Análise dos limiares para a conectividade hidrológica através do escoamento superficial.

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

Resumo - A capacidade de conexão entre as regiões da bacia pelo fluxo de água depende de limiares a serem superados, os quais se relacionam com o mecanismo que gerou o escoamento superficial e as características da paisagem. Este trabalho investigou os limiares que desencadeiam a ocorrência de escoamento superficial em uma bacia de encosta na bacia hidrográfica da Lagoa do Peri, Brasil. Independente da região da bacia, sempre há um limiar de umidade mínimo a ser superado para iniciar-se o escoamento. Foram encontrados três padrões de resposta ao escoamento superficial, organizados em três categorias. Na primeira, Resposta à Umidade, a umidade antecedente de sete dias (H_7) determinou o limiar para a geração de escoamento. A classificação de Resposta Múltipla apresenta três faixas de limiares determinadas pela umidade na bacia e dependentes da intensidade do evento. Já para o terceiro padrão, Resposta Temporal, o limiar é estabelecido pela atuação conjunta de umidade antecedente mínima e duração do evento. Esta classificação permitiu uma visão conceitual sobre o caminho que água percorre até alcançar as linhas de fluxo e os mecanismos relacionados.

Palavras-Chave – Escoamento superficial, Limiares, Conexão.

Analysis of thresholds for hydrological connectivity through runoff

Abstract - The connection capacity between the basin regions through the water flow depends on thresholds to be overcome, which are related to the mechanism that generated the runoff and the characteristics of the landscape. This work investigated the thresholds that trigger the occurrence of surface runoff in a slope basin in the Peri Lagoon basin, Brazil. Regardless of the region of the basin, there is always a threshold of minimum humidity to be exceeded to start the flow. Three patterns of response to surface runoff were found, organized into three categories. In the first one, Response to Humidity, the antecedent humidity of seven days (H7) determined the threshold for generation of flow. The Multiple Response classification presents three threshold ranges determined by the humidity in the basin and dependent on the intensity of the event. Already for the third standard, Temporal Response, the threshold is established by the joint action of minimum antecedent humidity and duration of the event. This classification allowed a conceptual view on the path that water travels until reaching the flow lines and related mechanisms.

Keywords - Surface runoff, Thresholds, Connection.

[1] Graduanda do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: alondra_920@hotmail.com
[2]Mestranda do programa de pós-graduação de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: camylainnocente@gmail.com
[3] Mestranda do programa de pós-graduação de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: jhmsa88@gmail.com
[4] Professor do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: pedro.chaffe@ufsc.br

Introdução

A conectividade hidrológica é definida como a ligação entre as regiões da bacia hidrográfica por meio do fluxo de água (Blume e Van Meerveld, 2015). Variável no tempo, o fluxo pode conectar partes da bacia durante eventos de chuva e desconecta-las entre eles, marcando a ligação física entre o sistema terrestre e aquático (Edwards e Wetzel, 2005). O processo de maior importância dentro da conexão depende da escala adotada podendo a conexão ser descrita por aspectos estáticos da paisagem, como as características físicas da bacia (conectividade estrutural), ou pelas variações de curto prazo da frequência e intensidade dos eventos de precipitação (conectividade funcional) (Toledo, 2013).

Os limiares a serem superados para desencadear a conexão é um conceito crítico para a compreensão da resposta hidrológica da bacia na escala de tempo do evento (Saffarpour *et. al*. 2016). A precipitação total, a intensidade máxima de chuvas e as variações sazonais de umidade antecedente (Zimmermann *et al.* 2014) controlam o limiar da conectividade. Mas a chuva não é único fator relevante, sendo as características da superfície do solo e a microtopografia controles importantes na geração do fluxo terrestre (Godsey *et al*, 2004), tornando as redes de fluxo dinâmicas para uma ampla gama de configurações topográficas, geológicas e climáticas (Godsey *et al.* 2014).

O percurso da precipitação a partir do momento que alcança a superfície até os canais de drenagem é uma pergunta que não pode ser respondida facilmente. De maneira geral, os mecanismos de geração escoamento superficial podem ser classificados em: (a) excesso de infiltração, quando a precipitação supera a taxa de infiltração (Mcdonnell *et al.* 2013), também chamado de escoamento hortoniano (Horton, 1933) e (b) áreas de saturação, que ocorrem quando a capacidade de armazenamento do solo é excedida e nenhuma infiltração adicional é possível (Bachmair e Weiler, 2011), também chamado de fluxo de retorno (Zimmermann *et al.* 2014). Ainda existe a categoria “fluxo da camada orgânica" (Weiler *et. al*. 2004), quando ocorre na camada de raízes próximas à superfície.

