

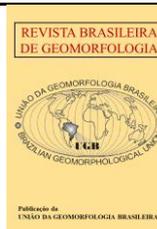


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, n° 3 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2134>



Artigo de Pesquisa

Monitoramento da Vazão e Carga Sólida Suspensa em Eventos Pluviais na Bacia do Ribeirão do Gama/DF

Monitoring of Flow and Suspended Solid Load in Rainfall Events in the Ribeirão do Gama Basin/DF

Renan Smith Louzada ¹, André Silva Tavares ² e Rogério Uagoda ³

¹ Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Brasília, Brasil. renan6n@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3865-8620>

² Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Brasil. andresttavares@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7099-8916>

³ Universidade de Brasília, Departamento de Geografia, Brasília, Brasil. rogeriouagoda@unb.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9448-1313>

Recebido: 16/06/2021; Aceito: 25/03/2022; Publicado: 01/07/2022

Resumo: A carga sedimentar fluvial pode indicar alterações na dinâmica ambiental em bacias hidrográficas, como processos intensificados de erosão, assoreamentos e diminuição de oxigênio disponível em rios e lagos, entre outros fatores. O objetivo desse estudo foi monitorar a vazão e a carga sólida em suspensão durante eventos pluviais de diferentes magnitudes próximo à foz do Ribeirão do Gama, em Brasília, Distrito Federal, entre dezembro de 2015 e março de 2016. Para isso, a vazão foi estimada por meio de medições discretas a vau com auxílio de molinete e método acústico. O nível foi obtido com linógrafo digital, permitindo estabelecer uma curva-chave a partir da equação exponencial. Amostradores manuais integradores e amostrador automático pontual foram utilizados para obter dados de descarga sólida. O tempo de concentração pluvial foi calculado para onze eventos monitorados, e testadas as correlações entre chuva, vazão, carga sólida e turbidez. Os resultados indicaram histereses com dois comportamentos: laço em oito e laço no sentido anti-horário. A produção de sedimentos na bacia do Ribeirão do Gama possui uma resposta direta relacionada ao escoamento superficial e infiltração de água no solo.

Palavras-chave: Turbidez, Histerese, Deposição de sedimentos, Lago Paranoá.

Abstract: The fluvial sedimentary load may indicate changes in environmental dynamics in hydrographic basins, such as intensified erosion processes, siltation and decreased oxygen available in rivers and lakes, among other factors. The objective of this study was to monitor the flow and suspended solid load during rainfall events of different magnitudes near the mouth of the Ribeirão do Gama, in Brasília, Distrito Federal, between December 2015 and March 2016. For this, the flow was estimated through discrete measurements at ford with the aid of a reel and the acoustic method. The level was obtained with a digital linigraph, allowing to establish a key curve from the exponential equation. Integrating manual samplers and automatic point sampler were used to obtain solid discharge data. The rainfall concentration time was calculated for eleven monitored events, and the correlations between rainfall, flow, solid load and turbidity were tested. The results indicated hysteresis with two behaviors: eight loop and counterclockwise loop. It is possible to infer that sediment production in the Ribeirão do Gama basin has a direct response related to surface runoff and water infiltration into the soil.

Keywords: Turbidity, Hystereses, Sediment deposition, Lake Paranoá.

1. Introdução

O recurso natural de maior valor social, ambiental e econômico é a água, e seu estudo ganha maior relevância a cada ano. A preservação dos recursos hídricos está associada, entre outros fatores, ao uso sustentável dos solos, que vai influenciar na qualidade e quantidade de água disponível para consumo humano. Logo, as bacias hidrográficas constituem sistemas adequados para avaliar os impactos que acarretam riscos ao equilíbrio e manutenção do solo e da água (BARUQUI; FERNANDES, 1985; SPALEVIC, 2011).

A gestão de bacias hidrográficas no Brasil ocorre por meio de unidades territoriais legalmente definidas pela Lei 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (BRASIL 1997). Essas unidades são constituídas por uma área de captação natural de água que conduz seu escoamento para o ponto de saída, ou exutório (PAZ, 2004). Nesse aspecto, o monitoramento hidrossedimentológico é uma importante ferramenta de gestão dos recursos hídricos, pois atua como um indicador das alterações na resposta (quantidade e qualidade) dos sistemas fluviais.

No Lago Paranoá e tributários, em Brasília, Distrito Federal, impactos causados de proliferação de cianobactérias provenientes de águas muito fertilizadas promoveu a eutrofização em parte do lago nas últimas décadas. Tal condição desencadeou a mortandade de peixes em virtude da diminuição das taxas de oxigênio dissolvido, com destaque ao trecho do braço do Riacho Fundo (LIPORONI, 2012). Entretanto, um relatório sobre a qualidade da água realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017) aponta para índices positivos de tratamento de esgoto no Distrito Federal. Enquanto a capital federal trata 83% desses resíduos, a média da região Centro-Oeste é de 48%, e do Brasil, de 39%. Porém, ainda são poucos os estudos que envolvem os impactos gerados pela produção de sedimentos na dinâmica hídrica, tampouco em eventos pluviais de alta magnitude.

De acordo com Carvalho (1994) e Vestena (2009), na bacia do Rio São Francisco e tributárias, como a sub-bacia do Ribeirão do Gama no contexto desse estudo, um crescente aumento na produção de sedimentos está associado à urbanização, mineração, ampliação de áreas agrícolas e pavimentação de estradas, aliados a precipitações intensas. No Distrito Federal, a Companhia de Saneamento Ambiental (CAESB) é o órgão responsável por medições periódicas de vazão, porém, são escassos os dados de medições operados em eventos de chuva intensa, o que reduz as informações em relação a picos de cheias e dados sobre eventos com real potencial para o transporte da carga sedimentar significativa.

Para Lenzi e Marchi (2000) uma pequena bacia hidrográfica pode apresentar vários tipos de relações entre a vazão (Q), carga sólida suspensa (C_{ss}) e turbidez da água, processos conhecidos como histerese. Williams (1989) define cinco modelos de histerese: (1) linha reta (*single-valued line*); (2) laço no sentido horário (*clockwise loop*); (3) laço no sentido anti-horário (*counterclockwise loop*); (4) laço simples de uma volta (*single line plus loop*) e; (5) laço em oito (*figure eight*). Sammori *et al.* (2004) avaliaram que bacias de regiões úmidas apresentam uma relação de histerese com maior frequência no sentido horário, devido à intensidade das chuvas com pico de Q posterior ao pico de C_{ss} . Segundo Carvalho (1994) os picos de Q e C_{ss} podem se apresentar de três maneiras: (1) Pico de C_{ss} antecedente ao pico de Q , situação comum em bacias mais antropizadas; (2) Pico de Q e C_{ss} instantâneos; e, (3) Pico de C_{ss} posterior ao pico de Q .

A relação entre a C_{ss} e a Q varia conforme o tempo em diferentes situações, principalmente em função do uso do solo, da intensidade das chuvas, do escoamento superficial, da temperatura, do percurso dos sedimentos, além de aspectos físicos da bacia, como declividade, cobertura vegetal, resistência do solo à erosão hídrica, entre outros. Cabe ressaltar que os estudos hidrossedimentológicos em eventos pluviais fornece informações importantes que podem ser utilizadas no auxílio da prevenção e/ou mitigação de impactos diversos, como assoreamentos, inundações e enchentes.

No panorama do presente estudo, devido à seca extrema prolongada que atingiu a região Centro-oeste entre os anos de 2015 e 2016, conforme os dados de monitoramento das secas da Agência Nacional de Águas (ANA), a CAESB planejou iniciar em 2018 um projeto para a utilização do Lago Paranoá no abastecimento urbano de Brasília. Esse período de seca prolongada foi associado as oscilações climáticas promovidas pelo fenômeno El Niño no Atlântico Sul (PEREIRA; REBOITA; AMBRIZZI, 2017). No entanto, estudos diagnósticos que apontam para uma relação direta entre o El Niño e a ocorrência de eventos extremos na região Centro-oeste ainda são escassos.

