



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

MARIA TATIANE LEONARDO CHAVES

**HIDRÁULICA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CONDICIONADOS
PELA VEGETAÇÃO DO RIACHO CACHOEIRA, BACIA
HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA DE PERNAMBUCO**

**RECIFE
2020**

Maria Tatiane Leonardo Chaves
Engenheira Ambiental

**Hidráulica e transporte de sedimentos condicionados pela vegetação do riacho
cachoeira, bacia hidrográfica Semiárida de Pernambuco**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Recursos Hídricos – Engenharia de Sedimentos.

Orientador: Prof. Dr. Genival Barros Júnior
Coorientadores: Prof. Dr. José Ramon Barros
Cantalice
Prof. Dr. Douglas Monteiro
Cavalcante

**Recife
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C512h Chaves, Maria Tatiane Leonardo Chaves
Hidráulica e transporte de sedimentos condicionados pela vegetação do riacho cachoeira, bacia hidrográfica Semiárida de Pernambuco / Maria Tatiane Leonardo Chaves Chaves. - 2020.
76 f. : il.

Orientador: Genival Barros Junior.
Coorientador: Jose Ramon Barros Cantalice Douglas Monteiro Cavalcante. Inclui referências e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2021.

1. Impactos ambientais. 2. Recursos hídricos. 3. Coeficiente de arrasto vegetal. 4. Vegetação aquática Semiárida. 5. Produção de sedimentos. I. Junior, Genival Barros, orient. II. Cantalice, José Ramon Barros Cantalice; Douglas Monteiro Cavalcante, coorient. III. Título

CDD 620.8

MARIA TATIANE LEONARDO CHAVES

**Hidráulica e transporte de sedimentos condicionados pela vegetação do riacho
cachoeira, bacia hidrográfica Semiárida de Pernambuco**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Recursos Hídricos – Engenharia de Sedimentos.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2020

Prof. Dr. Genival Barros Júnior
Presidente da banca e Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco/UAST

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco/UAST

Dr. Valdemir de Paula e Silva Júnior

AGRADECIMENTOS

A Deus, de onde veio toda minha força nos momentos mais difíceis.

A minha família por todo incentivo e apoio, em especial ao meu pai Sebastião Leonardo de Souza e minha Mãe Maria Socorro Batista Chaves de Souza, ao meu companheiro e coorientador Dr. Douglas Monteiro Cavalcante, por tanta dedicação em me auxiliar em cada etapa da jornada acadêmica e da vida.

A meu orientador Dr. Genival Barros Junior, pela orientação e apoio nas coletas dos dados; ao meu Coorientador Dr. José Ramon Barros Cantalice, pela orientação, dedicação e suporte para realização deste trabalho.

Ao meu querido amigo Paulo Ricardo Dantas, por me ouvir e me apoiar durante a graduação e o mestrado.

Aos colegas do Laboratório de Conservação do Solo e da Água.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, pelos conhecimentos compartilhados.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Eduardo Soares de Souza e Dr. Valdemir de Paula e Silva Júnior.

A comunidade rural do Sítio Cachoeira Grande do município de Tabira-PE, em especial a família Obede por todo apoio para que a realização dessa pesquisa fosse possível.

Ao órgão de fomento FACEPE, pela concessão da bolsa de estudo.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Departamento de Engenharia Ambiental.

Hidráulica e transporte de sedimentos condicionados pela vegetação do riacho cachoeira, bacia hidrográfica Semiárida de Pernambuco

RESUMO

Os estudos sobre a rugosidade hidráulica provocada pela vegetação, em sua maioria, são realizados em condições laboratoriais, sendo poucas as investigações realizadas em condições naturais, principalmente em bacias semiáridas. Dessa maneira, o objetivo desta pesquisa foi monitorar a hidráulica e o transporte de sedimentos condicionados pela vegetação do riacho Cachoeira, bacia hidrográfica Semiárida de Pernambuco. Durante o período chuvoso de 2019, foram realizadas quinze campanhas de medições direta à vau, seguindo a metodologia de amostragem por igual incremento de largura (IIL), onde determinou-se a produção de sedimentos total (Y_t), a resistência gerada pela espécie *Ipomoea pescaprae* (Salsa de praia) por meio do coeficiente (C_D) e da força (τ_{veg}) de arraste vegetal, bem como a influência destes parâmetros no transporte de sedimentos da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira. De acordo com os números de Reynolds (R_e) e Froude (F_r) o regime de escoamento foi classificado como turbulento fluvial. Os valores médios de raio hidráulico (R_h), velocidade média (U) e vazão (Q_t) na seção transversal foram de 0,22 m, 9,24 m s⁻¹ e 0,20 m³ s⁻¹, respectivamente. Na margem direita, a partir da relação $U_m \times S_r$ foram encontradas as zonas de cisalhamento ($S_r > 1,0$) e de fluxo livre ($0,32 < S_r < 1,0$), além da zona de transição entre o comportamento submerso e emerso da vegetação ao fluxo ($S_r = 1$). Na margem esquerda, a vegetação apresentou-se emersa durante os quinze dias de campanha, ou seja, com relação de submersão abaixo de um. O riacho Cachoeira mostra um padrão de distribuição de velocidade e vazão típicos de inundações canalizadas, após eventos de precipitação de picos múltiplos em curto espaço de tempo, bem como, dependente da geometria e presença da vegetação na seção transversal. A relação granulométrica dos sedimentos amostrados e coletados no leito e em banco de sedimentos avaliada através de análise de cluster, expressam a relação do transporte de sedimentos do leito com a redução do fluxo e consequente capacidade de transporte. O efeito da resistência hidráulica gerado por *Ipomoea pescaprae* (Salsa de praia) na seção transversal do riacho Cachoeira bem observado pelo modelo matemático aplicado de Wu Fu-Chun et al. (1999) (C_D Wu), com ajustes de regressão acima de 90% para as relações entre os parâmetros de rugosidade avaliados. As descargas sólidas em suspensão e de fundo do riacho Cachoeira apresentaram distribuição em função da geometria e presença da vegetação na seção transversal, já que, as curvas-chave com as descargas líquida não apresentaram bom ajustes de regressão. Este trabalho contribuiu para o conhecimento da variação temporal do transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica semiárida, bem como os métodos mais adequados para avaliar a rugosidade hidráulica ao escoamento provocada pela vegetação presente na seção transversal do riacho Cachoeira. Recomenda-se a continuidade do trabalho na seção transversal e em outros pontos possíveis de amostragem, visando obter maiores informações para uma série de longos dados, para futuras simulações sedimentométricas no riacho Cachoeira, Tabira-PE.

Palavras-chave: impactos ambientais, recursos hídricos, coeficiente de arrasto vegetal, vegetação aquática semiárida, produção de sedimentos.

Hydraulics and sediment transport conditioned by the vegetation of the waterfall stream, Pernambuco's semiarid watershed

ABSTRACT

Many researchers have studied plant roughness in laboratory conditions, however, few studies on the effect of vegetation on hydrosedimentometric characteristics in semiarid watershed are still few. Thus, the main objective of this research was to monitor the hydraulics and sediment transport conditioned by the vegetation of the Cachoeira stream, in the semiarid watershed of Pernambuco. During the rainy season of 2019, direct ford measurement campaigns were carried out following the sampling methodology for an equal width increase (IIL), to determine the total sediment production (Y_t). The resistance generated by the species *Ipomoea pescaprae* (Salsa de praia) by means of the coefficient (C_D) and the vegetation drag force (τ_{veg}), as well as the influence these parameters in the transport of sediments from the watershed of the Cachoeira stream. Reynolds (R_e) and Froud (F_r) classified the flow regime of the Cachoeira stream as turbulent river. According to the Reynolds (R_e) and Froude (F_r) numbers, the flow regime was classified as turbulent fluvial. The average values of hydraulic radius (R_h), average speed (U_m) and flow (Q_i) in the cross section were 0.22 m, 9.24 m s^{-1} and $0.20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectively. On the right margin, from the $U_m \times S_r$ relationship, the shear zones ($S_r > 1.0$) and free flow ($0.32 < S_r < 1.0$) were found, in addition to the transition zone between the submerged and emerged behavior of the vegetation to flow ($S_r = 1$). On the left bank, the vegetation was immersed during the fifteen days of the campaign, that is, with a submersion ratio below one. The Cachoeira stream shows a pattern of velocity and flow distribution typical of channeled floods, after multiple peak precipitation events in a short period of time, as well as, depending on the geometry and presence of vegetation in the cross section. The granulometric relationship of the sediments sampled and collected in the bed and in a sediment bank evaluated through cluster analysis, express the relationship of sediment transport from the bed to the reduction in flow and consequent transport capacity. The effect of the hydraulic resistance generated by *Ipomoea pescaprae* (Salsa de praia) in the cross section of the Cachoeira stream, well observed by the applied mathematical model of Wu Fu-Chun et al. (1999) (CD_{Wu}), with regression adjustments above 90% for the relationships between the evaluated roughness parameters. The suspended and discharged solid discharges of the Cachoeira stream presented distribution according to the geometry and presence of vegetation in the cross section, since the key curves with the liquid discharges did not present good regression adjustments. This work contributed to the knowledge of the temporal variation of sediment transport in a semi-arid watershed, as well as the most appropriate methods to assess the hydraulic roughness to the flow caused by the vegetation present in the cross section of the Cachoeira stream. It is recommended to continue the work in the cross section and in other possible sampling points, in order to obtain more information for a series of long data, for future sedimentometric simulations in the Cachoeira, Tabira-PE stream.

Keywords: environmental impacts, water resources, vegetation drag coefficient, semiarid aquatic vegetation, sediment production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Características geométricas da vegetação.....	28
Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, Pernambuco, Brasil.....	29
Figura 3 - Gráfico da Precipitação Acumulada Média Mensal (PAMM) referente ao período de 1962 a 2019.....	31
Figura 4 - Seção de monitoramento no riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	32
Figura 5 - Divisão da seção transversal em segmentos igualmente espaçados.....	33
Figura 6 - Levantamento batimétrico nas verticais igualmente espaçadas da seção transversal.	34
Figura 7 - Segmentos da área da seção transversal.	34
Figura 8 - Medição da velocidade do escoamento com micromolinetete fluviométrico.	35
Figura 9 - Coleta do sedimento em suspensão, com uso do amostrador DH-48 (Hidromec®).	38
Figura 10 - Coleta da descarga sólida do leito utilizando o amostrador US BLH – 84.	40
Figura 11 - a) agitador eletromagnético (modelo Viatest VSM 200); b) e pesagem das peneiras em balança semi analítica.	42
Figura 12 - Hietograma da cidade de Tabira-PE, calculado para o período de 1962 a 2019, a partir dos dados mensais pluviométricos gerados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC-PE).....	44
Figura 13 - Hietograma da cidade de Tabira para o período o ano de 2019, a partir dos dados mensais pluviométricos gerados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC-PE).	45
Figura 14 - Relação entre a seção média, velocidade (a) e vazão (b) em cada vertical, na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Detalhes da abreviação: P = profundidade; U = velocidade e Ql = vazão.	48
Figura 15 - Distribuição granulométrica das 15 coletas de sedimentos de fundo do riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	51
Figura 16 - Distribuição granulométrica do material coletado do leito do riacho Cachoeira, Tabira-PE. (1) amostra coletada nas margens do riacho; (2) amostra coletada em um banco de sedimentos presente no curso d'água à jusante da seção transversal.	51
Figura 17 - Média da distribuição granulométrica das coletas e das amostras do leito do Riacho Cachoeira, Tabira-PE. (1) amostra coletada nas margens do riacho; (2) amostra coletada em um banco de sedimentos presente no curso d'água à jusante da seção transversal.....	52