Esta divisão entre os mecanismos é uma forma esquemática para tentar compreender os processos hidrológicos, mas que podem vir a estar relacionados entre si em uma abordagem integradora que visualiza todos os mecanismos como um único processo, mas descrito sobre diferentes perspectivas e escalas (Mcdonnell *et al.* 2013). Esta abordagem permite a extrapolação do sistema hídrico a outras disciplinas, incidindo diretamente em alguns problemas de interesse social, como sustentar o fluxo durante as secas e restaurar os ecossistemas produtivos terrestres e aquáticos (Grant *et al.* 2017). Assim, o conhecimento dos limiares que controlam a conectividade do fluxo terrestre é essencial para a compreensão e previsão das respostas de escoamento superficial e qualidade dos corpos hídricos (Blume e Van Meerveld, 2015).

Este artigo apresenta os limiares da conectividade hidrológica por meio do escoamento superficial em uma bacia coberta por floresta de mata atlântica, em área de encosta na Lagoa do Peri, Florianópolis. Os locais onde ocorreu escoamento foram analisados em função de variáveis hidrológicas de precipitação e umidade antecedente, associadas ao início do escoamento.

Materiais e Métodos

A área de estudo localiza-se em uma encosta nordeste da bacia hidrográfica da Lagoa do Peri, em Florianópolis, Brasil (Figura 1). Coberta por Mata Atlântica e área de 2,8ha, o local de estudo apresenta declividade média de 23%, precipitação media anual de 1800 mm e solo caracterizado como cambissolo moderadamente drenado com áreas rochosas e forte ondulação (EMBRAPA), cujos canais de drenagem são intermitentes e deságuam em uma área permanentemente úmida.

Devido à alta densidade da vegetação e pouca profundidade das vertentes, a resolução de 1 metro do modelo digital de terreno (MDT) disponível não era refinada o suficiente para gerar acúmulo nos canais. Assim, foi feito um levantamento topográfico com Estação Total Leika TPS400, totalizando 380 pontos (Figura 1). A hidrografia pode então ser gerada a partir das curvas de nível obtidas no levantamento topográfico. Os limites da bacia, onde não houve levantamento topográfico, foram definidos com base no MDT disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SDS).