Assim, considerando a possibilidade da ocorrência de eventos extremos durante o período de chuvas entre os anos de 2015 e 2016, este estudo teve como objetivo monitorar a vazão e a carga sólida em suspensão durante

eventos pluviiais de diferentes magnitudes próximo à foz do Ribeirão do Gama, em Brasília, Distrito Federal. Diferentes técnicas de medição da vazão e da carga sedimentar fluvial contribuíram para melhorar a curva-chave, auxiliando na compreensão dos eventos de cheia ocorridos naquele período. Os dados coletados podem auxiliar estudos futuros na relação das oscilações climáticas promovidas pelo fenômeno El Niño e os impactos causados pelos eventos extremos na região Centro-oeste.

2. Área de Estudo

O Ribeirão do Gama possui 22,8 km de extensão e é tributário do lago Paranoá, com área da bacia que ocupa 147 km² (Figura 1). Na Área de Proteção Ambiental da bacia do Ribeirão do Gama estão inseridas a APA Cabeça de Veado, áreas verdes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Aeronáutica e a Fazenda Água Limpa da UnB, as quais se distribuem na margem leste da bacia, enquanto a margem oeste é ocupada por condomínios de baixa densidade demográfica urbana.

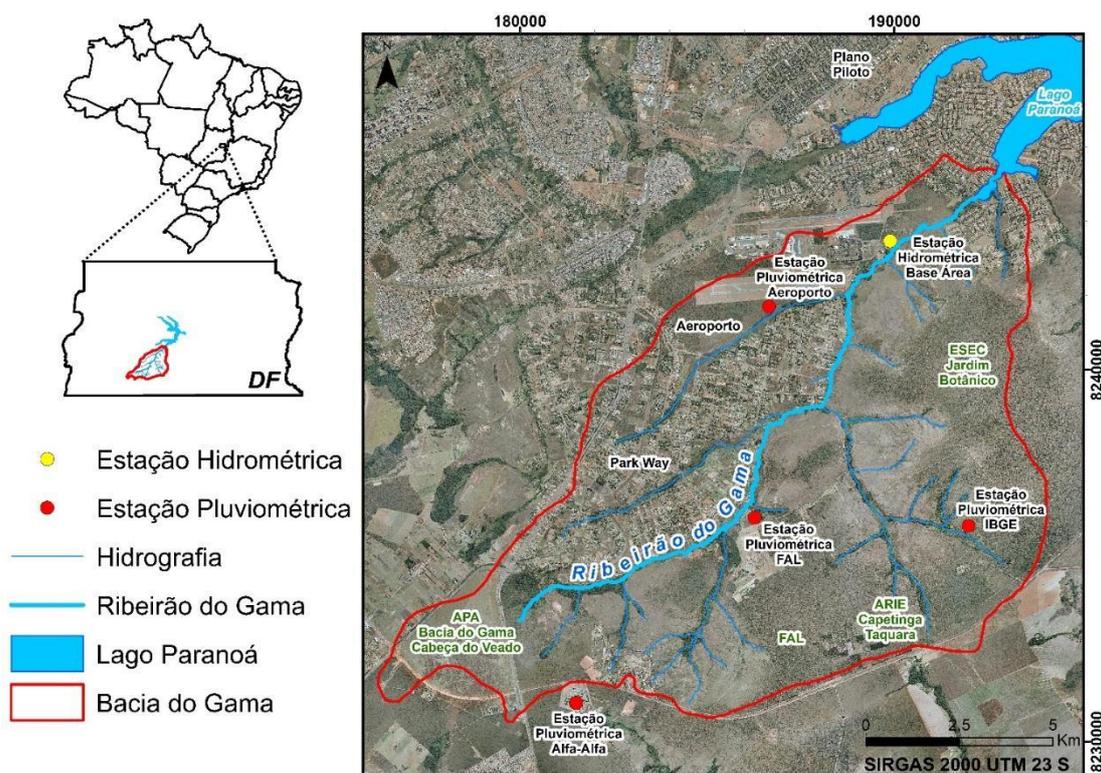


Figura 1. Localização da Bacia do Ribeirão do Gama. Fonte: SICAD Terracap (2007) e Autores.

A precipitação média é de 1.500 mm ano⁻¹, concentrada entre novembro e março, e uma vazão média de 1,85 m³ s⁻¹ no canal principal (MOURA *et al.*, 2010). O clima da região possui dois períodos distintos, típicos da região de cerrado, com alta taxa de precipitação no verão (250 mm em dezembro) e temperatura média de 22 °C, e seca no inverno (9 mm em junho) com temperatura média de 18 °C (MOURA *et al.*, 2010).

A bacia possui rochas do Grupo Paranoá, das unidades Ardósia e Metarritmito Arenoso (CAMPOS, 2005). O Ribeirão do Gama flui no contato entre as duas principais litologias, as encostas e canais tributários convergem no sentido norte, em posição *Anti-Dip* em relação à direção e mergulho das camadas, com foz no interior do hemidomo do Paranoá. A bacia é uma importante área de estudo de processos de erosão hídrica intensificada, já que o aumento anual da dissecação do canal principal é visível, e contribui como fonte direta de sedimentos na colmatação do Lago Paranoá.

Segundo Menezes (2010), o processo de urbanização e impermeabilização vem promovendo um excedente de precipitação que escoar até os canais de drenagem com maior energia, o que contribui para o transporte do material mais grosseiro (arenoso), e diminui a sedimentação dos canais tributários. A evolução desses processos vem aumentando nos últimos anos as áreas assoreadas do Lago Paranoá (MIGUEL; ROIG; OLIVEIRA, 2017).

Na bacia são encontrados depósitos sedimentares fluviais com até sete metros de altura acima do leito do canal, com idade até 21.000 anos antes do presente (CALDEIRA; UAGODA, 2016). O modelo digital de elevação (ALOS sensor Palsar) permitiu identificar uma altitude mínima de 1.001 metros e máxima de 1.272, com declive máximo de 25,1% (Figura 2). Segundo Novais Pinto (1987) a bacia é dividida nos compartimentos geomorfológicos suave ondulados, nas chapadas da Contagem e depressão do Paranoá, onde predominam os Latossolos (61,4%), áreas com relevo escarpado, onde predominam os Cambissolos (22,3%), e solos Hidromórficos, junto às calhas dos rios (16%). Os Cambissolos são pouco desenvolvidos, com horizonte B incipiente e textura média a argilosa, sem variação entre os horizontes A e B. Já os Latossolos possuem textura variável, com argila de atividade baixa, fortemente intemperizados e profundos. No entanto, os solos possuem altas taxas de infiltração, o que favorece o abastecimento das águas subterrâneas (NOVAIS PINTO, 1987).

De acordo com Menezes (2010), a porcentagem de escoamento superficial subiu de 2,6% para 6,75% entre os anos de 1954 a 2009. Além disso, houve alterações no uso e ocupação do solo, com redução das áreas de cerrado de 54,4% para 35,5%, redução do campo/pastagem de 28,7% para 21,3%, e aumento das áreas urbanizadas em 29,1%. Estudos geomorfológicos na região do Distrito Federal foram realizados, principalmente sobre a cidade de Brasília, que é constituída por um conjunto de núcleos urbanos que retrata bem o conflito entre a construção/ampliação da capital federal e a gestão dos recursos hídricos, disponíveis em Novaes Pinto e Carneiro (1984), Novaes Pinto (1987; 1994), Martins e Baptista (1998), Santos e Uagoda (2017).