Figura 18 - Dendrograma com grupos de coletas realizadas na bacia do riacho Cachoeira, formado com base na distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo.	53
Figura 19 - Relação entre vazão (QI) e coeficiente de uniformidade (CU) das partículas.....	53
Figura 20 - Relação de submersão (S_r) – h/H_v (profundidade do fluxo/altura média da vegetação) com a velocidade média do escoamento (U_m) das margens direita (a) e esquerda (b) do riacho Cachoeira sob arranjo vegetal natural da espécie <i>Ipomoea pes-caprae</i>	55
Figura 21 - Coeficiente de arraste vegetal (CD) em relação a velocidade média do escoamento (U_m) nas margens direita (a) e esquerda (b) da seção transversal do riacho Cachoeira.	60
Figura 22 - Tensão de arraste vegetal (τ_{veg}) em relação a velocidade média do escoamento (U_m) nas margens direita (a) e esquerda (b) da seção transversal do riacho Cachoeira.	62
Figura 23 - Relação entre a seção média, descarga sólida em suspensão (a) e descarga sólida de fundo (b) em cada vertical, na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	63
Figura 24 - Curvas de classificação profundidade (P) - descarga líquida (QI) do riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis morfométricas da bacia do riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	30
Tabela 2 - Classes de declividade e relevo da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, Tabira-PE.	31
Tabela 3 - Posição do micromolinete na vertical em relação à profundidade.....	35
Tabela 4 - Características da espécie vegetal presente no leito da seção transversal estudada.	37
Tabela 5 - Variáveis hidráulicas e geométricas na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	47
Tabela 6 - Diâmetros característicos das amostras de sedimento de fundo do riacho Cachoeira, Tabira-PE.....	50
Tabela 7 - Variáveis de resistência ao escoamento na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE, nas condições de submersão e emersão de <i>Ipomoea pes-caprae</i> (Salsa de praia)...	58
Tabela 8 - Correlação entre variáveis hidráulicas, descarga sólida e rugosidade vegetal.....	60
Tabela 9 - Variáveis de transporte e produção de sedimentos das campanhas de medição... ..	64

LISTA DE SÍMBOLOS

	Definição	Unidade
U_m	Velocidade média do fluxo	$m\ s^{-1}$
ad	Densidade da vegetação	(adm)
ρ	Peso específico da água	$N\ m^{-3}$
A	Área	m^2
A_F	Área frontal da haste	m^2
A_i	Área de influência de cada vertical	m^2
B	Largura da seção transversal ocupada pela vegetação	M
BC	Coefficiente box	(adm)
C_D	Coefficiente de arraste vegetal	Wu, Fu-Chun et al. (1999): m^{-1}
C_{DE}	Coefficiente de arraste vegetal (emersa)	m^{-1}
C_{DS}	Coefficiente de arraste vegetal (submersa)	m^{-1}
C_{SS}	Concentração de sedimento em suspensão na vertical Amostrada	$mg\ L^{-1}$
C_{SSi}	Concentração de sedimento em suspensão de cada subseção vertical	$mg\ L^{-1}$
C_u	Coefficiente de uniformidade	(adm)
C_c	Coefficiente de curvatura	(adm)
CN	Curva número	(adm)
D	Diâmetro da haste	m
d_{10}	Diâmetro característico para o qual 10% do material do leito são mais finos	mm
d_{15}	Diâmetro característico para o qual 15% do material do leito são mais finos	mm
d_{30}	Diâmetro característico para o qual 30% do material do leito são mais finos	mm
d_{50}	Diâmetro característico para o qual 50% do material do leito são mais finos	mm
d_{65}	Diâmetro característico para o qual 65% do material do leito são mais finos	mm
d_{90}	Diâmetro característico para o qual 90% do material do leito são mais finos	mm
E	Comprimento acamado das hastes	m
f	Fator de atrito de Darcy - Weisbach	adm
Fr	Número de Froude	adm
g	Aceleração gravitacional	$m\ s^{-1}$
H	Altura da lâmina de escoamento	m

h_s	Altura da planta acamada	m
H_v	Altura da planta com ausência de fluxo	m
H_{ef}	Chuva efetiva	mm
L	Largura da seção transversal	m
K	Constante de proporcionalidade	adm
M_{sec}	Massa seca de sedimentos de fundo coletadas nas verticais seco na estufa	mg
N	Número de hastes	
n	Coefficiente de Manning	$m^{-1/3} s$
ρ_{veg}	Densidade foliar	adm
p	Altura na vertical em que a velocidade foi amostrada	m
P	profundidade média do escoamento	m
P_m	Perímetro molhado da seção transversal	m
P_i	Precipitação do evento	mm
Q_l	Descarga líquida	$m^3 s^{-1}$
Q_i	Descarga líquida da respectiva subseção vertical	$m^3 s^{-1}$
Q_{ss}	Descarga líquida em suspensão	$t dia^{-1}$
Q_{sf}	Descarga sólida de fundo	$t dia^{-1}$
Re	Número de Reynolds	adm
Re_{planta}	Número de Reynolds de planta	adm
R_H	Raio hidráulico	m
S	Declividade média do canal	$m m^{-1}$
S_f	Fator de correção para o declive	adm
S_r	Relação de submersão	adm
$S_{máx}$	Máxima Infiltração	mm
T	Temperatura da água	$^{\circ}C$
$T_{amostragem}$	Tempo de amostragem	S
u^*	Velocidade crítica de cisalhamento	$m s^{-1}$
U_i	Velocidade média do escoamento de cada subseção	$m s^{-1}$
U_t	Razão ou velocidade de trânsito	$m s^{-1}$
ν	Viscosidade cinemática da água	$m^2 s^{-1}$
$V_{amostrado}$	Volume da mistura de água e sedimento	L
X	Número de dias que houve escoamento	Dia
W	Largura do bocal do amostrador	M
Y_{ss}	Produção de sedimento em suspensão	$t km^{-2} ano^{-1}$
Y_{sf}	Produção de sedimento de fundo	$t km^{-2} ano^{-1}$
Y_t	Produção total de sedimento	$t km^{-2} ano^{-1}$
Y	Altura da vegetação	m
ΔS	Espaçamento vegetal	m

T	Tensão de cisalhamento total do canal	N m^{-2}
τ_{veg}	Tensão de arraste vegetal	N m^{-3}
τ_{vegE}	Tensão de arraste vegetal (emersa)	N
τ_{vegS}	Tensão de arraste vegetal (submersa)	N

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	Bacia hidrográfica	19
3.2	Produção e transporte de sedimentos fluviais	21
3.3	Sedimento suspenso	22
3.4	Sedimento de fundo	23
3.5	Produção de sedimentos em bacias hidrográficas de ambientes áridos e semiáridos.....	24
3.6	Vegetação em canais naturais	26
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	Área de estudo	28
4.2	Campanhas de monitoramento e escolha da seção transversal	30
4.3	Monitoramento hidrossedimentométrico.....	31
4.4	Determinação das características hidráulicas do escoamento	35
4.5	Parâmetros vegetativos e rugosidade hidráulica gerada pela vegetação	36
4.6	Determinação da descarga sólida total (Q_{ST}) e da produção de sedimentos (Y)	38
4.7	Determinação dos diâmetros característicos: d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{90}	40
4.8	Análise Estatística.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Regime pluviométrico na cidade de Tabira-PE.....	44
5.2	Caraterísticas hidráulicas e geométricas na seção transversal do riacho Cachoeira.....	45

5.3	Caracterização granulométrica do sedimento de fundo transportado e do sedimento superficial do leito	49
5.4	Resistência hidráulica da vegetação e transporte de sedimentos do riacho Cachoeira.....	54
5.5	Transporte de sedimento suspenso e de fundo e curvas-chave do riacho Cachoeira.....	62
6	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, muitas pesquisas são realizadas sobre as diversas fontes e processos erosivos em grandes bacias hidrográficas, mas poucos estudos são realizados sobre o aporte de sedimentos, principalmente em bacias semiáridas. Em todo o mundo, as regiões Semiáridas correspondem a 17,7% de toda a Terra (UNEP, 1997). O Semiárido brasileiro representa 11% do território nacional (GIONGO et al., 2011), no qual está localizado o Bioma Caatinga, cujo os solos estão sob grande restrição hídrica.

Os rios de ambientes áridos e semiáridos possuem uma variabilidade considerável de suas características morfológicas. A variabilidade de formas e a ausência de um conjunto de características específicas dificulta o processo de caracterização generalizada desses rios (POWELL, 2009). Pode-se afirmar segundo Souza, Correa e Brierley (2016), que o manejo dos recursos hídricos se torna mais complexo em áreas de baixa pluviosidade quando comparado as áreas úmidas, fato esse relacionado a grande presença de rios intermitentes nessas regiões. Devido a essa característica regional faz-se necessário o uso de redes de infraestrutura, incluindo barragens para o abastecimento das populações dessas localidades, entretanto, como consequência do represamento, os sedimentos retidos podem contribuir para o processo erosivo à jusante.

A produção de sedimentos é a diferença entre a erosão bruta e a quantidade de material que ficou depositado e não foi removido da bacia de drenagem (WALLING, 1990). Ou seja, a quantidade de solo erodido que ultrapassa o exutório de uma determinada bacia hidrográfica, representando apenas uma parcela do total de sedimentos produzidos em uma bacia em decorrência dos processos erosivos atuantes. A magnitude da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica depende da intensidade da erosividade da chuva, dos processos de transferência e propagação para a calha fluvial (GOMES et al., 2006).

Quando se atinge a insuficiência dos corpos receptores em transportar sedimentos, estes se depositam em canais de irrigação, rios, estuários, reservatórios, portos, reduzindo sua capacidade hidráulica (SOUZA; MERTEN, 2006). Segundo Cantalice et al. (2013), cada componente da produção de sedimentos depende de diversos fatores, por exemplo, o ambiente, a natureza e a distribuição das fontes de sedimentos, com também, os caminhos e processos pelos quais os sedimentos são entregues ao fluxo. A ocupação inadequada do solo pela urbanização sem planejamento, o uso agrícola sem práticas conservacionistas e a retirada da vegetação presente nos corpos hídricos, principalmente nos solos pouco profundos facilmente

encontrados nas regiões Semiáridas, aceleram os processos erosivos na bacia hidrográfica, aumentando a produção de sedimentos nos rios, além dos danos a qualidade da água.

Para uma gestão eficiente dos recursos naturais em especial dos recursos hídricos, faz-se necessário um monitoramento constante para entender as características das vazões, escoamento e sazonalidade dos rios, fatores que estão relacionados ao regime pluviométrico de cada bacia hidrográfica (MOULAI et al., 2013). A quantificação da produção de sedimentos é importante para o planejamento conservacionista do solo e da água, análise da sedimentação no armazenamento de água, estudo de mudanças na calha fluvial e planejamento de projetos agrícolas, sendo assim um importante instrumento na gestão de bacias hidrográficas (SINGH et al., 2008).

O aumento da taxa de sedimento transportado para os corpos d'água (rios e reservatórios) prejudica a qualidade das águas superficiais, além de servir como veículos a outros poluentes, que se encontram adsorvidos a estes. A presença da vegetação nos cursos d'água desempenha relevante papel no transporte e deposição de sedimentos, causando aumento da resistência ao fluxo, reduzindo a velocidade de escoamento em nível local, afetando assim a dinâmica dos processos erosivos (LIU; ZENG, 2016).

Historicamente, a resistência ao escoamento em rios sempre foi associada a rugosidade provocada pelo próprio leito dos canais. A partir dos estudos de Wu et al. (1999) verificou-se a importância da vegetação nas perdas de energia no fluxo dos rios. Estes autores desenvolveram metodologias para determinar o coeficiente de arraste vegetal (C_D) e a tensão de cisalhamento provocada pela vegetação (τ_{veg}), variáveis de resistência ao fluxo, assim como Wang et al. (2015) quando avaliaram os efeitos das macrófitas aquáticas nas características do escoamento.

Diversos estudos são realizados ao redor do mundo investigando a influência da vegetação na dinâmica dos rios. A grande maioria desses estudos são realizados em laboratórios com ambientes controlados, ou seja, com plantas e canais artificiais (ZHAO et al. 2016, WANG et al. 2017, SERIO et al., 2018 e WANG et al., 2019). A resistência ao fluxo exercida pela vegetação varia de acordo com a forma da planta, nesse aspecto a rigidez da vegetação, a quantidade de plantas por área, a distribuição espacial e o grau de submersão (vegetação emersa ou submersa), são fatores determinantes (Cantalice et al., 2015).

