/04/2017 e 22/04/2017. Em nenhum dos dias houve precipitação durante o trabalho de campo. Os leitos dos rios são formados por rochas, o que impossibilita, na maioria dos pontos, a utilização de métodos

tradicionais de medição de vazão, como molinete e flutuador. Desta maneira, outros dois métodos foram utilizados: o método químico de integração e o método volumétrico.

No método químico de integração (Figura 2b) certa quantidade de solução é vertida de uma vez no rio e mede-se a concentração do soluto à jusante no rio

$$Q = \frac{V \times C_s}{\int_0^T C_r dt} \quad (1)$$

onde Q é a vazão no rio (L^3/T), V é o volume da solução despejada (L^3), C_s é a concentração do soluto (M/L^3), C_r é a concentração do soluto no rio (M/L^3) e T é o tempo de passagem da solução. As medições de concentração da solução no rio foram feitas com um intervalo de tempo constante de cinco segundos. A solução utilizada foi sal e água e a concentração foi medida por meio de um condutivímetro.

O princípio deste método é a conservação de massa, então foi necessário garantir que toda a solução vertida passaria no ponto onde estava sendo medida a concentração do rio, e que esta medida fosse representativa, sendo necessária uma mistura completa da solução com o rio. Para verificação destes requisitos verteu-se, anteriormente à medição de vazão, uma solução de água e corante.

Medições utilizando o molinete foram feitas a fim de validar as medições com o método químico. A medição por molinete (Figura 2c) foi realizada em duas ocasiões, em dois pontos distintos, onde havia a jusante dos pontos de monitoramento uma sessão possível de aplicar o método. Os erros do método químico, em relação às medições com o molinete, variaram de 3,8 a 14,8%. O método volumétrico foi utilizado onde não foi possível realizar o método químico (Figura 2a).



Figura 2 – Fotos das medições de vazão utilizando os métodos : a) volumétrico; b) químico; e c) molinete

Monitoramento de temperatura e condutividade

As medições de temperatura e condutividade elétrica foram realizadas no dia 04/05/2017 na bacia 1 (Figura 1). Essa bacia tem 540 metros de comprimento de rede de drenagem. A vazão era pequena e a medição foi feita onde se formavam pequenos acúmulos de água.

A condutividade elétrica corresponde à capacidade da água de conduzir eletricidade, uma maior condutividade indica que há mais íons (Ribero *et al.*, 2005). Há uma maior quantidade de íons em solos argilosos do que em arenosos. Duas hipóteses foram verificadas quanto à condutividade. A primeira hipótese é que a condutividade elétrica é praticamente constante em toda a bacia, representando um tipo de solo predominante. A segunda hipótese é que maiores valores de condutividade são encontrados perto da exutória, onde, possivelmente, há uma maior presença de argila.

Cálculo de características morfológicas

O modelo digital de elevação (MDE) disponibilizado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina, com resolução espacial de 1x1m, foi utilizado para o cálculo das características morfológicas das bacias. Dois índices que descrevem a morfologia da bacia foram calculados: a função largura e o índice topográfico. Esses índices não foram calculados para a bacia 1 pois o MDE possuía muitos defeitos nessa bacia.

A função largura (Kirkby, 1976) é calculada a partir da distância de cada célula do MDE até a célula da exutória, utilizando o caminho preferencial da água. O índice topográfico é uma medida relativa da profundidade do lençol freático em toda a bacia. Este índice é usado em modelos hidrológicos para representar a conexão entre o canal e a encosta (Beven e Kirkby, 1979), sendo calculado a partir da Equação 2:

$$índice = \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) \quad (2)$$

onde a é a área acumulada e β é a declividade da célula.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vazão

Em trabalhos anteriores, a REA estimada utilizando dados de escoamento de base variou entre 0,5 a 2 km² (Egusa *et al.*, 2016; Woods *et al.*, 1995). A maior bacia monitorada foi de 1,13 km² e provavelmente não foi alcançada a REA, mas não se pode afirmar, pois há um intervalo de tamanho de sub-bacias sem monitoramento entre 0,25 a 1,13 km². Por essa região ter muitos diques e fraturas geológicas (Figura 1), espera-se que a REA seja elevada.