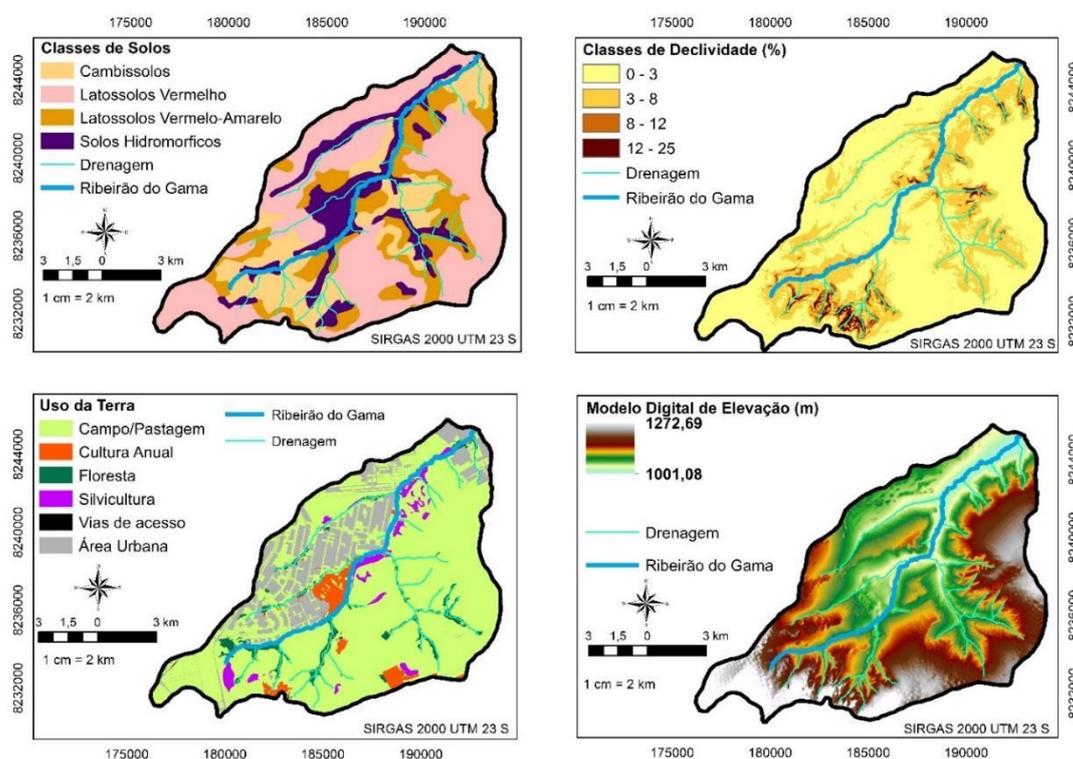


Figura 2. Classes de solo, uso e cobertura, declividade e elevação da bacia do Ribeirão do Gama.

Fonte: Confeccionado pelos autores.

3. Materiais e Métodos

Os dados pluviométricos foram obtidos por cálculo da média aritmética de quatro estações pluviométricas automáticas, Alfa, FAL/UnB, IBGE e Aeroporto (Figura 1), com coletas diárias em intervalos de 15 minutos. As estações se encontram em terreno plano e livre de obstáculos, com a superfície de captação do pluviômetro em um plano horizontal com altura acima de 1,5 metros do solo (ANA, 2017).

Para a variação do nível do Ribeirão do Gama foi utilizado o linígrafo digital VAISALA com transdutor de pressão (h0 de -3,19), com intervalos de coletas de 15 minutos, e régua linimétrica. A vazão foi determinada com medições discretas a vau, utilizando-se o OTT - *Acoustic Digital Current meter* (ADC) para as menores vazões; o

OTT - *Acoustic Doppler Profiler-Quiner* (ADP), para as vazões médias e *Floating Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) para as ondas de cheia.

A curva chave foi estabelecida para o período de treze medições de vazão por meio da equação exponencial (Equação 1). A equação baseia-se no princípio do expoente hidráulico de Bakmeteff, comumente utilizada para curva-chave multi-segmentada (BAKHMETEFFF, 1958).

$$Q = k * (H - H_0) ^n \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde: Q = Vazão ($m^3 s^{-1}$); k e n = Constantes teóricas; H = Cota do rio observada (m); H_0 = Cota quando a vazão é nula (m).

A descarga sólida foi medida a vau em diferentes profundidades, com apoio de uma ponte para o uso dos amostradores USDH-48 e USDH-59, utilizando o método de integração em verticais centrais. Na coleta automática, utilizou-se o amostrador automático ISCO 6712, com sensor de nível e coletas pontuais programadas para intervalos de 30 minutos. A determinação da C_{ss} foi realizada por ensaio de filtração no Laboratório de Geoquímica (LaGeq), do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. As amostras foram decantadas por 48 horas, permitindo medir o volume e retirar o sobrenadante, restando alíquota de 200 ml. O composto (líquido + sedimentos) foi filtrado em Milipore de 0,47 mm, pesado e conectado à bomba a vácuo. O resíduo da filtragem foi levado à estufa para secar por 24 horas em 100 °C. Em seguida permaneceu em dessecador a vácuo até atingir a temperatura ambiente, e por fim pesado na balança de precisão. O valor obtido foi subtraído do peso inicial do filtro para conhecimento do peso real da amostra. A C_{ss} foi determinada pela razão entre a massa seca do sedimento contido na amostra e o volume total utilizado, conforme a equação (2):

$$C_{ss} = \frac{P}{V} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde: C_{ss} = Concentração de sedimentos em suspensão ($mg L^{-1}$); P = Massa seca do sedimento (mg); V = Volume da alíquota filtrada (L)

A C_{ss} multiplicada por Q instantânea fornece a estimativa da descarga de sedimentos (Q_{ss}), que, integrada no tempo, indica a estimativa da produção de sedimentos em $ton dia^{-1}$ (Equação 3). A Q_{ss} foi obtida conforme a equação 3, proposta por Santos et al. (2001).

$$Q_{ss} = 0,0864 * Q * C_{ss} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde: Q_{ss} = Descarga sólida total ($ton dia^{-1}$); Q = Vazão ($m^3 s^{-1}$); C_{ss} = Concentração de sedimentos em suspensão ($mg L^{-1}$); 0,0864 = Constante de correção de unidades (segundos para dias / gramas para toneladas)

A turbidez foi medida automaticamente com a sonda Hydrolab DS5X, com amplitude de medição de 0 a 3000 UNT (Unidade Nefelométrica de Turbidez). A estabilidade dos dados consiste em calibrar a sonda com soluções padrões de 0 UNT, 60 UNT, 700 UNT e 1000 UNT. Os eventos pluviais monitorados e coletados iniciaram em dezembro de 2015 e finalizaram em março de 2016 (Tabela 1). Esse período apresentou os maiores índices pluviométricos no Distrito Federal, sendo onze eventos de diferentes intensidades e histereses.

As coletas operadas pelo amostrador automático ISCO 6712 ocorreram em diferentes horários. O amostrador é ativado por meio do sensor de nível que dispara a bomba de sucção do equipamento no momento do contato com a água, registrando as primeiras coletas a partir da subida da cheia. O equipamento é capaz de completar um ciclo de amostragem (24 garrafas de 1 L) ou até que a água deixe de tocar no sensor em intervalo de tempo programado. Para esta pesquisa, foi estabelecido o intervalo de coleta de 30 minutos para as amostras pontuais. Para o melhor entendimento da carga sólida suspensa no Ribeirão do Gama, além das coletas pontuais do amostrador, foram realizadas 24 mensurações de nível em vertical central em dias com diferentes magnitudes pluviais.

Tabela 1. Coletas de amostras em eventos pluviais pelo amostrador automático ISCO 6712. Fonte: Autores.