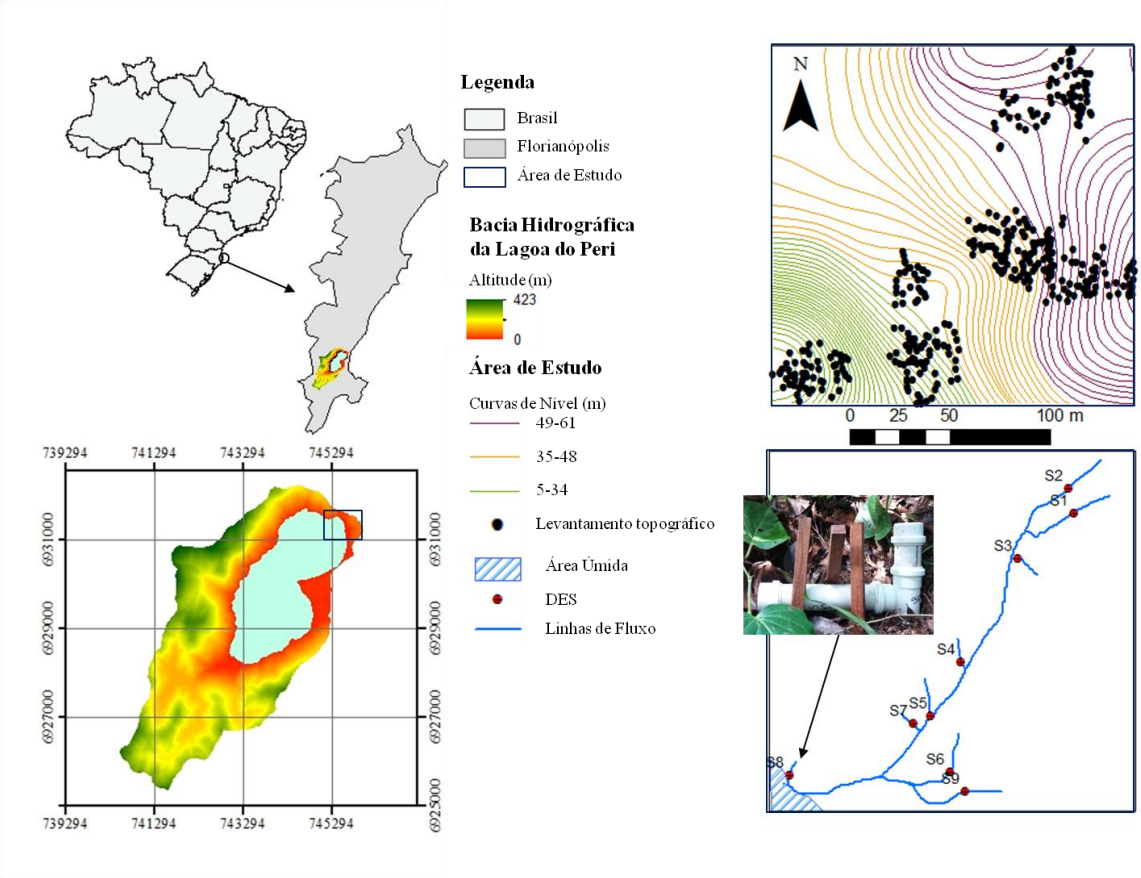

Figura 1- Localização da área de estudo. Levantamento topográfico e curvas de nível geradas. Hidrografia gerada das novas curvas de nível e localização dos detectores de escoamento superficial (foto do DES S8).

No monitoramento da ocorrência de escoamento superficial foram utilizados nove detectores de escoamento superficial (DES), aqui também chamados de sensores, desenvolvido por Beven *et al.* (1979) e descrito em Vertessy *et al.* (2001). O DES permite identificar apenas a ocorrência ou não do fenômeno no intervalo de tempo entre duas leituras consecutivas. Quando há água no sensor dizemos que o sensor foi "ativado" evidenciando a ocorrência de escoamento no local. O monitoramento deu-se em linhas de fluxo que alimentam a vertente principal (Figura 1), identificadas em campo.

Investigando quais características melhor explicaram a iniciação do fluxo superficial, a porcentagem de sensores ativos foi analisada contra dez variáveis hidrológicas, associadas ao início do escoamento, como demonstrado por Figueiredo *et al.* (2016): precipitação total do dia e do evento de máxima intensidade, umidade do solo antecedente, duração e intensidade de chuva (máxima dentro de 5, 10,15, 30, 60 e 120 minutos). Também se compararam as dez variáveis com a ativação de cada sensor, de forma individual.

Por questões de logística, não foi possível inspecionar os DES a cada evento. Logo, foi necessário adotar alguns critérios a fim de prever qual evento gerou o escoamento que o DES detectou: A chuva que provocou o escoamento foi a de maior intensidade entre duas observações, e as demais variáveis foram calculadas sobre esse evento de maior intensidade. No total, doze observações foram analisadas.

Resultados e Discussão

O volume de precipitação acumulado, considerada como umidade antecedente, com melhor resposta aos sensores ativos foi o de sete dias (H_7), com uma correlação linear de R^2=0,73. No entanto H_7 não foi suficiente para explicar todos os eventos, levando à hipótese de que deve haver uma combinação conjunta entre a umidade antecedente, o percentual de sensores ativos e as demais variáveis. Assim, realizou-se uma correlação múltipla, onde as variáveis eram analisadas em grupos de a três, gerando um plano de melhor ajuste. A escolha da variável mais representativa baseou-se na análise dos resíduos, onde a variável com melhor ajuste ao plano teria melhor representatividade na resposta hidrológica da bacia. Entre as variáveis propostas, I_{10} (intensidade máxima para 10 minutos) foi a que apresentou melhor ajuste à umidade antecedente e o percentual de sensores ativos.