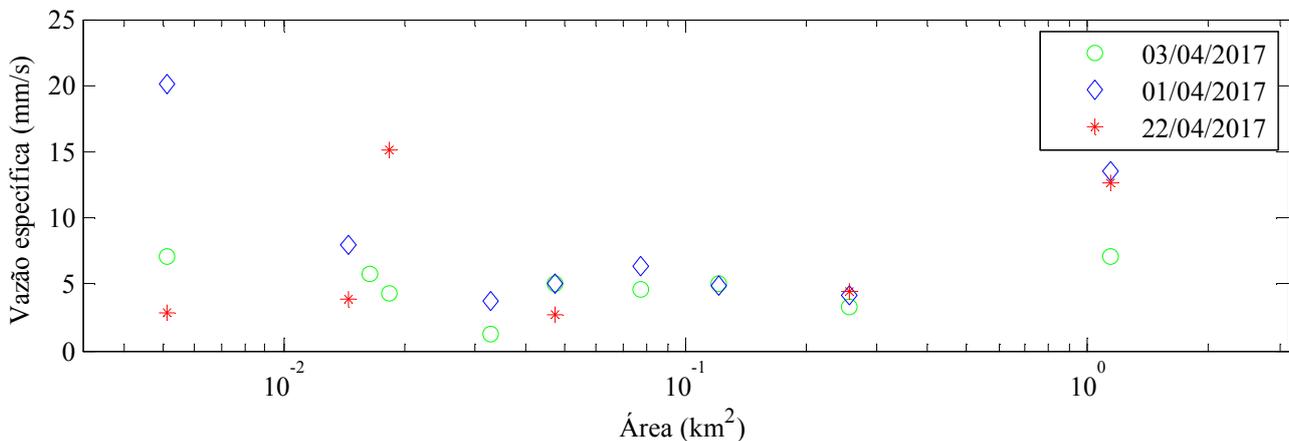


Figura 3 – Variação da vazão específica pela área das bacias analisadas. Em algumas bacias não há medições nos três dias, pois não houve monitoramento.

Temperatura e condutividade

Em relação à condutividade, houve uma grande variação dos valores medidos (192 a 291 $\mu\text{s/cm}$), descartando a primeira hipótese proposta, de que a condutividade elétrica é praticamente constante em toda a bacia. A segunda hipótese, que a condutividade aumenta em direção à exutória, foi verificada, pois os maiores valores se concentram perto da exutória (Figura 4a). Porém, não foi encontrada uma relação linear entre a condutividade e a área da bacia.

A temperatura aumentou conforme a área da bacia. Isso pode ser consequência de um aumento no tempo de exposição da água conforme esta se desloca para a exutória. Há um indício da

existência de uma área elementar, mas não com exatidão, já que para uma mesma área valores discrepantes de temperatura foram medidos (Figura 4b). Foi descartada a hipótese de que as medições de temperatura variaram em virtude da mudança de temperatura ao longo do dia. Essa hipótese foi descartada, pois houve alteração de um 1°C entre a exutória da bacia e a nascente do rio a esquerda da Figura 4a, mesmo com diferença de apenas 26 minutos entre as duas medições.