Eventos	Data (Início)	Hora	Data (Final)	Hora
1	08/12/2015	20:03	09/12/2015	01:33
2	26/12/2015	14:09	26/12/2015	18:39
3	03/01/2016	10:02	03/01/2016	11:32
4	07/01/2016	22:06	08/01/2016	04:06
5	13/01/2016	18:07	13/01/2016	21:07
6	21/01/2016	16:31	21/01/2016	19:31
7	28/01/2016	19:09	29/01/2016	06:09
8	14/02/2016	22:37	15/02/2106	02:07
9	21/02/2016	22:09	22/02/2016	17:35
10	01/03/2016	14:41	02/03/2016	01:41
11	08/03/2016	23:45	09/03/2016	11:15

Para o cálculo do tempo de concentração pluvial (T_c) foram estabelecidas duas equações, a primeira (ΔT_1) com base na diferença entre o tempo de início da ascensão da vazão (Q) em relação ao tempo de início das chuvas, e a segunda (ΔT_2) representada pela diferença entre o tempo de início da ascensão da turbidez (T) em relação ao início da ascensão da Q (t).

$$\Delta T_1 = T \text{ (início da ascensão da } Q) - t \text{ (início da chuva).}$$

$$\Delta T_2 = T \text{ (início da ascensão da turbidez)} - t \text{ (início da ascensão da } Q).$$

4. Resultados e Discussão

No monitoramento do Ribeirão do Gama, entre dezembro de 2015 e março de 2016, ocorreram dois picos de vazão que ultrapassaram os $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, bem acima do valor médio da vazão média ($1,85 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). O maior pico, que ocorreu entre 21 e 23 de janeiro de 2016, extravasou a calha do canal e foi responsável por danificar a Plataforma de Coleta de Dados (PCD), o que impossibilitou temporariamente a obtenção de dados (Figura 3). Houve a ocorrência de 24 picos de menor intensidade no total dos 13 eventos monitorados (Tabela 2).

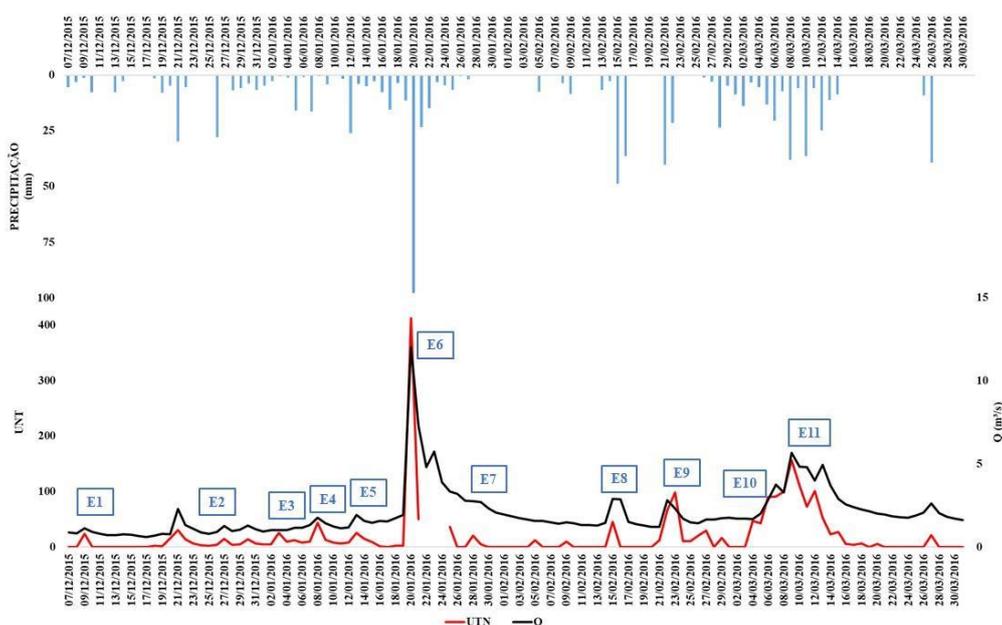


Figura 3. Média diária de precipitação (Moura *et al.*, 2010), vazão (Q) e turbidez (UNT) entre dezembro de 2015 e março de 2016. Fonte: Autores.

Tabela 2. Medições de vazão (Q) na Bacia do Ribeirão do Gama (2015-2016). Fonte: Autores

EVENTOS	DATA	HORA	Equipamentos de Medição	COTA (m)	VAZÃO (m³/s)
1	01/12/2015	09:20	QLINER	0,6	1,19
2	07/12/2015	16:25	QLINER	0,78	0,97
3	05/01/2016	13:10	QLINER	0,85	1,91
4	07/01/2016	12:10	QLINER	0,82	1,24
5	11/01/2016	16:10	QLINER	0,8	1,31
6	13/01/2016	17:40	QLINER	1,24	2,57
7	19/01/2016	15:20	QLINER	1	1,81
8	21/01/2016	10:25	M9	2,6	8,73
9	26/01/2016	10:40	QLINER	1,6	2,83
10	04/02/2016	11:25	QLINER	0,9	1,79
11	11/02/2016	12:50	QLINER	0,96	1,44
12	22/02/2016	10:40	QLINER	1,5	3,14
13	22/03/2016	16:20	QLINER	0,92	1,85

Quando comparados os eventos pluviais no período das coletas e as chuvas médias mensais da normal climatológica, entre 1979 e 2008, percebe-se que as precipitações no período entre dezembro de 2015 a março de 2016 foram menores que as médias mensais dos anos anteriores, com redução média de 248 mm no mesmo período (Figura 4). De acordo com Kogan e Guo (2017), em dezembro de 2015 anomalias promovidas pelo El Niño foram intensificadas no Pacífico Tropical, com aumento de 2,9 °C, maior elevação da temperatura no fenômeno dos últimos 36 anos. Eventos de seca com tais magnitudes foram registrados em 1972-1973 no sudeste da Ásia e nordeste da China e em 1991-1992 e 1997-1998 no sul da África e nordeste do Brasil.

No contexto desse estudo, o ciclo prolongado de seca extrema entre 2015 e 2016 trouxe como consequência uma crise hídrica na região Centro-oeste, que atingiu o ápice em 2016, quando foi elaborado um projeto a utilização das águas do Lago Paranoá para abastecimento da cidade de Brasília. No entanto, não foi possível afirmar se as oscilações climáticas promovidas pelo fenômeno El Niño teriam consequências diretas nos níveis de intensidade das chuvas na região Centro-oeste (PEREIRA; REBOITA; AMBRIZZI, 2017).

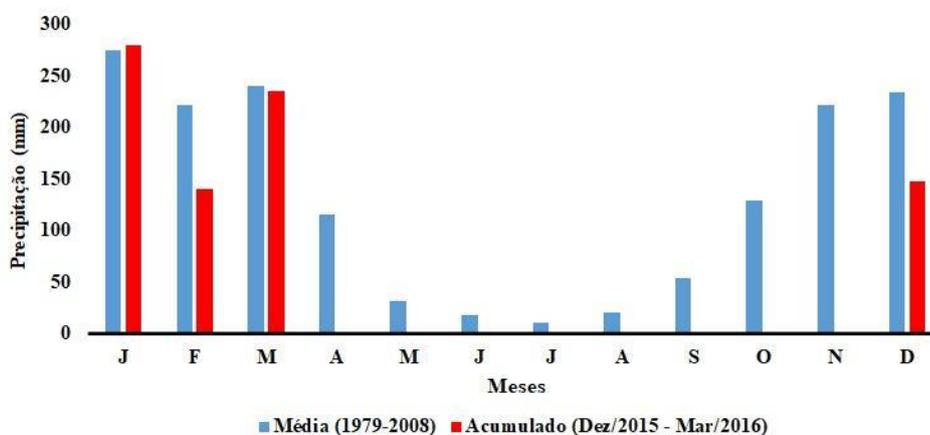


Figura 4. Média mensal de chuvas para a normal climatológica 1979-2008 (azul) e acumulado de chuvas para os meses referentes a este estudo, entre dezembro de 2015 e janeiro de 2016 (vermelho). Fonte: Moura *et al.* (2010) e Autores.

Uma curva chave foi elaborada para estimar os valores de Q, com cota máxima de 3,90 m (Figura 5). Acima de 4 m o rio extravasa a calha principal e ocorre amplas oscilações no comportamento dos valores de Q. Assim, a

curva chave é aplicável apenas para valores inferiores à cota de 4 m. Logo, é importante sempre equalizar e atualizar os valores da curva chave durante eventos pluviais intensos. Os valores dos coeficientes para a curva chave no período entre dezembro de 2015 e março de 2016 correspondem a: k : 0,001124; H_0 : -0,31997; n : 5,093729.