A produção de sedimentos é resultado da interação de diferentes processos que atuam ao longo da bacia hidrográfica. A quantificação da contribuição de cada um desses processos é muito complexa, pois envolve a medição ou estimativa de um grande número de variáveis (SIMONI et al., 2012). Por essa razão, ainda são poucos os trabalhos publicados sobre transporte de sedimentos em rios em zonas semiáridas. Desse modo, torna-se necessário o

monitoramento hidrossedimentológico em conjunto com os efeitos da vegetação aquática em rios intermitentes na atual estratégia de preservação dos recursos hídricos em regiões Semiáridas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- ✓ Monitorar a hidráulica e o transporte de sedimento condicionados pela vegetação do riacho Cachoeira, bacia hidrográfica Semiárida de Pernambuco.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Monitorar as descargas líquidas e sólidas por meio de campanhas de medição direta na bacia do riacho Cachoeira;
- ✓ Determinar a rugosidade hidráulica gerada pela vegetação flexível nas condições de submersão e emersão, na seção transversal do riacho Cachoeira;
- ✓ Verificar os efeitos dos parâmetros de rugosidade hidráulica na retenção ou redução do transporte de sedimentos em suspensão e de fundo na seção transversal do riacho Cachoeira.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Bacia hidrográfica

Bacia hidrográfica pode ser definida como uma porção da superfície terrestre que capta a precipitação e drena toda a água até o exutório, sendo fundamental no estudo do ciclo hidrológico. A bacia hidrográfica também pode ser considerada um sistema físico, onde o balanço líquido hidrológico, decorrente da entrada de água proveniente da precipitação e saída por meio do escoamento superficial, resultante das perdas decorrentes dos volumes infiltrados, evaporados e transpirados ao longo da área da bacia (TUCCI, 1993).

A Lei Federal nº 9.433/97, que instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, define bacia hidrográfica como unidade territorial de atuação das políticas de recursos hídricos, planejamento e gerenciamento; considerando a água como um bem de domínio público, recurso natural limitado e dotado de valor econômico, que tem uso prioritário para o consumo humano e dessedentação animal em caso de escassez. Sendo assim, tornando sua gestão voltada para o uso múltiplo, visando ser descentralizada e participativa.

Para a gestão dos recursos naturais e a implementação de políticas públicas, a bacia hidrográfica é considerada ideal, por ser um sistema natural bem definido, composta por uma topografia bem drenada pelos cursos de água e seus afluentes (SILVA; FERNANDES; IZIPPATO, 2008); bem como dentro das porções da superfície terrestre onde ocorrem o desenvolvimento das atividades antrópicas e naturais, podendo-se destacar principalmente as interações e impactos sobre os recursos naturais (HOLLANDA et al., 2015).

As bacias hidrográficas são bastante atrativas para vários tipos de atividades, principalmente pelos recursos presentes em sua área. Nesse contexto, as disponibilidades desses recursos naturais estimulam intensa ocupação dessas áreas, tornando de grande importância estudos voltados para tais porções terrestres, permitindo analisar os diferentes processos que ocorrem em seu interior (ALBUQUERQUE, 2012).

Segundo Aju (2017), bacias hidrográficas ricas em florestas são elementos de vital importância tanto para usos ecológicos, como para usos econômicos e geração de energia, principalmente a energia hidroelétrica. Do ponto de vista ambiental, esse tipo de bacia quando utilizada de forma adequada são responsáveis por manter o equilíbrio ecológico, pois, podem controlar os efeitos das mudanças climáticas em escala local. Essa contribuição é mais significativa nas áreas florestadas da bacia, ajudando na manutenção do ciclo hidrológico e podendo manter a qualidade da água. A vegetação diminui os processos erosivos, reduzindo

assim a produção de sedimentos e filtrando poluentes que possam eventualmente ser carreados pelo escoamento superficial (FAO, 2008).

Dentro das bacias existem sistemas menores que podem ser chamados de microbacias hidrográficas ou sub-bacias hidrográficas. Segundo Leonardo (2003) as microbacias são sistemas naturais abertos e assim como as bacias hidrográficas podem ser vistas como unidade ecossistêmica da paisagem, no que se refere à integração dos ciclos naturais de energia, nutriente e da água. Para o autor, as definições de microbacia e de bacia hidrográfica são praticamente as mesmas, diferindo no fato da microbacia encontrar-se localizada dentro de uma bacia hidrográfica principal e por possuir área reduzida, ser mais sensível aos efeitos do clima e de mudanças no uso e ocupação do solo, sendo assim mais susceptível a degradação.

Segundo Attanasio (2004), as microbacias são dotadas de características ecológicas, geomorfológicas e sociais integradoras, o que permite uma abordagem holística e participativa, envolvendo estudos interdisciplinares para o estabelecimento de formas de desenvolvimento sustentável inerentes ao local ou região onde foram implementadas. O autor ainda afirma, que esta visão integrada por parte dos planejadores, assim como dos produtores rurais, enfatiza a lógica da interligação biofísica entre as ações desenvolvidas na microbacia e as reações do sistema, exemplificando que as alterações realizadas por um agricultor, nas práticas de manejo em determinadas áreas da microbacia, podem ocasionar melhoria ou comprometimento da qualidade da água.

3.2 Produção e transporte de sedimentos fluviais

As perdas de solo ocorridas pelos processos erosivos dentro de uma bacia hidrográfica, acarretam na produção de sedimentos. Ding e Richards (2009) destacam que a produção de sedimentos envolve múltiplas fontes relacionadas a diversos processos diferentes que interagem entre si, por exemplo, erosão de ravinas, movimento de massa e erosão de margens de rios. A avaliação da produção de sedimentos descreve e quantifica a distribuição espacial e temporal dos sedimentos erodidos, armazenados e transferidos para dentro de uma bacia de drenagem. Os rios e suas cargas de sedimentos são componentes centrais do balanço líquido de sedimentos das bacias e fornecem informações úteis sobre os efeitos das intervenções humanas, como o assoreamento de reservatórios e represas (PIQUÉ et al., 2017).

Define-se sedimento como a partícula derivada da rocha ou de materiais biológicos por processos físicos ou químicos, que é transportada pela água ou pelo vento do lugar de origem para os rios e locais de deposição. Os processos responsáveis pela produção de sedimentos são

muito complexos, abrangendo desde o início do processo erosivo, o deslocamento das partículas por enxurradas ou outros meios, transporte do sedimento nos cursos d'água, deposição do sedimento na calha fluvial, lagos e reservatórios, até a sua compactação (CARVALHO, 2008). Em concordância, Zhang et al. (2017) destacam que a água é o agente natural que desencadeia diversos processos ativos, como a erosão hídrica, na qual as perdas de solo conduzem a inúmeros problemas já mencionados.

Segundo Li et al. (2017) as interações ativas entre o fluxo, quantidade e qualidade dos sedimentos produzidos podem modificar a morfologia das calhas fluviais e conseqüentemente o seu fluxo. Fisicamente, o fluxo de sedimentos fluviais sobre leitos erodíveis, envolve interações entre as partículas, com troca de massa entre o fluxo e o leito do rio. Estudos sobre fluxos fluviais de sedimentos sobre leitos erodíveis são essenciais não apenas para a prática de engenharia fluvial, como também para o gerenciamento de risco de inundação e proteção ambiental.

A erosão nas bacias hidrográficas está relacionada a vários fatores como os eventos de precipitação e variação na superfície da bacia, além do uso da terra, tipo de solo e topografia. As condições edafoclimáticas em uma bacia hidrográfica não variam significativamente no curto prazo, o que significa que as atividades antrópicas, por meio de mudanças no uso da terra, são as principais causas da aceleração do processo erosivo nas bacias hidrográficas (ZHANG et al., 2017). Os sedimentos também são resultantes da erosão causada pelo próprio fluxo do rio e do transporte advectivo subsequente, com partículas mobilizadas à rede fluvial (ZARFL; LUCÍA, 2018). O termo conectividade de sedimentos vem sendo utilizado para definir o desprendimento e transporte de sedimentos de forma integrada. Segundo Mahoney, Fox e Aamery (2018) os estudos voltados para a conectividade têm como objetivo identificar a configuração da bacia hidrográfica e seu papel dentro do ciclo de sedimentos, incluindo os locais preferenciais de infiltração de águas superficiais, como os sumidouros, as vias de descolamento e transporte de sedimentos e as características morfológicas durante eventos hidrológicos.

Os sedimentos fluviais são divididos em sedimentos de fundo (Bedload), cuja as partículas de granulometria grosseira e pesados, movem-se em contato como leito; e os sedimentos em suspensão (Suspended load), cuja as partículas de granulometria fina (silte e argila), mais leves, movem-se direcionadas para cima de acordo com as correntes turbulentas (HASSAN et al., 2005). Os sedimentos ao mesmo tempo em que ajudam a definir a morfologia dos rios, transportam os nutrientes para as planícies de inundação e formam habitats para os

organismos. Além disso, desempenham importante papel no transporte de poluentes absorvidos principalmente por partículas em suspensão.

Os sedimentos em suspensão podem causar a degradação da qualidade da água, em especial para uso humano. A alta turbidez pode impedir a penetração da luz e calor, reduzindo a atividade fotossintética e alterando a vida aquática. Os sedimentos de fundo podem prejudicar a navegação ou elevar o nível de água provocando enchentes. No entanto, os sedimentos não ocasionam apenas malefícios aos corpos hídricos, existem efeitos positivos relacionados, por exemplo, ao transporte de nutrientes, microrganismos e matéria orgânica que são essenciais para manutenção dos ecossistemas aquáticos (NOGUEIRA; CABRAL; OLIVEIRA, 2012).

3.3 Sedimento suspenso

Os sedimentos em suspensão são as partículas de granulometria fina (silte e argila), transportadas pela correnteza e que se movem praticamente com a mesma velocidade da corrente (CARVALHO, 2008). Os sedimentos em suspensão representam as maiores taxas em contribuição de sedimentos do continente para os oceanos, desempenhando papéis críticos na ciclagem biogeoquímica do carbono, energia e nutrientes. Além disso, são os principais meios de transporte para contaminantes hidrofóbicos e metais pesados através de sistemas aquáticos. Devido a tais características o sedimento suspenso fluvial é considerado de grande importância ambiental, cujos estudos sobre o caráter, abundância e carga são de grande relevância (GRAY, 2018).

O transporte de sedimentos em suspensão foi tipicamente medido por meio de amostragem direta até a década de 1980, a partir desse período a utilização de sensores ópticos de turbidez também foi aplicada. A vantagem da medição pela turbidez, são as estimativas de cargas de sedimentos em comparação com os procedimentos estatísticos que devem ser usados quando apenas amostras discretas estiverem disponíveis. Entretanto, os registros de turbidez exigem calibração individual em *in situ*, onde vários fatores podem afetar as leituras dos sensores (DOWNING, 2006).

Em rios de menor porte, a composição do sedimento determina muitos fatores do habitat. Partículas finas podem acabar bloqueando espaços porosos em sedimentos de areia e cascalho, reduzindo a troca de oxigênio, nutrientes e matéria orgânica. No entanto, em sistemas estuarinos, partículas finas são essenciais na manutenção dos mangues, sendo determinantes nos ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrogênio e metais residuais (WOLANSKI; ELLIOTT, 2007).

3.4 Sedimento de fundo

Os sedimentos de fundo são divididos em dois tipos de acordo com o processo de transporte a que são submetidos (CARVALHO, 2008). O primeiro tipo, a carga sólida de arrasto, onde as partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água estão em contato com o leito, e o segundo, carga sólida saltante, onde as partículas pulam/saltam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.