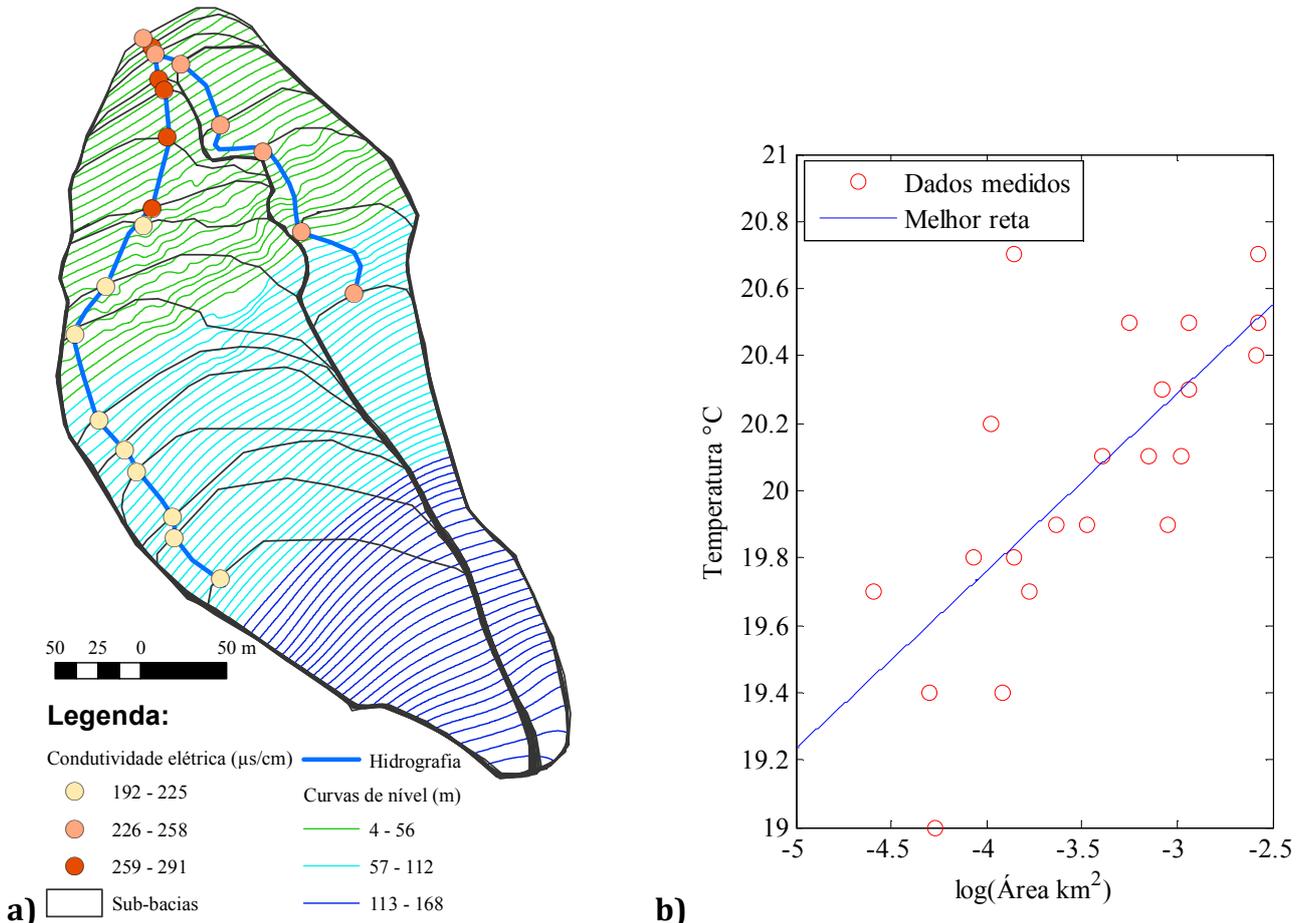


Figura 4 – a) Pontos de medição de temperatura e condutividade na bacia 1. O valor de medição de condutividade elétrica das sub-bacias foi dividido em três classes. b) Temperatura em função do logaritmo da área. O R^2 da regressão foi de 0,502.

Características morfológicas

O índice topográfico médio da bacia não apresentou relação direta com a área. Por outro lado, o comportamento do índice topográfico dentro das bacias parece seguir um comportamento padrão em relação à área (Figura 5). Isso mostra que: i) bacias menores tem uma relação menos definida entre a encosta e a drenagem; ii) tendo em vista que o índice topográfico está relacionado à altura do lençol freático, em bacias menores a diferença do nível do lençol é menor entre todos os pontos da bacia, indicando mais pontos passíveis de alagamento. Os pontos de alagamento podem ser vistos como nascente, e é uma hipótese plausível que, em bacias menores, exista uma maior densidade de nascente em relação à área total da bacia.