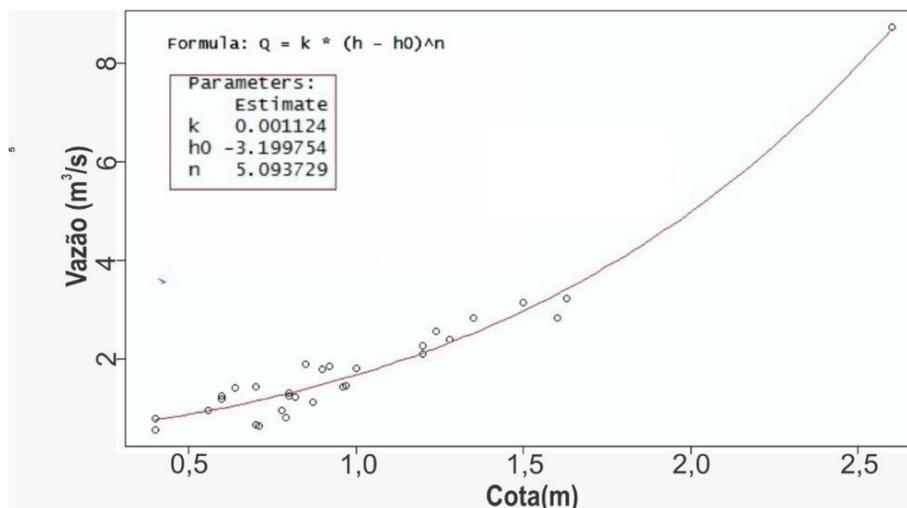


Figura 5. Curva chave estabelecida por meio da Q e cota medidas em campo entre dezembro de 2015 e março de 2016. Fonte: Autores.

Verificou-se a ocorrência de picos de C_{ss} em diferentes situações na bacia do Ribeirão do Gama, são elas: (1) aumento inicial da Q e a elevação da C_{ss} , seguido pela diminuição da C_{ss} enquanto a Q ainda aumentava, e por fim um pico de ambas, Q e C_{ss} , simultaneamente; (2) pico inicial de Q com aumento progressivo até o pico de C_{ss} ; (3) somente um pico inicial de C_{ss} (no primeiro evento), ou dois ou mais picos (eventos restantes).

Em oito eventos (1; 2; 3; 4; 5; 7; 8; e 11) o segundo pico de C_{ss} ocorreu após o pico inicial da Q , fenômeno que pode estar associado a tendência de saturação dos solos com o elevado índice de umidade provocados por altos níveis pluviométricos em eventos intensos de curta duração (HEWLETT; HIBBERT; 1967; DUNNE; 1969; 1970). Devido à alta carga de sedimentos carreados no primeiro pico de Q , taxas elevadas foram registradas nos primeiros picos de C_{ss} (VESTENA, 2008). Apenas em três eventos o pico da C_{ss} antecede o pico de Q (6; 9; 10). A área contém solos bem drenados ao mesmo tempo que possui altos níveis de escoamento superficial devido a topografia.

Entre as cinco situações de histerese propostas por Williams (1989), duas foram observadas na bacia do Ribeirão do Gama (Figura 6 e 7). O laço em oito foi predominante e ocorreu nos eventos 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11. O laço no sentido anti-horário foi observado nos eventos 1, 3, 4 e 9. Segundo Lenzi e Marchi (2000) é possível encontrar vários tipos de histereses em uma bacia, a depender de fatores climáticos, entre outros.

Na razão entre Q e turbidez ocorreram histereses de laço no sentido anti-horário, onde a turbidez aumentou após o pico de Q , ocorrendo um segundo pico da turbidez. Os maiores picos de Q foram registrados nos eventos 6 e 11. Esse comportamento pode estar associado a contribuição de sedimentos de áreas fonte à montante da bacia, visto que a rápida saturação dos solos aumenta o volume e a velocidade do escoamento superficial (MINELLA et al., 2011). O carregamento de partículas do solo para os canais é atenuado em áreas com cobertura vegetal nativa (na margem direita da bacia).

A tendência do solo em permanecer saturado durante os sucessivos eventos pluviais tornou a resposta da turbidez mais rápida, já que nos primeiros eventos notou-se uma baixa intensidade das chuvas iniciais, pouco volume de escoamento superficial e uma boa infiltração dos solos. A resposta da Q e da turbidez foi lenta durante as chuvas iniciais, ao passo que com a diminuição do tempo de concentração pluvial a resposta da Q e turbidez foi mais rápida (Tabela 3). De acordo com Williams (1989) a ausência de taxas elevadas de sedimentos durante eventos pluviais é a principal característica da histerese de laço no sentido horário.

A estimativa do tempo de concentração pluvial (T_c) em bacias hidrográficas rurais foi proposta por Almeida et al. (2013), cujos resultados indicam maior diferença percentual dos dados hidrossedimentológicos coletados e

analisados sob o método de Pasini. As variações dos fatores atuantes no sistema fluvial podem crescer ou reduzir a resposta do tempo de concentração pluvial.

Tabela 3. Tempo de concentração pluvial (Tc) nos eventos coletados 2015-2016.

Eventos	Data (início)	Data (término)	ΔT_1^* (min.)	ΔT_2^* (min.)
1	08/12/2015 - 15:00	09/12/2015 - 02:45	60'	135'
2	26/12/2015 - 11:45	27/12/2015 - 20:00	45'	150'
3	03/01/2016 - 23:00	04/01/2016 - 14:45	105'	45'
4	07/01/2016 - 15:00	07/01/2016 - 20:30	75'	115'
5	13/01/2016 - 00:15	13/01/2016 - 04:30	60'	30'
6	19/01/2016 - 19:45	20/01/2016 - 10:30	45'	105'
7	28/01/2016 - 13:45	28/01/2016 - 20:45	30'	60'
8	15/02/2016 - 20:30	16/02/2016 - 01:45	30'	45'
9	21/02/2016 - 18:30	21/02/2016 - 22:30	45'	45'
10	02/03/2016 - 16:15	02/03/2016 - 22:00	45'	60'
11	08/03/2016 - 12:00	08/03/2016 - 21:00	45'	30'

* ΔT_1 = tempo entre a ascensão (Q) e o início das chuvas; ΔT_2 = tempo entre a ascensão (turbidez) e o início da ascensão (Q).