Representando todos os sensores instalados na bacia (Figura 2), houve um limiar claro em relação à umidade antecedente de sete dias (H_7). Para I_{10} de 42 mm/h e H_7=4 mm não ocorreu escoamento. No entanto, para I_{10}= 15,6 mm/h e H_7=8,2 mm inicia-se a conexão. Apesar da I_{10} ser menos da metade na segunda situação, a umidade de 8,2 mm comandou o início do escoamento.

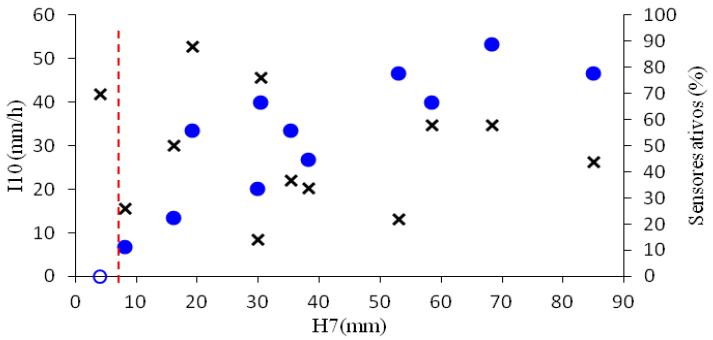

Figura 2- Sensores ativos em função da umidade antecedente de sete dias, H7 (● representa os dias com escoamento e ○ significa que não houve água nos sensores) e intensidade de 10 minutos em função da umidade antecedente (□, I10). A linha tracejada indica o inicio da conexão.

Entre H_7=8,2 mm e H_7=38,2 mm o numero de sensores ativos apresenta dependência de I_{10}. A normalidade de H_7, I_{10} e sensores ativos foi testada pelo método estatístico Shapiro-Wilk, para um nível de significância de 5%. Como os dados apresentaram normalidade, o coeficiente de Pearson foi aplicado para o intervalo 8,2 < H_7 < 38,2mm, resultando em uma correlação moderada (0,61) entre I_{10} e os sensores ativos. A partir de H_7=38,2mm, diminui a influencia de I_{10}, havendo um grande número de sensores ativos mesmo com I_{10} baixa. As variáveis que melhor explicaram o escoamento neste intervalo foram a alta umidade e a duração do evento de intensidade máxima. Após o teste de normalidade, o coeficiente de Pearson evidenciou uma correlação forte (0,82) entre o tempo do evento e o número de sensores ativos.

No intuito de reconhecer um padrão de respostas similares que desse indícios do mecanismo de geração de escoamento dominante na bacia, o limiar de resposta de cada sensor foi analisado individualmente. Áreas de similaridade hidrológica representam mecanismos similares na produção de escoamento. Estas áreas refletem características da paisagem, como topografia, geologia, solos,

clima e vegetação, que influenciam a movimentação da água desde sua primeira entrada até sua liberação final (Barthold e Woods, 2015). A caracterização dos DES resumiu-se em três categorias: (1) resposta à umidade, (2) resposta múltipla e (3) reposta temporal. Na Figura 3 são apresentados os limiares de início de escoamento para os sensores S1 a S8.

Os DES que se enquadram na categoria Resposta à Umidade foram S1, S4 e S5. Nestes, o limiar para o início do escoamento depende da umidade antecedente acumulada de sete dias. S1 respondeu a todos os eventos quando a umidade alcançou 8,2mm. Já S4 e S5 apresentaram resposta para limiares mais elevados (H_7=19,2mm para S4 e H_7=30 mm para S5) (Figura 3). Em bacias florestas, onde a condutividade hidráulica saturada do solo diminui acentuadamente com a profundidade, percursos de escoamento próximos da superfície, por exemplo as áreas de saturação, provavelmente dominarão (Godsey *et al.*2004). A geração de escoamento por excesso de saturação exige que o déficit de umidade na capacidade de armazenamento do solo seja superado (Saffarpour *et. al*. 2016), caso contrário, a água se moverá por percolação profunda, sem conectar-se com as vertentes pelo fluxo superficial. Isto explica porque não houve resposta dos sensores a eventos de alta intensidade abaixo de um limiar mínimo de umidade. No dia 10/03/2017, S4 não havia água no sensor mesmo estando o evento antecedente dentro dos limiares para o escoamento. Acredita-se ser este um erro de leitura, onde o fluxo desviou o sensor ou simplesmente seguiu alguma linha de fluxo secundária.