A medição do sedimento de fundo tem numerosas dificuldades técnicas e os dados são escassos e descontínuos. Devido as deficiências práticas de medição, várias equações foram desenvolvidas para estimar a carga de fundo, a maioria delas derivadas de canais experimentais (PIQUÉ et al., 2017). O transporte de sedimentos de fundo não é contínuo e geralmente ocorre durante as inundações, sendo um processo importante na formação e evolução das paisagens fluviais, além de determinantes para a atividade dos rios, como o transporte fluvial (BATALLA; VERICAT, 2011). A baixa quantidade ou o excedente de carga de leito, pode ser influenciada negativamente pela ação antrópica, conduzindo aos problemas fluviais associados ao transporte desses sedimentos. Como o transporte de sedimento de fundo apresenta uma variabilidade espaço-temporal significativa (EINSTEIN, 1937), a escolha do sistema de medição mais preciso é muitas vezes difícil e depende de muitos parâmetros.

As medições em campo são dificultadas, devido principalmente à grande variabilidade temporal e espacial, além dos diâmetros variados de material de fundo, o que torna o procedimento de amostragem dispendioso e economicamente inviável em alguns casos, ocasionando na escassez de produções científicas (ZAPICO et al., 2017). Os métodos de monitoramento dos sedimentos de fundo podem ser divididos em métodos direto e indiretos. Os métodos diretos são usados há décadas através de amostradores manuais, suspensos ou presos no leito dos rios, sendo os sedimentos coletado em uma saca. Devido ao seu baixo custo relativo, ampla gama de experiência e fácil manuseio, os métodos diretos são geralmente preferidos para a amostragem (HABERSACK et al., 2017). O método indireto consiste na utilização de equações estimativas, levando-se em consideração que 90-95% de todo o sedimento produzido consiste em sedimento em suspensão e 5-10% corresponde ao sedimento de fundo.

Em ambientes semiáridos os processos fluviais são particularmente complexos, devido à incerteza relacionada à frequência e magnitude dos eventos de escoamento e devido às taxas

associadas de erosão e transporte. Além disso, a alta variabilidade pluviométrica pode levar, ocasionalmente, a grandes contribuições de sedimentos de fundo (MILLARES et al., 2014).

3.5 Produção de sedimentos em bacias hidrográficas de ambientes áridos e semiáridos

A região Semiárida do Brasil possui uma área de aproximadamente 980.133,079 km² (INSA, 2012), representando cerca de 92,97% do território nordestino. Suas peculiaridades ambientais estão marcadas pelo clima determinado pelos sistemas atmosféricos, caracterizando totais pluviométricos que variam ente 300 a 800 mm anuais, estando seu período chuvoso concentrado nos primeiros meses do primeiro semestre. As condições climáticas de semiaridez associadas a impermeabilidade das rochas cristalinas passam há condicionar um lento processo de formação dos solos, com solos jovens, rasos e pouco intemperizados, característica marcante dos sertões (CRISPIM et al., 2016).

O bioma nativo e predominante na região Semiárida brasileira é a Caatinga, na qual, a vegetação apresenta pouca cobertura vegetal, favorecendo a susceptibilidade dos solos a erosão. Nesse aspecto, as curtas e intensas precipitações nessa região ocasionam no desprendimento das partículas da camada superficial do solo, sendo estas transportadas até o leito dos rios e córregos intermitentes. A magnitude desses eventos é intensificada por condições de uso e ocupação do solo nas bacias semiáridas (SANTOS, 2009).

Vestana (2008) discorrendo sobre os processos hidrossedimentológicos, relata que esses processos estão diretamente relacionados ao ciclo hidrológico e apresentam as etapas de desagregação, transporte e deposição de partículas sólidas presentes na superfície da bacia. Nesse ciclo, as partículas resultantes dos processos erosivos findam sendo transportados pela ação das águas do escoamento superficial; o transporte também é influenciado pela topografia do local e pela granulometria das partículas, além do movimento por fluxo de massa, por rolamento e arraste da partícula, ou por suspensão.

O comportamento hidrológico em ambientes áridos e semiáridos apresentam características distintas em relação aos ambientes úmidos, mais especificamente pela variabilidade climática, com precipitação baixa e má distribuída. Nos ambientes mais secos, o escoamento superficial representa a contribuição de massa e energia para a rede de drenagem e também o trabalho geomorfológico do escoamento, que está ligado aos processos fluviais pelo fornecimento de sedimentos (SOUZA; ALMEIDA, 2015), além disso, as características do fluxo e da carga sedimentar dos canais, aliadas com as características do substrato geológico e

estado da vegetação do vale fluvial, vão controlar as formas desenvolvidas nos canais e adjacências, formando um complexo de formas particulares, não exclusivas, das terras secas.

Outro aspecto importante é o manejo agrícola adotado baseado em culturas temporárias, onde inicialmente os solos encontram-se descobertos, ocasionando a elevação das taxas de erosão. Atualmente pouca atenção é dada a influência desses fatores em relação às mudanças de fluxo de sedimentos em ambientes semiáridos. Sensibilidade da paisagem é uma consideração importante em análise de fluxo e transmissão de sedimentos em sistemas fluviais (SOUZA; CORREA; BRIERLEY, 2016). A maioria dos trabalhos sobre transporte de sedimentos em riachos ou microbacias hidrográficas estão voltados para os sedimentos em suspensão. Entretanto, a amostragem em fluxo do sedimento de fundo é dificultada devido a irregularidade das chuvas e seu potencial em formar escoamento suficiente para o transporte. Portanto, o conhecimento da dinâmica do transporte de sedimentos de fundo em ambientes áridos e semiáridos é limitado (POWELL, 2009).

Nas regiões áridas e semiáridas existem diversas formas de degradação dos solos, tais como: salinização, compactação, queimadas, contaminação, erosão acelerada, onde o conjunto desses fatos pode levar a desertificação. Essas formas de degradação contribuem para o comprometimento da qualidade ambiental e o aumento da produção de sedimentos. Siqueira et al. (2016) ressaltam que nesse contexto uma estimativa mais precisa da erosão hídrica é importante nessas regiões, tais como a avaliação potencial de perda de solo, da redução da capacidade de armazenamento de água em reservatórios devido à deposição de sedimentos, redução da produtividade em solos com potencial agrícola e os efeitos da erosão em diferentes regiões.

Devido à dificuldade encontrada nas medições diretas dos processos hidrossedimentológicos, as abordagens indiretas são bastante vantajosas. Powell (2009) afirma que em rios de ambientes áridos e semiáridos, abordagens indiretas, para estudos de sedimentação de reservatórios, têm vantagens consideráveis dada a natureza efêmera dos eventos contribuintes e volumes associados. Essas metodologias fornecem informações que integram respostas hidrológicas, hidráulicas e sedimentológicas em uma ampla gama de escala espaço-temporal. Silva Junior et al. (2011) descreveram que a grande variação temporal da produção de sedimentos está à mercê do escoamento o qual, por sua vez, depende do regime pluviométrico. Ainda segundo os autores, para ambientes semiáridos, a carga de sedimento de fundo varia de 5 a 10% da carga de sedimento suspenso.

As medições de cargas de sedimentos podem ser realizadas por vários métodos como, por exemplo, monitorando-se descargas de sedimentos em suspensão e as descargas

volumétricas. Nearing et al. (2007) investigaram a produção de sedimentos no semiárido do Arizona, encontrando valores de 0,6 a 3,7 t ha⁻¹ ano⁻¹, com precipitações médias de 2.968 mm e declividade média de 10%; em estudos semelhantes na bacia do Rio Pirapama, em Pernambuco, Silva e Santos (2008) estimaram valores de produção total de sedimentos com concentrações entre 40 e 100 t ha⁻¹ ano⁻¹, para uma variação de chuva da ordem de 1.100 a 2.100 mm ano.

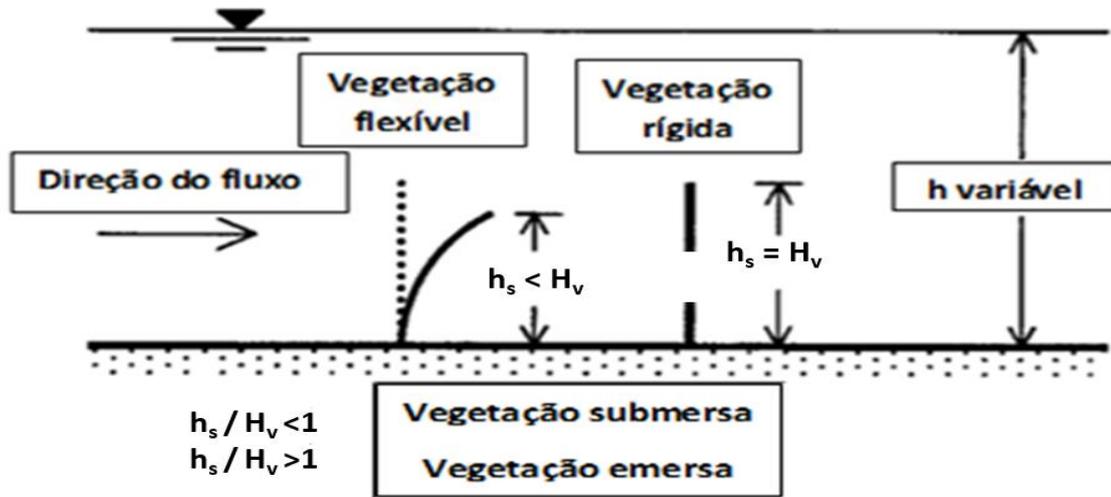
3.6 Vegetação em canais naturais

A vegetação aquática presente em sistemas fluviais possui relevante impacto ambiental, sendo este positivo no que diz respeito ao equilíbrio ecológico, podendo ser negativo quando afeta a capacidade de transporte de fluxo. A força de arrasto provocada pela vegetação é causada pela interação entre vegetação e fluxo. O coeficiente de arrasto da vegetação (C_D) é uma grandeza adimensional, que está diretamente ligado a força de arraste. Essa relação está principalmente focada na necessidade da realização do cálculo do C_D para compreensão e previsão da força de arrasto (BUSARI; LI, 2015; LIU; ZENG, 2016).

As plantas aquáticas estão presentes em diversos tipos de ambientes, sejam eles naturais como os rios e várzeas ou artificiais como os canais de irrigação e barragens. Elas também exercem importante papel, por exemplo, melhorando a qualidade da água, absorvendo eventuais excessos de nutrientes e principalmente produzindo oxigênio. Nos cursos d'água, a vegetação pode ser submersa, emersa flexível ou rígida, podendo afetar a hidrodinâmica dos ambientes que estão inseridas. Além de aumentar a resistência ao fluxo, velocidade e o nível de água local, pode diminuir a descarga de inundação, estando diretamente relacionada a deposição de sedimentos (NEPF, 2000; TANG et al., 2008; LIU; ZENG, 2016).

Carollo, Ferro e Termini (2005) realizaram experimento onde analisou-se o efeito da rigidez da planta na resistência hidráulica ao escoamento. A figura 1 demonstra a rigidez da planta, onde h_s é a altura da planta acamada, H_v é a altura da planta com ausência de fluxo, ou seja, uma planta pode ser mais rígida quando o valor de h_s se aproxima do valor de H_v . Os autores também definem em seu trabalho o grau de inflexão da vegetação, onde, se a razão entre h_s e a altura do nível da água h for < 1 , é considerada vegetação submersa e para valores de $h_s/h > 1$, considerada emersa.

Figura 1 - Características geométricas da vegetação.



Fonte: Carollo, Ferro, Termini (2005).

Por muito tempo a vegetação aquática foi vista apenas pelo lado negativo, sendo destacado apenas a resistência que ela provoca ao escoamento, com isso um fato bastante comum era a retirada da vegetação visando a melhoria do escoamento do fluxo e redução da inundação. Como citado anteriormente essa vegetação também é importante para outros aspectos além dos hidráulicos, elas fazem parte dos sistemas fluviais, importantes na preservação do equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (NEPF, 2012).