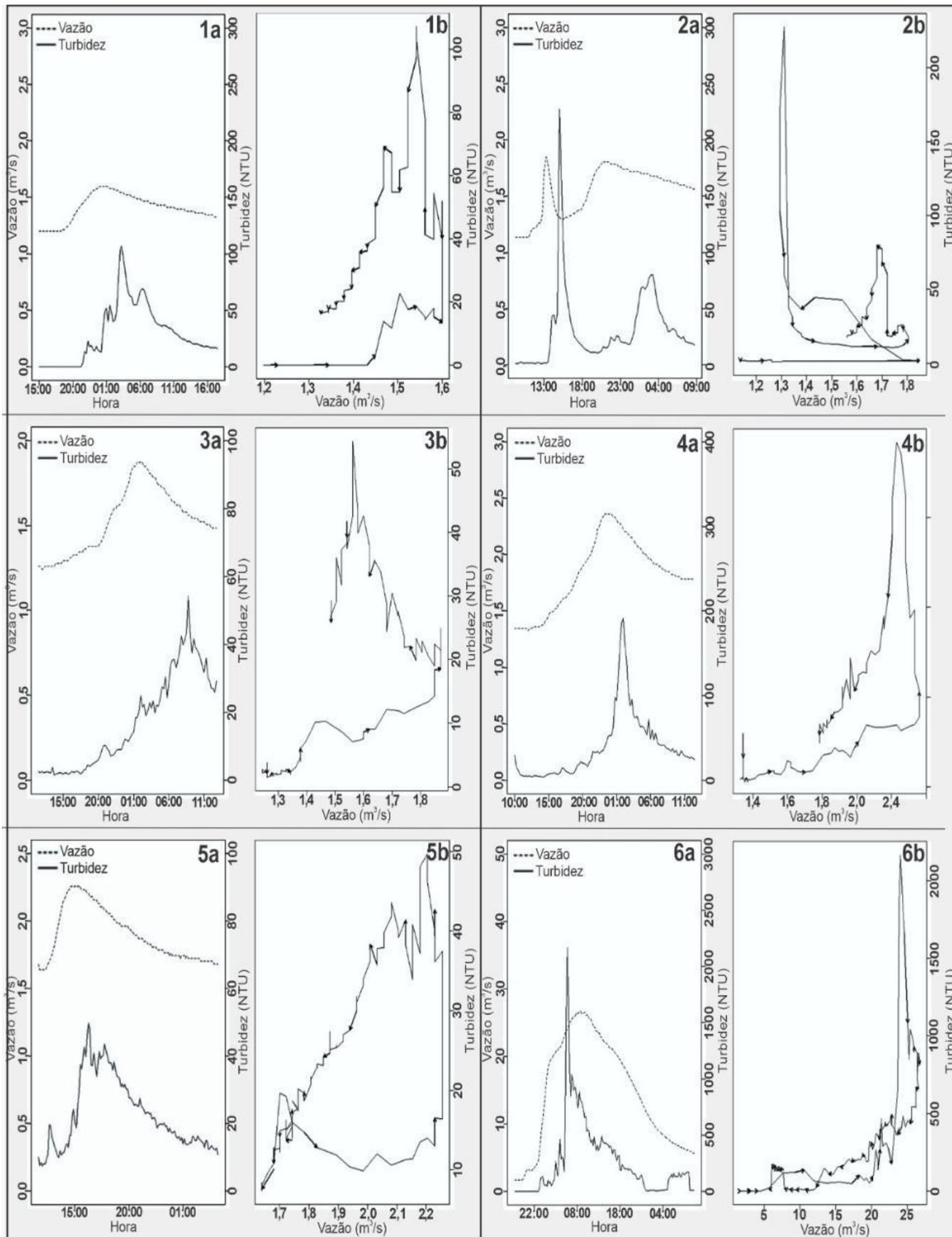


Figura 6. Hidrogramas: Q x turbidez (a direita) e o desempenho das histereses (a esquerda). Eventos 1; 2; 3; 4; 5 e 6 no Ribeirão do Gama. Fonte: Autores

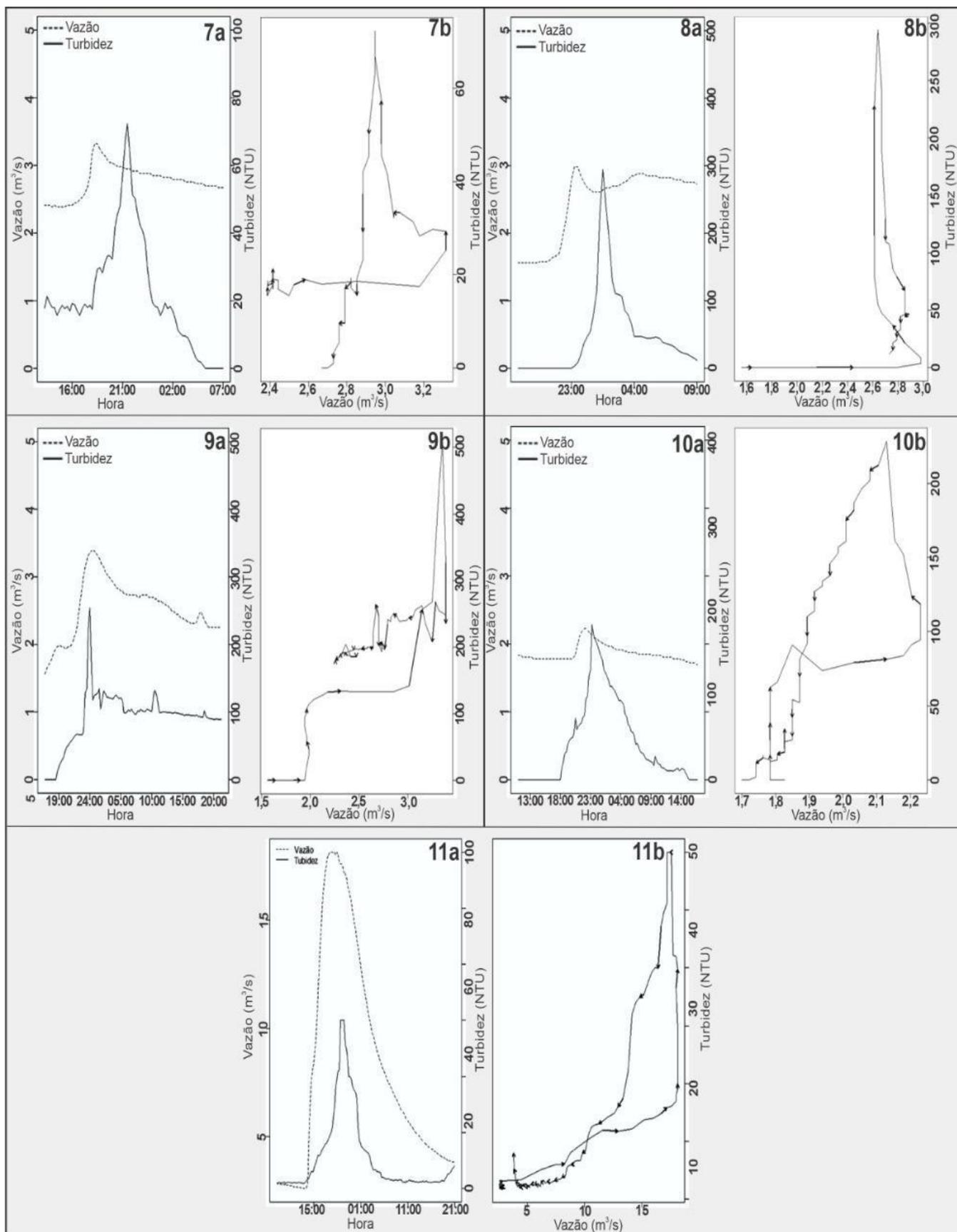


Figura 7. Hidrograma: Q x turbidez (a direita) e o desempenho das histereses (a esquerda). Eventos 7; 8; 9; 10 e 11 no Ribeirão do Gama. Fonte: Autores.

Na secção transversal do Ribeirão do Gama a C_{ss} e a turbidez foram correlacionadas com a Q pontual (Figura 8 e 9). A relação entre a Q e a C_{ss} é uma estimativa da produção de sedimentos por erosão em vertentes e no canal fluvial (WILLIAMS, 1989). Foi obtida uma boa correlação entre a C_{ss} e a Q ($R^2 = 0,8069$) para as coletas do amostrador automático (AA), e uma correlação moderada ($R^2 = 0,4479$) para as coletas em verticais centrais (VC) (Figura 7).

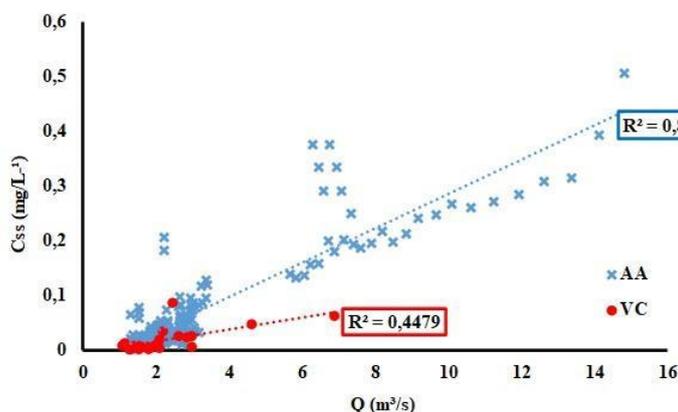


Figura 8. Relação entre C_{ss} e Q por Vertical Ventral (VC) e Amostrador Automático (AA). Fonte: Autores.