Na categoria de Resposta Múltipla, S2, S6 e S8 apresentaram três faixas de limiares distintasTabela 1. No limiar intermediário de H_7 (Tabela 1), há a necessidade de uma intensidade de chuva mínima para ocorrer escoamento, sendo que esta faixa de valores foi distinta para cada sensor. Para umidades inferiores ao limiar intermediário não ocorreu escoamento, independente da intensidade da chuva. Já para umidade superior sempre iniciou o fluxo, mesmo em intensidades baixas.

Tabela 1- Limiares intermediários, no qual I_{10} é a intensidade mínima necessária no intervalo de H_7 para ocorrer escoamento.

DES	H_7 (mm)	I_{10} (mm/h)
S2	19,2-35,4	22,0
S6	8,2-35,4	45,6
S8	16,2-38,2	30,0

Em áreas que drenam para os sensores de Resposta Múltipla, acredita-se haver combinação de mecanismos atuando na geração de escoamento. Saffarpour *et. al*. (2016), encontrou uma resposta hidrológica fortemente controlada pela umidade do solo e as características da precipitação. No entanto, durante eventos de alta intensidade, viu que o fluxo aumentava muito, mesmo não tendo ultrapassado o limiar de umidade do solo, o que leva a crer que ocorreu fluxo por excesso de infiltração por via terrestre e /ou fluxo lateral rápido por caminhos preferenciais na encosta. Para os sensores S2, S6 e S8, os mecanismos rápidos ocorrem no limiar intermediário. Passando para o limiar superior, a resposta é similar aos sensores de Resposta à Umidade, dominando o escoamento por saturação.

Os DES S3 e S7 se enquadram na categoria de Resposta Temporal. Ambos os sensores apresentaram o mesmo comportamento: Só ocorreu fluxo quando houve uma interação adequada entre a umidade antecedente e a duração do evento de intensidade máxima, sendo necessário, pelo menos, H_7 de 53 mm e duração do evento de 3 horas para ativar estas regiões. Para uma I_{10} de 26,4 mm/h e H_7 de 85,0 mm (máxima umidade registrada), onde a chuva ocorreu por apenas 2 horas e 30

minutos, não ocorreu escoamento. Um evento que durou 3 horas e 24 minutos, mas H_7=19,2, também não gerou escoamento, mesmo com I_{10}=52,8 mm/h (maior intensidade registrada no período de monitoramento). Isto ocorre por que há uma capacidade finita de fluxo e o limiar de umidade deve ser excedido por um tempo suficiente para que a ação do processo gere um impacto significativo, conectando a encosta à vertente (Saffarpour *et. al*. 2016). É possível que pouca chuva gere escoamento e este se empoce ou reinfiltre sem alcançar as linhas de fluxo, mas se uma chuva ocorrer por tempo suficiente sobre uma área já úmida, a água empoçada fluirá para os canais, e a encosta ficará conectada à vertente pelos caminhos preferenciais da superfície.

O sensor S9 foi o último a ser instalado, perdendo-se o registro dos três primeiro eventos. Os dados disponíveis não apresentaram relação aparente com nenhuma das variáveis analisadas, não sendo possível determinar um limiar para a conexão. Neste caso, o número insuficiente de observações ou variáveis hidrológicas não consideradas ocultam um padrão de resposta, no caso deste existir.