Grande parte dos estudos relacionados ao efeito da vegetação aquática em canais, foram realizados em laboratório, com utilização de plantas artificiais, estudos em canais naturais são bastante escassos. Hui et al. (2010) em seu trabalho, utilizaram plantas naturais em ensaios laboratoriais, visando uma maior aproximação das condições naturais para estimar o coeficiente de arrasto provocado pela vegetação. Os autores avaliaram arbustos de mesma espécie e de espécies diferentes para calcular o C_D com base na equação de Bernoulli.

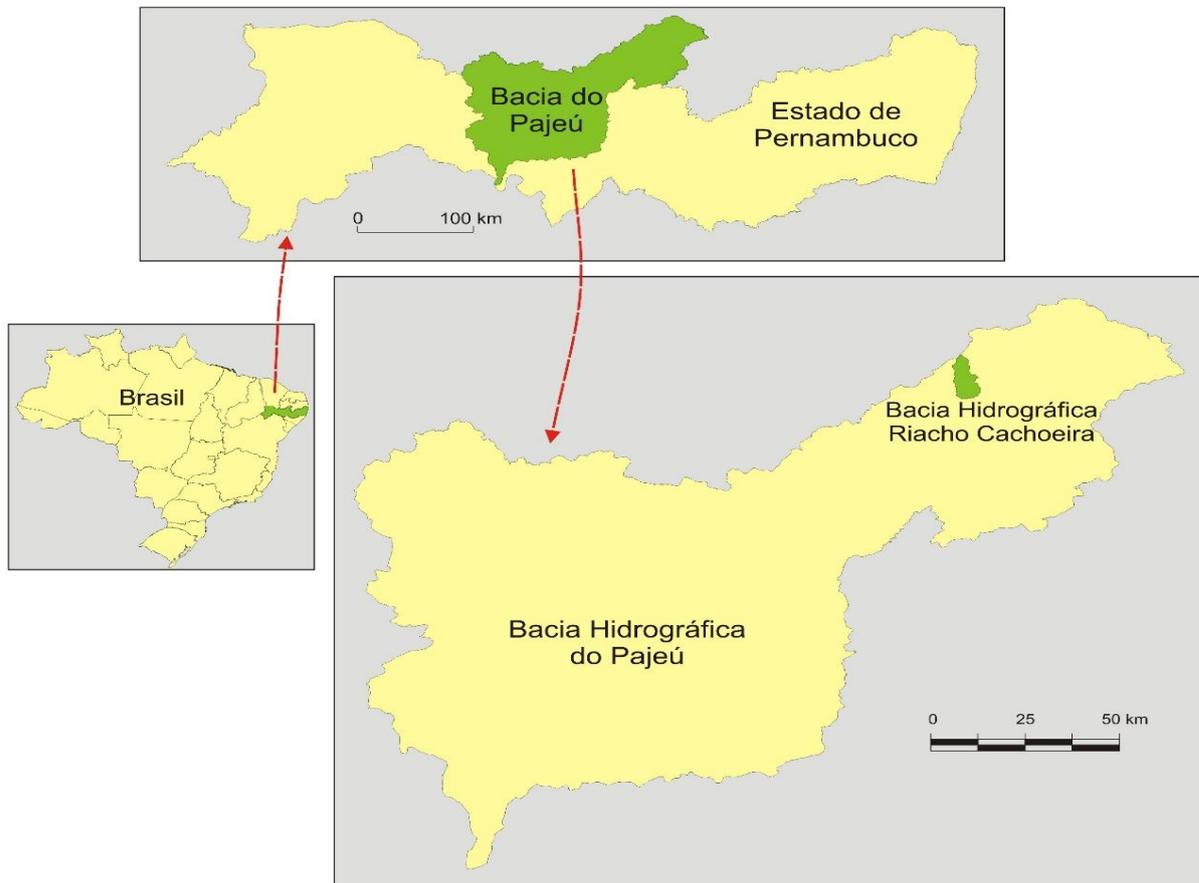
Cantalice et al. (2015) realizaram estudo no riacho Jacú na região Semiárida de Pernambuco, que apresentava as espécies *Ipomoea pes-caprae* em condições de vegetação flexível e emergente submersa. Filho et al. (2019) também desenvolveram estudo sobre o coeficiente de arrasto e rugosidade hidráulica gerada por um trecho de vegetação aquática no riacho Cachoeira, com presença de *I. pes-caprae*. Desse modo, o coeficiente de arraste vegetal é um importante parâmetro nos estudos da resistência a erosão dos leitos, sendo bastante complexo de se determinar em canais naturais por necessitar da mensuração de diversos elementos do ambiente estudado (BUSARI; LI, 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada na bacia do riacho Cachoeira, inserida na Mesorregião do Sertão Pernambucano, Microrregião do Pajeú, na cidade de Tabira, região Semiárida do Estado de Pernambuco. Pertencente a bacia hidrográfica do Pajeú (16.686 km²), limitando-se ao norte com os estados do Ceará e Paraíba, a bacia do riacho Cachoeira possui área de 68,235 km² (Figura 2).

Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, Pernambuco, Brasil.



Fonte: Silva Filho et al. (2019).

As características morfométricas da bacia do riacho Cachoeira descritas por Silva Filho et al. (2019), são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis morfométricas da bacia do riacho Cachoeira, Tabira-PE.

Variáveis	Unidade	Valor
Área	km ²	68,2353
Perímetro	km	44,112
Comprimento do rio principal	m	17615
Elevação máxima	m	819
Elevação mínima	m	568
Declividade média da bacia	m m ⁻¹	0,051
Coefficiente de compacidade	adm.	1,49
Fator de forma	adm.	0,425
Tempo de concentração	h	1,41
Ordem dos cursos de água	-	6
Densidade de drenagem	km km ⁻²	0,035
Declividade média do rio principal	m m ⁻¹	0,0044

Fonte: Silva Filho et al. (2019).

Os mapas de declividade e de drenagem da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, contendo o ponto em que foram realizadas as amostragens, respectivamente, encontram-se nos Anexos 1 e 2. A região apresenta clima do tipo BSh bastante representativo em Pernambuco, abrangendo 61,4% do território, definido como Semiárido, quente e seco, segundo a classificação de Köppen (1936) e adaptado para o Brasil por Alvares et al. (2014). A temperatura média anual é superior a 25 °C e as chuvas são de verão-outono com pluviosidade média anual de 642,80 mm ano⁻¹ (1962 – 2019). A caracterização pluviométrica em escala de tempo mensal (períodos de alta e baixa precipitação), foi obtida segundo o método proposto por Gregory (1979) e descrito por Cavalcante (2018) (Figura 3).

No ambiente semiárido brasileiro a precipitação é irregularmente distribuída e a evapotranspiração é alta (> 2.000 mm), a vegetação é composta por Caatinga Hiperxerófila Arbustiva e Semi-arbustiva. A distribuição espacial da pedologia local é caracterizada principalmente por solos pouco desenvolvidos e pedregosos em função da baixa intensidade da atuação dos fatores pedogenéticos. O solo predominante nas margens do riacho é o Neossolo Flúvico de acordo com a descrição da EMBRAPA (2013), no qual é formado a partir da deposição de sedimentos trazidos pelas águas do riacho. O relevo em sua maior parte é suave ondulado com declividade de 3 a 8% (EMBRAPA, 1979), variando de plano a forte ondulado como apresentado na Tabela 2.

Figura 3 - Gráfico da Precipitação Acumulada Média Mensal (PAMM) referente ao período de 1962 a 2019. Colunas em cores azul e laranja indicam os períodos de alta e baixa precipitação, respectivamente. Pontos interligados por linha tracejada indicam o Desvio Padrão Amostral. Rótulos de dados indicam a contagem dos meses de alta e baixa precipitação.

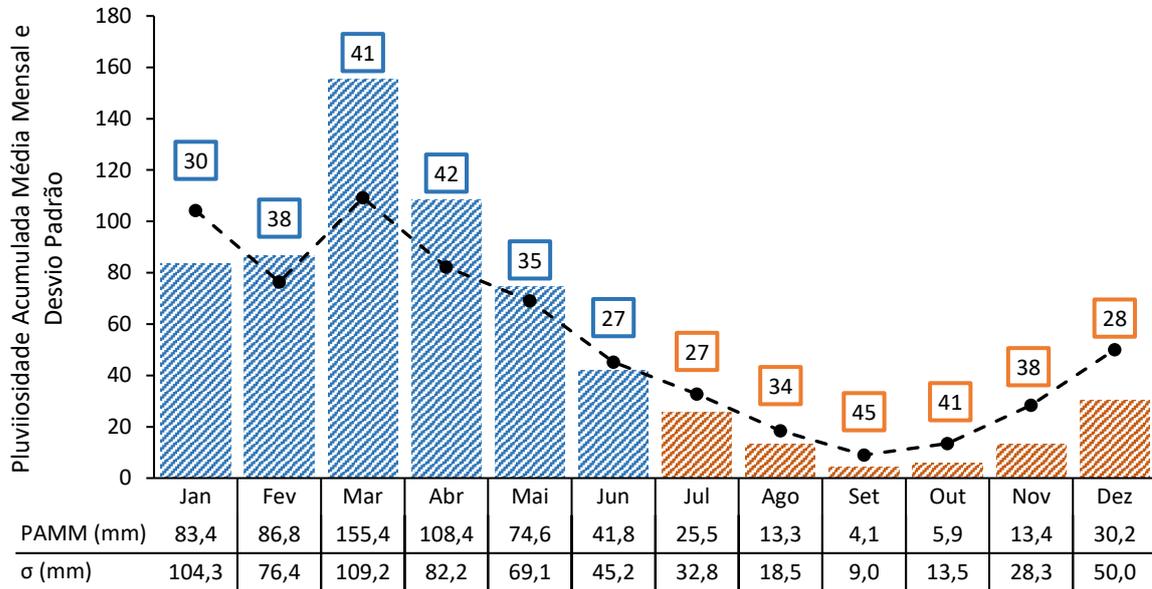


Tabela 2 - Classes de declividade e relevo da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, Tabira-PE.

Intervalo de classes de declive (%)	Área (km ²)	Contribuição (%)	Classificação do relevo
0 – 3	15,51	22,72	Plano
3 – 8	33,47	49,05	Suave ondulado
8 – 20	17,26	25,29	Ondulado
20 – 45	2,00	2,93	Forte ondulado
45 – 75	-	-	Montanhoso
> 75	-	-	Forte montanhoso

Fonte: Silva Filho (2019).

4.2 Campanhas de monitoramento e escolha da seção transversal

Os dados foram coletados durante o período chuvoso de 2019 (Figura 3), por meio de campanhas de medições direta à vau, realizadas no mês de abril entre os dias 08 e 16, totalizando 15 campanhas durante os turnos da manhã e da tarde, variando entre às 6:15 e 16:45 horas. Além das campanhas hidrossedimentométricas realizadas no curso d'água, também foram coletadas duas amostras de sedimentos do material do leito após a redução do perímetro molhado: uma amostra coletada nas margens do riacho; e outra coletada em um banco de sedimentos presente no curso d'água à jusante da seção transversal; correspondentes as amostras 16 e 17 respectivamente, no qual foi realizado o ensaio laboratorial por peneiramento para obtenção da distribuição granulométrica das partículas, descrita na seção 4.7.

A seção transversal selecionada foi utilizada durante todas as campanhas de monitoramento, sendo que os critérios para a escolha foram os destacados por Cantalice et al. (2013). O trecho escolhido apresentou boa condição de acesso para instalação e utilização dos equipamentos necessários, retilíneo e com margens paralelas, perfil longitudinal regular e afastado das confluências para evitar os efeitos de remanso (Figura 4). A condição de leito livre de vegetação não foi atendida, devido ao efeito da vegetação na hidrodinâmica de resistência ao fluxo ser um dos objetivos de estudo.

Figura 4 - Seção de monitoramento no riacho Cachoeira, Tabira-PE.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

4.3 Monitoramento hidrossedimentométrico

Para a determinação das descargas líquida e sólida foi utilizado o método de Igual Incremento de Largura - IIL (*Equal-width-increment - EWI*) (EDWARDS; GLYSSON, 1999), sendo inicialmente a seção transversal selecionada dividida em verticais igualmente espaçadas (Figura 5).