Vestena (2008) também encontrou baixa correlação entre Q e C_{ss} em eventos monitorados com amostragem em verticais centrais, dos quais apenas 5 deles apresentaram R^2 superior a 0,7, resposta que pode estar associada a oscilação entre o pico de C_{ss} , que pode anteceder o pico da Q . Para Manz *et al.* (2010) a boa correlação entre a C_{ss} e a Q ($R^2 = 0,8$) obtida no rio Sagrado, um dos tributários do Lago Paranoá, se deve principalmente a boa representatividade da C_{ss} coletadas em amostras pontuais, resultando em uma Q_{ss} média de 19,20 t dia⁻¹, ajustando os valores de cálculos anteriores que resultavam em 13,94 t dia⁻¹.

A baixa correlação entre as variáveis de Q e turbidez ($R^2 = 0,2251$) (Figura 9) corresponde às amostras coletadas em verticais centrais durante os eventos pluviais, enquanto os resultados do amostrador automático representou uma melhor correlação ($R^2=0,6368$) entre Q e turbidez. Foi observado durante os eventos que as repostas de turbidez foram predominantemente lentas em relação aos valores de Q entre 1 e 3 m³ s⁻¹.

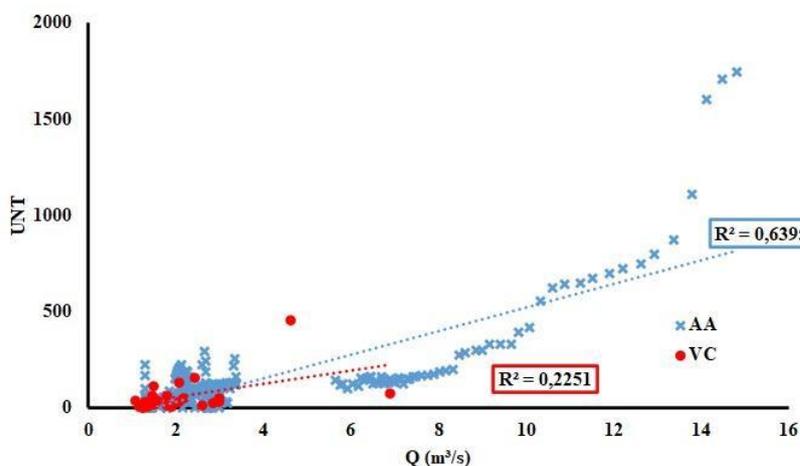


Figura 9. Relação entre turbidez (UNT) e Q no Ribeirão do Gama, por Vertical Central (VC) e Amostrador Automático (AA). Fonte: Autores.

Uma correlação moderada ($R^2 = 0,5231$) foi verificada para a razão entre turbidez e C_{ss} quando utilizado os dados do amostrador automático. Já as amostragens por verticais centrais apresentaram uma correlação baixa (R^2

= 0,2443) entre turbidez e C_{ss} (Figura 10). A pequena quantidade de amostras para a vertical central pode ter influenciado na baixa correlação encontrada. Vestena (2008) encontrou boa correlação entre os dados pontuais e os medidos para a C_{ss} e turbidez. O autor enfatiza que o monitoramento automático é de suma importância para a compreensão da dinâmica da C_{ss} . Schettini *et al.* (2013) obtiveram resultados com alta correlação entre C_{ss} e turbidez, no Rio Itajaí-Açu, em Santa Catarina, em eventos com duas ordens de magnitude de alta intensidade, que somadas contribui para 70% de C_{ss} .

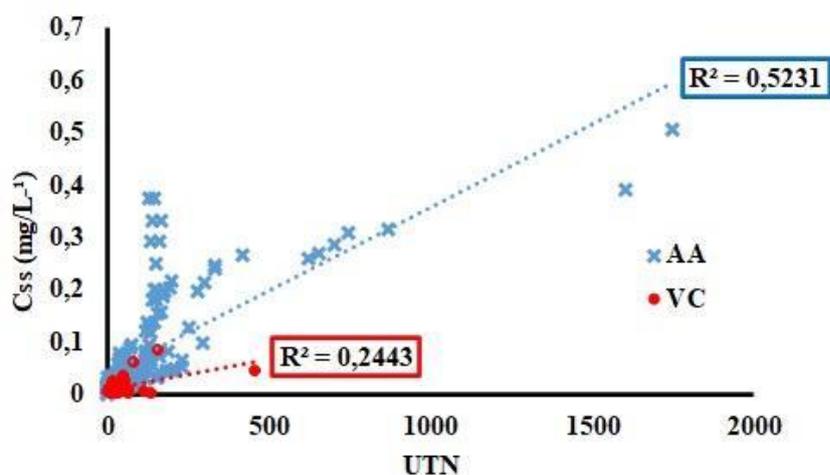


Figura 10. Relação entre C_{ss} e turbidez (UNT), por Vertical Central (VC) e Amostrador Automático (AA). Fonte: Autores.

Chagas (2015) obteve boa correlação entre turbidez e C_{ss} referente a cada fração granulométrica, observando que as partículas menores, como silte e argila, responderam melhor na detecção do turbidímetro, porém, o mesmo não ocorreu com as frações maiores, como a areia, sendo necessário maiores concentrações desse material para a obtenção de valores mais elevados de turbidez. Segundo o autor, as 24 mensurações de vertical central foram realizadas em um único momento do evento pluvial, o que foi determinante na aferição dos resultados.

Andrade Neto *et al.* (2012) identificaram na bacia do Guaíba/RS uma correlação moderada entre C_{ss} e turbidez de $R^2 = 0,6$. Isto se deve ao fato de que a C_{ss} está relacionada a fatores diversos além da descarga, a exemplo da cobertura vegetal nativa, capaz de proteger o solo, ou agrícola em fase de plantio, que possui menor capacidade de conter o impacto das gotículas de água, bem como o fator das chuvas intensas e da disponibilidade de sedimentos desagregados. Em condições semelhantes a bacia do Ribeirão do Gama, o Rio Narmada, na Índia, Gupta e Chakrapani (2008) detectaram em um único evento de cheia quase 50% da C_{ss} anual. Eventos extremos de cheias podem estar associados a fenômenos climáticos atípicos, como a seca extrema prolongada causada pelos efeitos do El Niño e La Niña na região Centro-oeste do Brasil.

Em relação à utilização do amostrador automático, verifica-se a necessidade de um maior número de amostragem, apesar das boas correlações encontradas entre as variáveis de Q , C_{ss} e turbidez. Por se tratar de um período atípico, resultante da seca extrema prolongada, os eventos pluviais contribuíram para um comportamento variável na produção de sedimentos. Nesse sentido, a amostragem realizada no estudo não foi suficiente para uma análise mais robusta. No entanto, os dados coletados permitiram indicar uma forte relação entre a variação do escoamento superficial e infiltração de água no solo na resposta da produção de sedimentos na bacia do Ribeirão do Gama.

Dessa maneira, o monitoramento contínuo torna-se fundamental para a melhor compreensão dos processos hidrossedimentológicos. Os resultados obtidos para Q_{ss} evidenciam a importância do monitoramento constante de bacias hidrográficas.

4. Conclusões

O monitoramento em eventos pluviais resulta em valores medidos que podem apresentar grande variação em relação à média diária medida, podendo superestimar os valores de deposição de sedimentos ao longo de todo

mês. É importante salientar que os dados obtidos em eventos pluviais requerem grande esforço logístico, no planejamento e na execução de técnicas em campo. No entanto, a compreensão da dinâmica da produção de sedimentos em eventos extremos é um dado essencial para a gestão de bacias hidrográficas. Logo, os dados coletados nessa pesquisa podem servir como subsídio a pesquisas futuras no âmbito da produção e deposição de sedimentos na Bacia do Ribeirão do Gama, bem como sua contribuição ao lago Paranoá.

Contribuições dos Autores: Renan Smith Louzada 1 - Conceptualização, metodologia, preparação dos dados, escrita do artigo, revisão; André Silva Tavares 2 - Conceptualização, metodologia, preparação dos dados, escrita do artigo, revisão; Rogério Uagoda 3 - Escrita do artigo, revisão, supervisão. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito".