A função largura, que mostra a distância de cada célula à exutória, apresentou relação direta com a área (Figura 5). O caminho médio que cada gota terá que percorrer até a exutória aumenta linearmente com a área. O comportamento desse índice dentro da bacia fica mais constante conforme a área aumenta. Bacias muito pequenas têm um comportamento bem diversificado (na Figura 5, maior concavidade para cima indica que a maior área da bacia está perto das nascentes,

concavidade para baixo indica que está mais próximo a exutória), e o comportamento de bacias maiores é mais padrão.

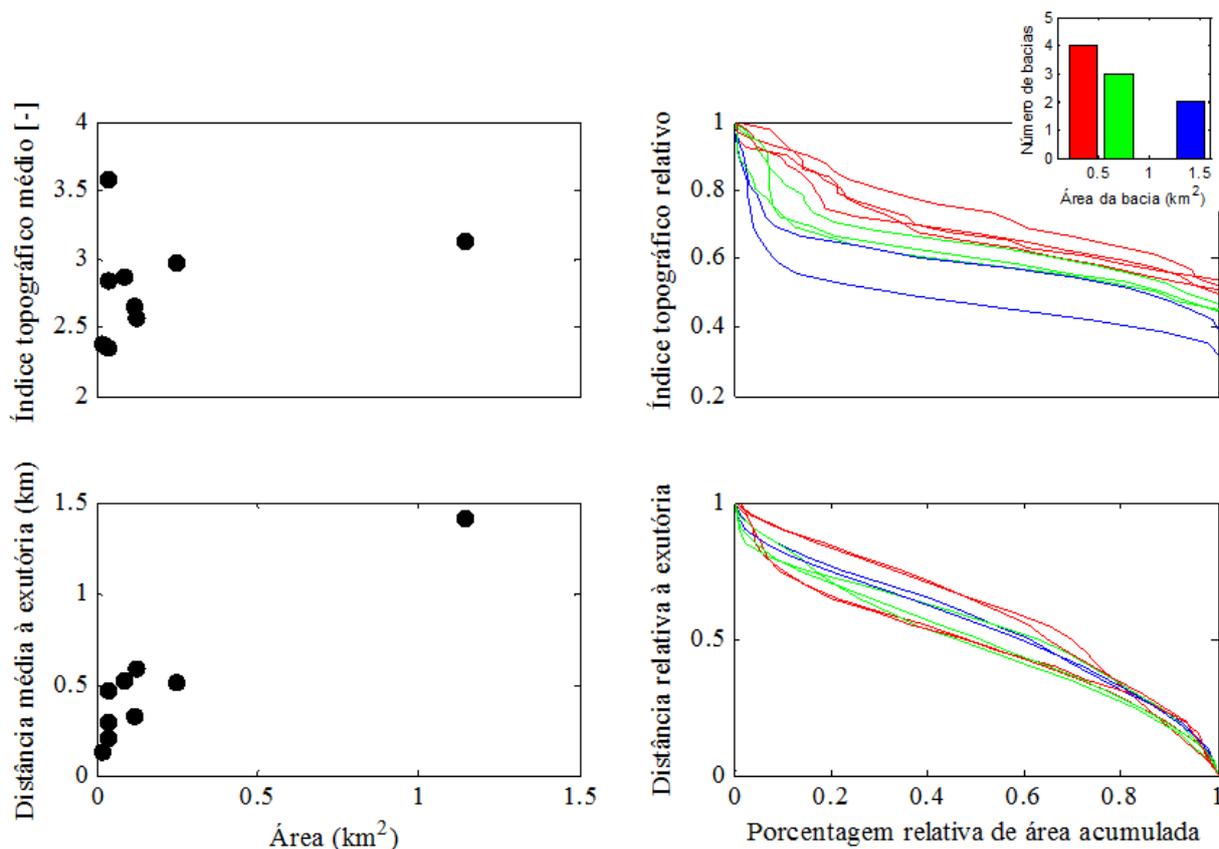


Figura 5 – Relação do índice topográfico e da função largura com a área. As bacias foram divididas entre pequenas (vermelho), médias (verde) e grandes (azul). As classes estão indicadas no histograma no canto superior direito.

CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a existência de uma área elementar representativa para o comportamento hidrológico de algumas pequenas bacias costeiras. Para o escoamento de base a área elementar é, provavelmente, maior que 1,13 km². Para condutividade elétrica, que está relacionada ao tipo de solo, não houve correlação com a área. Este resultado indica que os processos hidrológicos que têm dependência direta com o solo, como infiltração e escoamento superficial, têm área elementar maior que a analisada (maior que 0,12 km²). Em relação à temperatura, que indica indiretamente o tempo em que a água está exposta, ainda há muito ruído na relação com a área, e a existência de área elementar não foi verificada.

Com relação à geomorfologia das bacias, o índice topográfico médio não apresentou relação direta com a área, mas seu comportamento dentro da bacia sim. O mesmo aconteceu com a função largura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pela concessão de bolsa de iniciação científica e mestrado.

REFERÊNCIAS

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant.

Hydrological Sciences Bulletin 24(1), pp. 43–69.

CARLSTON, C. W. (1963). Drainage density and streamflow. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. No. 42*, p. 2–C, 8pp.

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.

GODSEY, S. E.; KIRCHNER, J. W. (2014). Dynamic, discontinuous stream networks: Hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. *Hydrological Processes* 28(23), pp. 5791–5803.

GRANT, G. E.; DIETRICH, W. E. (2017). The frontier beneath our feet. *Water Resources Research*, pp. 1–5

GUPTA, V. K.; WAYMIRE, E. RODRÍGUEZ-ITURBE, I. (1986). On scales, gravity and network structure in basin runoff. In: *Scale problems in hydrology*. Springer Netherlands, p. 159-184.

HORTON, R. E. (1945). Erosional Development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* 56(3), pp. 275.

KARLSEN, R. H.; SEIBERT, J.; GRABS, T.; LAUDON, H.; BLOMKVIST, P.; BISHOP, K. (2016). The assumption of uniform specific discharge: unsafe at any time? *Hydrological Processes* 30(21), pp. 3978–3988.

KIRKBY, M. (1976). Tests of the random network model, and its application to basin hydrology. *Earth Surface Processes* 1, pp. 197–212.

LANGE, J.; HAENSLER, A. (2012). Runoff generation following a prolonged dry period. *Journal of Hydrology* 464–465, pp. 157–164.

MCDONNELL, J. J.; BEVEN, K. (2014). *Water Resources Research*, pp. 5342–5350.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. (1988). Where do channels begin? *Nature* 336(6196), pp. 232–234.

RIBEIRO, G. M., MAIA, C. E., MEDEIROS, J. F. (2005). Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9(1), pp. 15–22.

RIGON, R.; BANCHERI, M.; FORMETTA, G.; DELAVENNE, A. (2016) The geomorphological unit hydrograph from a historical-critical perspective. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 41, n. 1, p. 27–37.

SNELL, J. D.; SIVAPALAN, M. (1994). On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph. *Water Resources Research* 30(7), pp. 2311–2323.

TETZLAFF, D.; CAREY, S. K.; MCNAMARA, J. P.; LAUDON, H.; SOULSBY, C. (2017). The essential value of long-term experimental data for hydrology and water management. *Water Resources Research*, pp. 1–7.

WOLOCK, M.; SURVEY, U. S. G. (1995). Effects of subbasin size on topographic characteristics and. 31(8), pp. 1989–1997. *Water Resources Research* 31(8), pp. 1989-1997.

WOOD, E. F.; SIVAPALAN, M.; BEVEN, K.; BAND, L. (1988). Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology* 102(1–4), pp. 29–47.

WOODS, R. A.; SIVAPALAN, M. (1997). A connection between topographically driven runoff generation and channel network structure. *Water Resources Research* 33(12), pp. 2939.

WOODS, R.; SIVAPALAN, M.; DUNCAN, M. (1995). Investigating the Representative Elementary Area Concept: a N Approach Based O N Field Data. *Water* 9, pp. 291–312.