Figura 5 - Divisão da seção transversal em segmentos igualmente espaçados.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

Após a divisão da seção transversal, foi realizada a batimetria na posição central de cada segmento com o uso de régua linimétrica fluviométrica (Figura 6). Este procedimento foi realizado em cada campanha, permitindo dessa forma observar as mudanças na calha fluvial. A área da seção transversal foi calculada em cada setor delimitado por duas verticais (Figura 7), segundo a expressão abaixo:

$$A = \left(\frac{P_1}{2}\right) a + \left(\frac{P_1+P_2}{2}\right) b + \left(\frac{P_2+P_3}{2}\right) c + \dots + \frac{P_n}{2} n \quad (1)$$

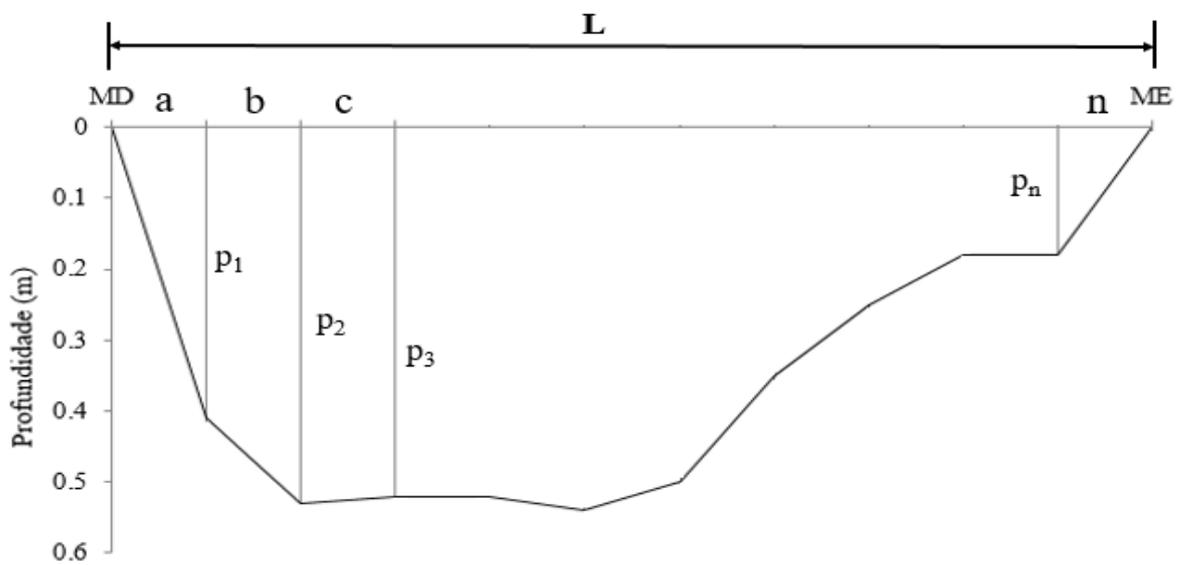
onde: $a+b+c+\dots+n = L$ é a largura da seção transversal (m); P_n é a profundidade da vertical n (m).

Figura 6 - Levantamento batimétrico nas verticais igualmente espaçadas da seção transversal.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

Figura 7 - Segmentos da área da seção transversal.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

4.4 Determinação das características hidráulicas do escoamento

A velocidade média do escoamento dada em m s^{-1} , foi determinada por integração do perfil, com o uso de micromolinete fluviométrico (Hidromec®) (Figura 8), conforme a caracterização do escoamento. O número de pontos em que o micromolinete foi posicionado dependeu da profundidade do curso d'água (Tabela 3).

Figura 8 - Medição da velocidade do escoamento com micromolinete fluviométrico.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

Tabela 3 - Posição do micromolinete na vertical em relação à profundidade.

Profundidade (m)	Posição
0,15 a 0,60	0,6P
0,60 a 1,20	0,2P e 0,8P
1,20 a 2,00	0,2P; 0,6P e 0,8P
2,00 a 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P e 0,8P
Acima de 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P; 0,8P e F

A posição S (superfície) corresponde à profundidade de 0,10 m, e a posição F (fundo) corresponde àquela determinada pelo comprimento da haste de sustentação do lastro.

A descarga líquida (vazão; Q_l), foi obtida pela metodologia preconizada pelo USGS (2005):

$$\sum_{i=1}^n Q_l = A_i U_i \quad (2)$$

onde: Q_1 é a vazão total ($m^3 s^{-1}$); Q_i é a vazão de cada perfil ($m^3 s^{-1}$); A_i é a área de cada perfil (m^2); U_i é a velocidade média de cada perfil ($m s^{-1}$).

Os números de Reynolds (R_e) e Froude (F_r) foram utilizados para a caracterização hidráulica do escoamento, segundo Simons e Senturk (1992):

$$R_e = \frac{U_m h}{\nu} \quad (3)$$

$$F_r = \frac{U_m}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

onde: U_m é a velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$); h é a altura da lâmina de escoamento (m); g = aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

Sendo ν determinada pela equação proposta por Julien (1995):

$$\nu = [1,14 - 0,031(T-15) + 0,00068(T-15)^2] / 10^{-6} \quad (5)$$

onde: ν é a viscosidade cinemática da água ($m^2 s^{-1}$); T é a temperatura da água ($^{\circ}C$).

A rugosidade hidráulica do escoamento foi obtida pelos coeficientes de Manning e pelo coeficiente de fricção de Darcy-Weisbach (f), conforme a equação:

$$n = \frac{R_h^{2/3} S^{1/2}}{U} \quad (6)$$

$$f = \frac{8ghS}{U_m^2} \quad (7)$$

onde: f é o coeficiente de fricção de Darcy-Weisbach (adm); n é o coeficiente de Manning ($m^{-1/3} s$); g é a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); R_h é o raio hidráulico; h é a altura da lâmina do escoamento (m); S = declive do canal ($m m^{-1}$); U_m = velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$).

O raio hidráulico (R_h) e a tensão de cisalhamento (τ), foram obtidos pelas equações descritas abaixo:

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (8)$$

$$\tau = \gamma R_h S \quad (9)$$

onde: A é a área da secção transversal (m^2); P_m é o perímetro molhado da secção transversal (m); γ é o peso específico da água ($N m^{-3}$); R_h é o raio hidráulico (m); e S é o declive ($m m^{-1}$); τ é a tensão de cisalhamento (Pa).

4.5 Parâmetros vegetativos e rugosidade hidráulica gerada pela vegetação

Na seção transversal, a espécie *Ipomoea pes-caprae* (Salsa de praia) foi encontrada nas margens (direita e esquerda), sendo avaliada na condição de vegetação flexível submersa e emersa. Pertencente à família Convolvulaceae, possui principalmente distribuição tropical com

representantes em climas subtropicais e temperados. Apresentando-se na forma de arbusto e hábito lianescente com sistema de caule longo, que pode atingir até 40 metros de comprimento e capaz de fixar dunas e areias costeiras. Os parâmetros vegetativos obtidos por medição direta nas plantas são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 - Características da espécie vegetal presente no leito da seção transversal estudada.

Espécie	unidade	<i>Ipomoea pescaprae</i> (Salsa de praia)
Nº de plantas	un	36
Espaçamento médio entre plantas	m	0,02
Altura média total	m	0,24
Comprimento médio acamando	m	0,98
Diâmetro médio das folhas	m	0,06
Diâmetro médio dos caules	m	0,006

Na avaliação da resistência induzida pela vegetação (*I. pes-caprae*) na bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, foram determinados a relação de submersão (S_r), o coeficiente de arrasto vegetal (C_D) e a tensão de arraste vegetal (τ_{veg}).

A relação de submersão (S_r) foi obtida pela expressão:

$$S_r = \frac{h}{H_v} \quad (10)$$

onde: h é a altura da lâmina (m); e H_v é a altura média da vegetação (m). A partir da relação entre a velocidade média do escoamento (U_m) e S_r , foram caracterizadas as zonas de cisalhamento ($h < H_v$; $S_r < 1$) e fluxo livre ($h > H_v$; $S_r > 1$), determinando-se as condições de vegetação submersa e emersa, respectivamente. A partir das equações propostas por Wu, Fu-Chun et al. (1999), foram determinados os C_D e F_D para as condições de vegetação submersa:

$$C_{DS} = \left(\frac{h}{H_v}\right) \frac{2gS}{U_m^2} \quad (11)$$

$$\tau_{vegS} = C_{DS}(adNH_vBE) \frac{\rho U_m^2}{2} \quad (12)$$

onde: C_{DS} é coeficiente de arraste vegetal (submersa) (m^{-1}); h é a altura do fluxo (m); H_v é a altura da vegetação (m); g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); S é o declive do canal ($m\ m^{-1}$); U_m é a velocidade média do escoamento ($m\ s^{-1}$); τ_{vegS} é a tensão de arraste vegetal (submersa) (N); ad é a densidade vegetal (adm); N é o número de hastes; adN representa o volume fracionário do domínio do fluxo ocupado pelas plantas (Nepf, 1999); B é largura da seção transversal ocupada pela vegetação (m); E é o comprimento acamado das hastes (m); ρ é massa específica da água ($N\ m^{-3}$). E vegetação emersa:

$$C_{DE} = \frac{2gS}{U_m^2} \quad (13)$$

$$\tau_{\text{vegE}} = C_{\text{DE}}(\text{adNA}_F L) \frac{\rho U^2}{2} \quad (14)$$

onde: C_{DE} é coeficiente de arraste vegetal (emersa) (m^{-1}); τ_{vegE} é a tensão de arraste vegetal (emersa) (N); e A_F é área frontal da haste (m^2). Dividindo-se a τ_{veg} pela área da seção transversal ocupada pelas hastes, obteve-se a τ_{veg} em N m^{-2} .

4.6 Determinação da descarga sólida total (Q_{ST}) e da produção de sedimentos (Y)

A descarga sólida em suspensão (Q_{SS}) foi obtida logo após a determinação das variáveis hidráulicas. No procedimento de coleta das amostras do fluxo de sedimentos em suspensão foi utilizado o amostrador DH-48 (Hidromec[®]) (Figura 9), sendo este utilizado para cursos d'água com níveis mais rasos, como é o caso do riacho estudado. A amostragem foi realizada no ponto central de cada segmento vertical utilizando o método IIL, como já citado.

Figura 9 - Coleta do sedimento em suspensão, com uso do amostrador DH-48 (Hidromec[®]).



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

Em cada vertical, a amostragem foi realizada com velocidade constante no trajeto da descida, como na subida. A velocidade transito (U_t), a qual, o equipamento percorreu a vertical de amostragem, dependeu de vários fatores, como o tamanho do bico utilizado no equipamento de amostragem, volume da amostra a ser coletada, velocidade do escoamento e profundidade

amostrada (WILDE; RADKE, 1998), sendo a U_t determinada pela equação proposta por Carvalho (1994):

$$U_t = U_i K \quad (16)$$

onde: U_t é a velocidade de trânsito ($m s^{-1}$); U_i é a velocidade média de fluxo no i segmento vertical amostrado ($m s^{-1}$); e K é a constante de proporcionalidade, variável de acordo com bico do amostrador (0,4 para o bico $\frac{1}{4}$ " utilizado). O tempo necessário para que o amostrador desça até o leito do rio e retorne à superfície da água, foi calculado pela equação:

$$T_{amostragem} = \frac{2p}{U_t} \quad (17)$$

onde: $T_{amostragem}$ é o tempo mínimo para realizar a amostragem; p é a profundidade do segmento vertical amostrado (m) e U_t é a velocidade de trânsito ($m s^{-1}$).

Na determinação da descarga sólida de fundo (Q_{SF}) foi utilizado o amostrador US BLH – 84 nas mesmas verticais da amostragem de sedimentos em suspensão. A amostragem foi realizada em um único ponto apoiado ao fundo do leito, coletando-se os sedimentos arrastados para o interior do amostrador em um intervalo de tempo pré-estabelecido e retidos em saca de nylon com diâmetro de malha um milímetro ($\varnothing = 1 \text{ mm}$) (Figura 10).