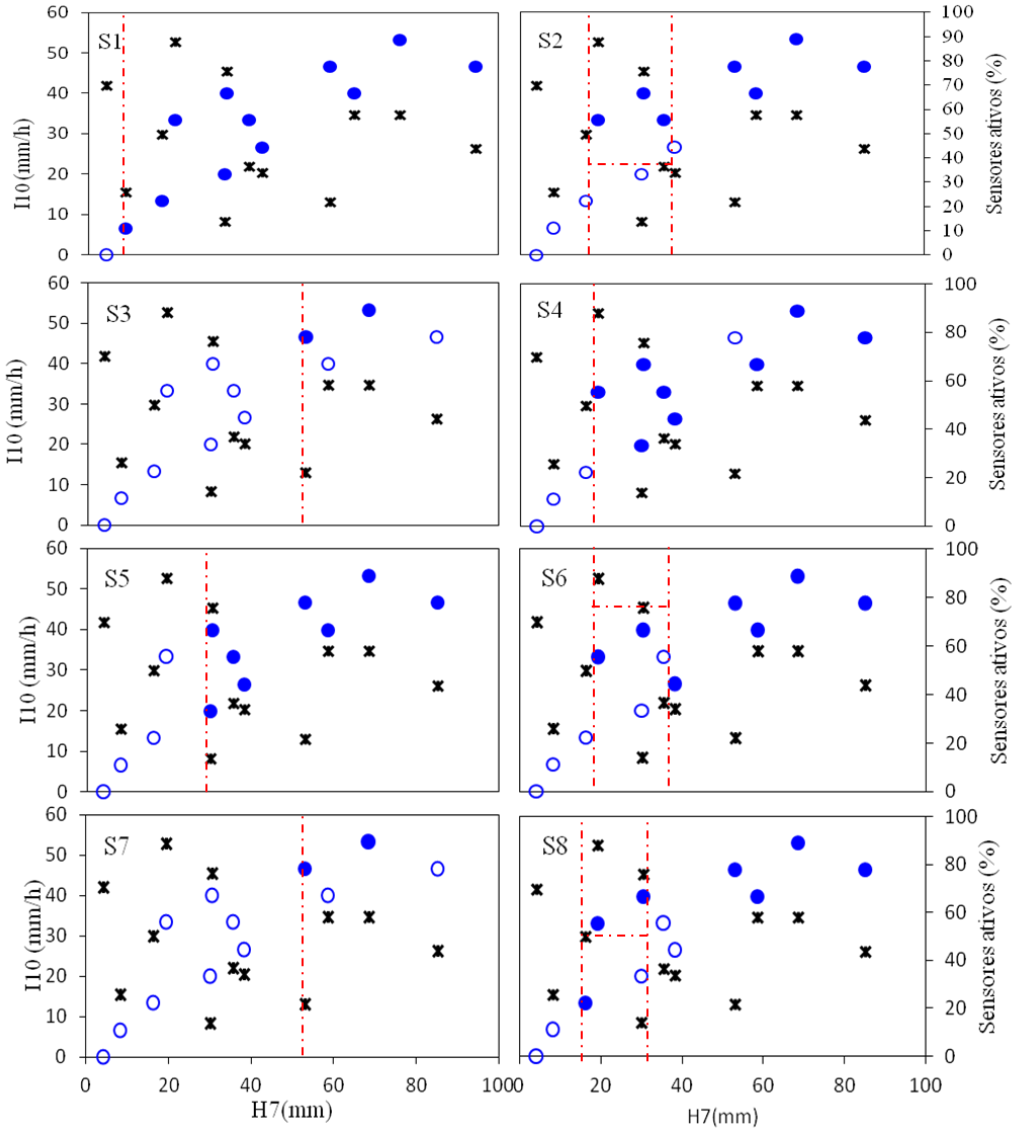

Figura 3-Sensores ativos em função da umidade antecedente de sete dias, H7 (● representa os dias com escoamento e ○ significa que não houve água nos sensores) e intensidade de 10 minutos em função da umidade antecedente (□, I10). Cada gráfico representa um sensor cujo nome está assinalado na figura. As linhas tracejadas indicam os limiares para o escoamento.

A diferença nos limiares para sensores dentro de uma mesma categoria pode vir a ser explicada pela anisotropia das propriedades do solo (Elsenbeer *et al.*2001) e característica da vegetação (Figueiredo *et al.* 2016). Esta combinação de atributos da paisagem traz como consequência que algumas regiões sejam mais propícias do que outras à geração de fluxo terrestre (Godsey *et al.*2004). Zimmermann *et al.* (2014) verificou que a conectividade é iniciada perto das vertentes, expandindo a rede de drenagem, permitindo a conectividade hidrológica de colinas inteiras sob condições extremas.

Assim, é possível fazer uma caracterização das distintas regiões da bacia em função dos limiares que regem a conexão entre a encosta e a vertente. A pesar de conceitual, a resposta dos sensores à umidade antecedente e intensidade máxima de 10 minutos permitiu fazer uma previsão dos mecanismos de geração de escoamento dominantes.

Conclusões e Recomendações

Independente da região da bacia, sempre há um limiar de umidade mínimo a ser superado para iniciar-se o escoamento. Nesta bacia de encosta, este limiar é determinado pela umidade antecedente de sete dias acumulados.