Financiamento: Apoio de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Agradecimentos: Ao Acordo de Cooperação ANA/FUB - Processo n. 02501.001836/2014-10. A parceria ANA/UNB pelos equipamentos para monitoramento.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ANA, Agência Nacional de Águas. **HidroWeb: Sistemas de Informações Hidrológicas - Séries Históricas**. (Software). Disponível em <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/2016>>. Acesso em 28 de set. de 2017.
2. ANDRADE NETO, J. S.; RIGON, L. T.; TOLDO JR., E. E.; SCHETTINI, C. A. F. Suspended load of Guaíba fluvial system, RS, and its temporal variability. **Pesquisas em Geociências**, v. 39, n. 2, p 161-171, 2012.
3. ALMEIDA, I. K.; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, V. R.; SOBRINHO, T. A. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrografia. **Anais. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. ABRH, 2013.
4. BAKHMETEFF, B. A. **Hidraulica de los Canales**. Publisher: Editorial: AGUILAR, 1958.
5. BARUQUI, A. M.; FERNANDES, M. R. Práticas de conservação do solo. **Revista Informe Agropecuário**. Belo Horizonte: EPAMIG, v. 11, n. 128, p. 55-69, ago. 1985.
6. BRASIL. **LEI Nº 9.433, 8 de janeiro de 1997**. Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 15 de nov. de 2016.
7. CALDEIRA, D.; UAGODA, R. E. Mapeamento e caracterização de ambientes sedimentares recentes em encostas e fundo de vale. In: **Poster PIBIC-CNPq**, 2016.
8. CAMPOS, J. E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 1, p. 41-48, 2005. DOI: 10.25249/0375-7536.20043414148
9. CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, p. 372, 1994.
10. CHAGAS, D. S. **Relação entre concentração de sólidos suspensos e turbidez da água medida com sensor de retrospalhamento óptico**. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2015.
11. DUNNE, T. **Runoff Production in a Humid Area**. Agricultural Research Service. U. S. Department of Agriculture, p. 498, 1969.
12. DUNNE, T.; BLACK, R. D. An experimental investigation of runoff processes in permeable soils. **Water Research**, v. 6, n. 2, p. 478-490, 1970.
13. HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: SOPPER, W.E.; LULL, H.W., (Revised 2009) Ed. **Forest hydrology**, New York: Pergamon Press. **Progress in Physical Geography**, n. 33, v. 2, p. 288-293, 1967.
14. GUPTA, H.; CHAKRAPANI, G. J. Enrichment and fractionation of heavy metals in bed sediments of River Narmada, India. **Environ Monit Assess**, v. 141, p. 35-47, 2008. DOI: 10.1007/s10661-007-9876-y
15. KOGAN, F.; GUO, W. Strong 2015–2016 El Niño and implication to global ecosystems from space data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, issue 1, 2017. DOI: 10.1080/01431161.2016.1259679
16. LENZI, M. A.; MARCHI, L. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). **CATENA**, v. 39, p. 267-282, 2000. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00079-5
17. LIPORONI, L.M. **Estudo preliminar da qualidade da água do Lago Paranoá, Brasília-DF, utilizando um modelo de qualidade de água bidimensional**. 188p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, 2012.

18. MANZ, R. E.; SANTOS, do I.; PAULA, E. V. Monitoramento automático do transporte de sedimento em suspensão por meio do turbidímetro de alta performance. *Anais. IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*. Departamento de Geografia, UFPR, Curitiba-PR, p. 1-14, 2010.
19. MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. **Compartmentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal**. In: *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. Brasília. LEMA/SEMATEC/UnB. v. 1, parte II, p. 53, 1998.
20. MENEZES, P. H. B. J. **Avaliação dos efeitos das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na bacia do lago Paranoá**. Brasília-DF. 123f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
21. MIGUEL, R. C. A.; ROIG, H. L.; OLIVEIRA, E. S. Análise do processo de assoreamento no braço do Riacho Fundo, do Lago Paranoá – DF, utilizando técnicas de geoprocessamento e sedimentometria. *Anais. XV Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, p. 1-3, 2017.
22. MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; MAGNAGO, P.F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.15, n.12, p.1306–1313, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011001200013
23. MOURA, L. H. A.; BOAVENTURA, G. R.; PINELLI, M. P. A Qualidade de Água como Indicador de Uso e Ocupação do Solo: Bacia do Gama – Distrito Federal. *Quim. Nova*, Vol. 33, No. 1, 97-103, 2010. DOI: 10.1590/S0100-40422010000100018
24. NOVAS PINTO M.; CARNEIRO P. R. Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal. In: *Congr. Bras. de Geógrafos. Anais*. São Paulo. Livro II. v. 2, p. 190-213, 1984.
25. NOVAES PINTO, M. Superfícies de Aplainamento do Distrito Federal. *Rev. Bras. Geogr.*, v. 49, p. 9-26, 1987.
26. NOVAES PINTO, M. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: M. NOVAES PINTO (Org.) **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília. Ed. UnB, 2ed., p. 285-320. 1994.
27. PAZ, A. R. **Apostila da Disciplina de Hidrologia Aplicada**. ed. 1. Caxias do Sul: Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, p. 138, 2004.
28. PEREIRA, H. R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da Atmosfera na Primavera Austral Durante o El Niño de 2015/2016. *Rev. bras. meteorol.* 32 (2), 2017. DOI: 10.1590/0102-77863220011
29. PINHEIRO, E. A. R.; ARAÚJO, J. C.; FONTENELE, S. de B.; LOPES, J. W. B. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. *Water Resources and Irrigation Management*, v.2, n.2, p.103-110, 2013.
30. SANTOS, I., FILL, H.D., SUGAI, M.R.V.B., BUBA, H., KISHI, R.T., MARONE, E., LAUTERT, L.F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba, Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, p. 372, 2001.
31. SANTOS, R. F.; UAGODA, R. E. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama através do modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 3, p. 880-893, 2017. DOI: 10.5935/1984-2295.20170057
32. SAMMORI, T.; YUSOP, Z.; KASRAN, B.; NOGUCHI, S.; TANI, M. Suspended solids discharge from a small forested basin in the humid tropics. *Hydrological Processes*, v. 18, n. 4, p. 721-738, 2004. DOI: 10.1002/hyp.1361
33. SCHETTINI, C. A. F.; PEREIRA M. D.; SIEGLE, E.; MIRANDA, L. B.; SILVA, M. P. Residual fluxes of suspended sediment in a tidally dominated tropical estuary. *Cont. Shelf Res.*, v. 70, p. 27- 35, 2013. DOI: 10.1016/j.csr.2013.03.006
34. SEEGER, M.; ERREA, M. P.; BEGUERIA, S.; ARNAEZ, J.; MARTI, C.; GARCIA-RUIZ, J. M. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. *Journal of Hydrology*, v. 288, n. 3, p. 299-311, 2004. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.10.012
35. SICAD - Terracap, Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD), Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal (Terracap). **Mapas de bacias hidrográficas: Ribeirão do Gama. 2007**. Acesso em: <<https://www.terracap.df.gov.br/index.php/component/attached>>.
36. SPALEVIC, V. **Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje**. 260f. Doctoral Thesis - Faculty of Agriculture, University of Belgrade, Nemanjina, Serbia, 2011.
37. STEEGEN, A.; GOVERS, G.; NACHTERGAELE, J.; TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; POESEN, J. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium. *Geomorphology*. v. 33, v. 1, p. 25-36, 2000. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00108-7
38. VAN DIJK, P.; KWAAD, F. J. P. M. Runoff generation and soil erosion in small agricultural catchments with loess-derived soils. *Hydrological Processes*, v. 10, p. 1049-1059, 1996. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1049::AID-HYP410>3.0.CO;2
39. VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 303f. Tese (Engenharia Ambiental). Florianópolis, 2008.
40. VESTENA, L. R. Análise da dinâmica Hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, n. 21, v. 3, pp. 413-424, 2009. DOI: 10.1590/S1982-45132009000300014

41. WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**. Ed. 1-4, v.111, p. 89-106, 1989. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90254-0



obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.