Após a coleta de sedimento suspenso e de fundo, as amostras foram armazenadas em potes de 1000 mL, numerados e em seguida levadas ao laboratório de Engenharia da Conservação do Solo e da Água da UFRPE, onde passaram de uma a duas semanas em repouso em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, seguindo a metodologia da (USGS, 1973). A concentração de sedimentos em suspensão (C_{SS}) foi obtida pela equação:

$$C_{SS} = \frac{M_{sed}}{V_{amostra}} \quad (18)$$

em que: C_{SS} é a concentração de sedimento suspenso na vertical amostrada ($mg L^{-1}$); M_{sed} é a massa do sedimento seco em estufa (mg); $V_{amostra}$ é o volume da amostra (L). No entanto, para a C_{SS} foi utilizado o coeficiente Box (BC) (Gray, 2005), que define a precisão da amostragem de sedimentos em suspensão feita em cada segmento vertical do riacho, calculado pela equação:

$$BC = \frac{C_{\overline{SS}}}{C_{SS_i}} \quad (19)$$

onde: C_{SS_i} é a concentração de sedimentos em suspensão em cada segmento vertical ($mg L^{-1}$); e $C_{\overline{SS}}$ é a concentração média de sedimentos em suspensão ($mg L^{-1}$) entre todos os segmentos verticais amostrados.

Figura 10 - Coleta da descarga sólida do leito utilizando o amostrador US BLH – 84.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

Os valores quantitativos ou valores da descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) foram determinados na forma da equação:

$$Q_{ss} = \sum (C_{ssi} Q_i) 0,0864 \quad (20)$$

onde: Q_{ss} é a descarga sólida em suspensão ($t \text{ dia}^{-1}$); C_{ssi} é a concentração de sedimento em suspensão da vertical ($mg \text{ L}^{-1}$); Q_i é a descarga líquida da respectiva vertical ($m^3 \text{ s}^{-1}$). Os valores quantitativos ou valores da descarga sólida de fundo foram determinados por meio da equação estabelecida por Gray (2005):

$$Q_{SF} = \sum \frac{m}{w \cdot t} L_i 0,0864 \quad (21)$$

onde: Q_{SF} é a descarga sólida do leito ($t \text{ dia}^{-1}$); m é a massa do sedimento seco à $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (g); w é o diâmetro do bocal (m); t é o tempo de amostragem (s) e L_i é a largura em cada vertical.

Assim, a produção de sedimentos em suspensão (Y_{ss}) e do leito (Y_{SF}) estimadas para todo ano, foram obtidas pelas equações:

$$Y_{ss} = \frac{Q_{ss} X}{A} \quad (22)$$

$$Y_{SF} = \frac{Q_{SF} X}{A} \quad (23)$$

onde: Y_{SS} e Y_{SF} são as produções de sedimento suspenso e do leito, respectivamente ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$ ou $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); Q_{SS} e Q_{SF} são as descargas sólidas em suspensão e do leito, respectivamente ($t\ dia^{-1}$); X são os dias do ano em que houve escoamento superficial no riacho Cachoeira (138); A é a área da bacia (km^2 ou ha).

O número de dias em que houve escoamento na bacia do Cachoeira, foi calculado utilizando o método desenvolvido pelo National Resources Conservation Center (NRCC) dos EUA, conhecido como SCS-CN ou método da Curva-Número (CN), utilizando-se da chuva efetiva para determinar o número de dias do ano que houve escoamento na bacia, de acordo com as equações:

$$P > 0,2S \therefore h_{ef} = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad (24)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (25)$$

onde: P é a precipitação do evento (mm); h_{ef} é a chuva efetiva (mm); S é a máxima infiltração acumulada potencial (mm); e CN é curva número (adm).

A produção total de sedimentos (Y_t) foi obtida pela soma da produção de sedimentos em suspensão suspenso e do leito, expressa pela equação:

$$Y_t = Y_{SS} + Y_{SF} \quad (26)$$

onde: Y_t é a produção de sedimento total ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$ ou $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); Y_{SS} é a produção de sedimento em suspensão ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$ ou $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); Y_{SF} é a produção de sedimentos do leito ($t\ km^{-2}\ ano^{-1}$ ou $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$).

4.7 Determinação dos diâmetros característicos

Os diâmetros característicos do sedimento de fundo transportados e coletados, d_{10} , d_{15} , d_{30} , d_{35} , d_{50} , d_{60} , d_{65} e d_{90} foram obtidos a partir da massa de sedimento de fundo de cada coleta após a secagem das amostras em estufa ($105\ ^\circ C$). As distribuições de tamanho de partícula (DTP) foram obtidas peneirando cada amostra em um agitador eletromagnético (modelo Viatest VSM 200) equipado com um grupo de peneiras organizadas em ordem decrescente de diâmetro de malha (3,35, 1,7, 0,85, 0,60, 0,425, 0,30, 0,212, 0,150, 0,20, 0,106, 0,076 e 0,053 mm) (Figura 11), durante 10 min, a 90 vibrações por segundo.

Figura 11 - a) agitador eletromagnético (modelo Viatest VSM 200); b) e pesagem das peneiras em balança semi analítica.



Fonte: Maria Tatiane Leonardo Chaves. Abril/2019.

De posse dos dados dos DTP, as curvas de Distribuição de Sedimentos de Grãos (DSG) foram obtidas e os diâmetros de grãos foram calculados usando o programa Curve Expert 1.3. No Excel foram gerados os gráficos dos diâmetros característicos das amostras e seus respectivos coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c). O coeficiente de uniformidade determina a distribuição do tamanho das partículas, quando o valor desse coeficiente se aproxima de 1 significa que a curva granulométrica possui um direcionamento verticalizado e seus diâmetros variam em intervalos pequenos, já para valores de coeficiente de uniformidade maiores os intervalos de variação de diâmetros crescem. Sendo o C_u calculado pela equação:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (27)$$

onde: C_u é o Coeficiente de uniformidade; d_{60} é o diâmetro característico que corresponde ao ponto 60 % na curva granulométrica; d_{10} é o diâmetro característico que corresponde ao ponto 10 % na curva granulométrica;

O coeficiente de curvatura (C_c), está relacionado a forma e a simetria da curva granulométrica, um sedimento bem graduado está numa faixa de 1 a 3. O C_c foi calculado pela equação:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} d_{10}} \quad (28)$$

onde: C_c é o Coeficiente de curvatura; d_{30} é o diâmetro característico que corresponde ao ponto 30% na curva granulométrica; d_{60} é o diâmetro característico que corresponde ao ponto 60 % na curva granulométrica; d_{10} é o diâmetro característico que corresponde ao ponto 10 % na curva granulométrica.

4.8 Análise Estatística

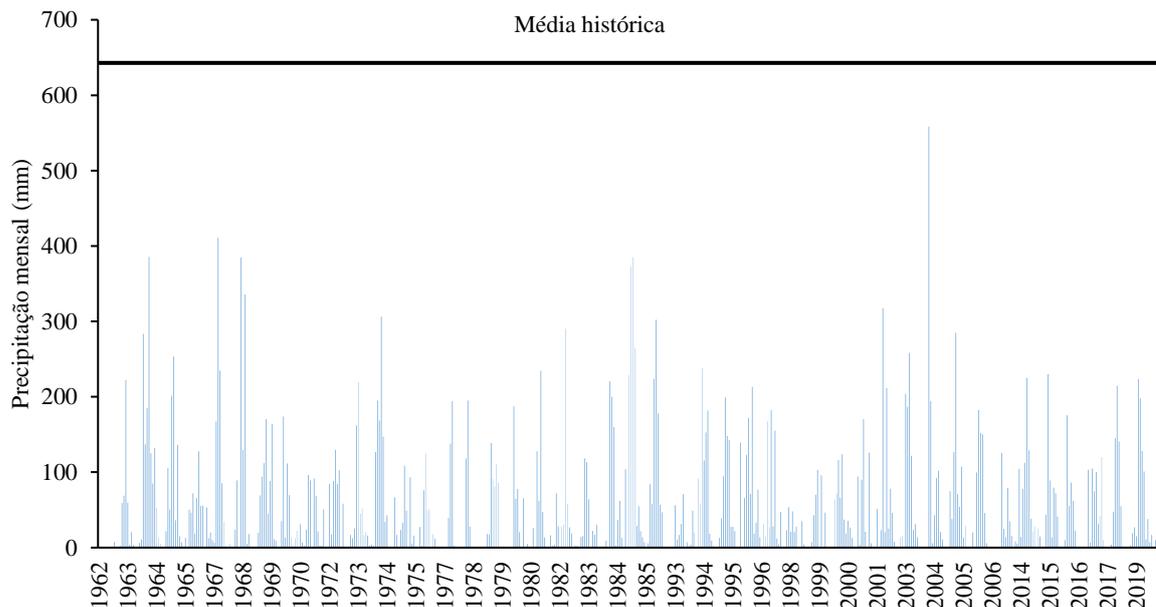
Após as coletas das informações, os dados foram organizados e submetidos a análise descritiva. A técnica estatística de análise de agrupamento hierárquico foi utilizada para classificar as coletas em grupos de acordo com os diâmetros característicos dos sedimentos do leito.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Regime pluviométrico na cidade de Tabira-PE

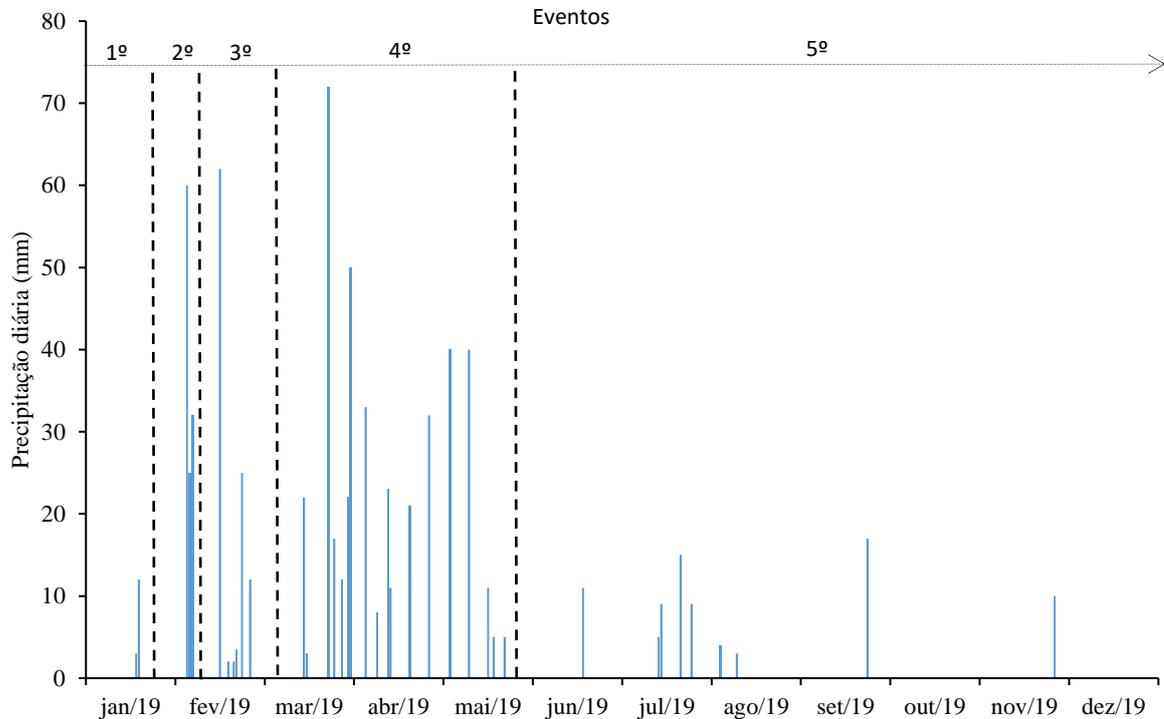
O registro gráfico da precipitação durante 46 anos (1962 a 2019) para a cidade de Tabira encontra-se na figura 12. Entretanto, foram levados em consideração os valores entre 1962 a 1985, 1993 a 2006 e 2014 a 2019, devido à ausência de dados entre os respectivos intervalos. Observar-se que em janeiro de 2004 precipitou um total mensal de 558,1 mm, valor próximo da média histórica anual de 642,80 mm e atípico para o período. Apesar disto, 2004 não foi o ano de maior precipitação (1.102,1 mm), o ano de 1985 apresentou acumulado anual de 1.469,2 mm. A cidade de Tabira apresenta uma variação sazonal extrema na precipitação mensal de chuva.