O escoamento por saturação parecer ser dominante na bacia quando a umidade antecedente supera 38,2mm, mecanismos secundários atuam de forma a alterar espacialmente os limiares na área de estudo, sendo possível caracterizar distintas regiões pelo seu padrão de resposta.

Na área de estudo, foram encontradas três padrões de resposta ao escoamento superficial. Na primeira, Resposta à Umidade, a umidade antecedente determinou o limiar para a geração de escoamento. A classificação de Resposta Múltipla apresenta três faixas de limiares determinadas pela umidade na bacia e dependentes da intensidade do evento. Já para o terceiro padrão, Resposta Temporal, o limiar é estabelecido pela atuação conjunta de umidade antecedente mínima e duração do evento. Esta classificação permitiu uma visão conceitual sobre o caminho que água percorre até alcançar as linhas de fluxo.

Como passo seguinte para este trabalho é necessária a investigação das propriedades do solo que melhor expliquem os mecanismos que geram o escoamento superficial, a fim de termos uma visão multidisciplinar dos atributos da paisagem que regem o movimento da água através da bacia.

Referências

BACHMAIR, Sophie; WEILER, Markus. (2011). New Dimensions of Hillslope Hydrology. In: DELFIS F. LEVIA. Forest Hydrology and Biogeochemistry. New York: Springer. Cap. 23. p. 455-482.

BARTHOLD, Frauke K.; WOODS, Ross A. (2015). Stormflow generation: A meta-analysis of field evidence from small, forested catchments. Water Resources Research, [s.l.], v. 51, n. 5, p.3730-3753.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, [s.l.], v. 24, n. 1, p.43-69.

BLUME, Theresa; VAN MEERVELD, H.j. Ilja. (2015). From hillslope to stream: methods to investigate subsurface connectivity. Wires Water, [s.l.], v. 2, n. 3, p.177-198.

EDWARDS, Anthony C; WETZEL, Robert G. (2005). Nutrient Cycling. In: ANDERSON, Malcolm G; MCDONNELL, Jeffrey J. Encyclopedia of Hydrological Sciences. England: John Wiley & Sons Ltd. Cap. 96. p. 1459-1478

ELSENBEER, Helmut. (2001) Hydrologic flowpaths in tropical rainforest soilscapes - a review. Hydrological Processes**,** [s.l.], v. 15, n. 10, p.1751-1759.

FIGUEIREDO, José Vidal de et al. (2016). Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. Hydrological Processes, [s.l.], v. 30, n. 13, p.2390-2400.

GODSEY, S et al. (2004). Overland flow generation in two lithologically distinct rainforest catchments. Journal Of Hydrology, [s.l.], v. 295, n. 1-4, p.276-290.

GODSEY, S. e. et al. (2014). Dynamic, discontinuous stream networks: hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order. Hydrological Processes**,** [s.l.], v. 28, n. 23, p.5791-5803.

GRANT, Gordon E. et al. (2017) The frontier beneath our feet. Water Resources Research, [s.l.], p.1-5.

MCDONNELL, Jeffrey J. et al. (2013) Are all runoff processes the same? Hydrological Processes**,** [s.l.], v. 27, n. 26, p.4103-4111.

SAFFARPOUR, Shabnam et al. (2016) Multiple runoff processes and multiple thresholds control agricultural runoff generation. Hydrology And Earth System Sciences, [s.l.], v. 20, n. 11, p.4525-4545.

TOLEDO, Cristian Epifânio de. (2013). Conectividade hidrológica em ambiente semiárido: estudo de caso bacia hidrográfica do açude Orós. 2013. 136 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenha Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

VERTESSY, Robert et al. (2001) Storm Runoff Generation at La Cuenca. In: GARYSON, Rodger; BLOSCHL, Gunter (Ed.). Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observation and Modelling. New York: Cambridge University Press. p. 247-271.

WEILER, Markus et al. (2004). Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology. Journal Of Hydrology**,** [s.l.], v. 285, n. 1-4, p.3-18.

ZIMMERMANN, Beate et al (2014). Connectivity of overland flow by drainage network expansion in a rain forest catchment. Water Resources Research, [s.l.], v. 50, n. 2, p.1457-1473.

HORTON, Robert E.. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions, American Geophysical Union, [s.l.], v. 14, n. 1, p.446-460.