Figura 12 - Hietograma da cidade de Tabira-PE, calculado para o período de 1962 a 2019, a partir dos dados mensais pluviométricos gerados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC-PE).



O período chuvoso do ano dura seis meses, de janeiro a junho (Figura 3), com precipitação total de 547,6 neste período. O máximo de chuva ocorre durante o mês de março, como observado para o ano de 2019 (72,0 mm) (Figura 13). O período de baixa ou até ausente de precipitação do ano dura 6 meses (Figura 3), de julho a dezembro (92,9 mm). O mínimo de chuva ocorre em setembro, entretanto, em 2019 os menores valores foram encontrados nos meses de agosto (7,0 mm), outubro e dezembro (0,0 mm, respectivamente). O total anual pluviométrico para 2019 foi de 748,5 mm (Figura 13).

Figura 13 - Hietograma da cidade de Tabira para o período o ano de 2019, a partir dos dados mensais pluviométricos gerados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC-PE).



5.2 Caraterísticas hidráulicas e geométricas na seção transversal do riacho Cachoeira

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das 15 medições das características hidráulicas e geométricas obtidos na seção transversal do riacho Cachoeira, na cidade de Tabira, Pernambuco.

Com exceção da declividade da linha d'água (S) ($0,0044 \text{ m m}^{-1}$), todos os parâmetros hidráulicos e geométricos apresentaram variação durante o monitoramento: profundidade (P) de $0,24 \text{ m}$ ($0,11\text{-}0,40 \text{ m}$; $\pm 0,08$); largura da seção transversal (L) de $3,25 \text{ m}$ ($2,20\text{-}4,00 \text{ m}$; $\pm 0,75$); área da seção transversal (A) de $0,82 \text{ m}^2$ ($0,24\text{-}1,56 \text{ m}^2$; $\pm 0,40$); perímetro molhado (P_m) de $3,55 \text{ m}$ ($2,47\text{-}4,67 \text{ m}$; $\pm 0,80$); raio hidráulico (R_h) de $0,22 \text{ m}$ ($0,10\text{-}0,38 \text{ m}$; $\pm 0,07$); velocidade média (U) de $0,24 \text{ m s}^{-1}$ ($0,21\text{-}0,27 \text{ m s}^{-1}$; $\pm 0,02$); vazão (Q_l) de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($0,05\text{-}0,39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $\pm 0,10$); temperatura da água (T) de $26,07 \text{ }^\circ\text{C}$ ($24\text{-}29 \text{ }^\circ\text{C}$; $\pm 1,49$); viscosidade cinemática ($\nu \cdot 10^{-6}$) de $0,882 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($0,839\text{-}0,916 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; $\pm 0,02$); número de Reynolds (R_e) de $78576,78 \text{ adm.}$ ($32996,41\text{-}147161,10 \text{ adm.}$; $\pm 30681,52$); número de Froude (F_r) de $0,15 \text{ adm.}$ ($0,10\text{-}0,22 \text{ adm.}$; $\pm 0,03$) (Tabela 5). Os dados apresentados anteriormente são valores médios de todas as medições. Os valores de R_e e F_r classificou o regime de escoamento do riacho Cachoeira como turbulento fluvial ($R_e > 2.500$; $F_r < 1$) (SIMONS E SENTÜRK, 1992). Esta caracterização do

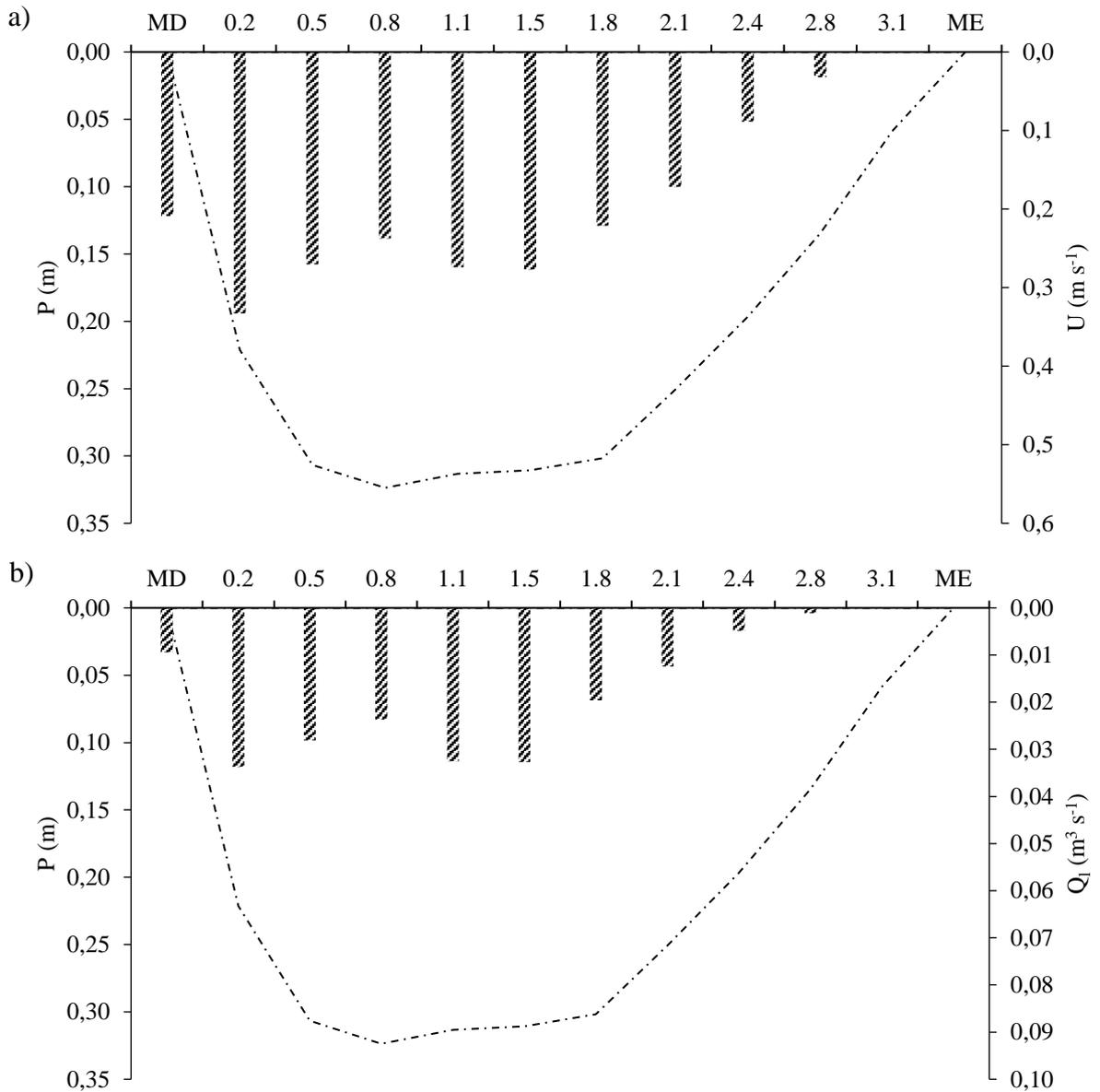
regime de escoamento em sistemas fluviais é considerada típica de rios de ambientes semiáridos (CANTALICE et al., 2013).

No perfil longitudinal da seção em estudo com largura média de 3,25 m, a profundidade mínima média da seção de monitoramento foi de 0,06 m e a máxima de 0,32 m (Figura 14). Das relações entre os valores médios de velocidade e profundidade obtidos na seção do riacho Cachoeira, maior velocidade ($0,33 \text{ m s}^{-1}$) foi encontrada entre 0,31-0,32 m de profundidade e, menor velocidade ($0,03 \text{ m s}^{-1}$) na menor profundidade (0,06 m) (Figura 14a). Vaghefi, Akbari e Fiouz (2015), relataram que as velocidades do fluxo não são distribuídas simetricamente na largura da seção transversal e, conforme a profundidade reduz as velocidades também diminuem gradativamente. Assim como a velocidade, maior vazão ($0,034 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) foi encontrada entre 0,31-0,32 m de profundidade e, menor vazão ($0,001 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) na menor profundidade (0,06 m) (Figura 14b). Em geral, as maiores velocidades e vazões estão localizadas no centro da seção transversal, onde estão as maiores profundidades.

Tabela 5 - Variáveis hidráulicas e geométricas na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Detalhes da abreviação: P = profundidade; L = largura da seção transversal; A = área da seção transversal; P_m = perímetro molhado; R_h = raio hidráulico; S = declive; U = velocidade; Q₁ = vazão; T = temperatura da água; ν = viscosidade cinemática da água; R_e = número de Reynolds; F_r = número de Froude.

Coleta	Data	P	L	A	P _m	R _h	S	U	Q ₁	T	$\nu \cdot 10^{-6}$	Re	Fr
		m	m	m ²	m	m	m m ⁻¹	m s ⁻¹	m ³ s ⁻¹	°C	m ² s ⁻¹	adm	
1	08/04/19	0,40	4,00	1,56	4,10	0,379	0,0044	0,268	0,388	26,0	0,881	147161,10	0,12
2	09/04/19	0,26	4,00	1,05	4,15	0,253	0,0044	0,229	0,243	25,0	0,898	90429,75	0,12
3	09/04/19	0,27	4,00	1,07	4,41	0,242	0,0044	0,251	0,272	25,0	0,898	101438,13	0,14
4	09/04/19	0,27	4,00	1,06	4,45	0,239	0,0044	0,256	0,280	25,0	0,898	105548,25	0,14
5	10/04/19	0,27	4,00	0,99	3,44	0,288	0,0044	0,257	0,257	24,0	0,916	80747,63	0,16
6	10/04/19	0,25	4,00	0,99	4,51	0,219	0,0044	0,252	0,251	25,0	0,898	80720,20	0,15
7	10/04/19	0,24	3,00	0,72	3,44	0,209	0,0044	0,257	0,185	26,0	0,881	80793,73	0,16
8	10/04/19	0,24	3,00	0,72	3,74	0,191	0,0044	0,251	0,182	26,0	0,881	79171,04	0,16
9	11/04/19	0,22	2,60	0,55	2,95	0,186	0,0044	0,234	0,115	26,0	0,881	58866,41	0,16
10	11/04/19	0,21	2,60	0,54	2,72	0,199	0,0044	0,212	0,119	28,0	0,852	55049,31	0,15
11	11/04/19	0,21	2,60	0,53	2,70	0,197	0,0044	0,225	0,125	29,0	0,839	58581,62	0,16
12	11/04/19	0,20	2,60	0,52	2,95	0,175	0,0044	0,226	0,122	29,0	0,839	57570,05	0,16
13	12/04/19	0,39	4,00	1,51	4,67	0,323	0,0044	0,218	0,318	25,0	0,898	114667,65	0,10
14	16/04/19	0,12	2,20	0,26	2,49	0,103	0,0044	0,233	0,048	26,0	0,881	32996,41	0,21
15	16/04/19	0,11	2,20	0,24	2,47	0,098	0,0044	0,245	0,051	26,0	0,881	279283,57	0,22
Máximo		0,40	4,00	1,56	4,67	0,38	-	0,27	0,39	29,00	0,916	147161,10	0,22
Mínimo		0,11	2,20	0,24	2,47	0,10	-	0,21	0,05	24,00	0,839	32996,41	0,10
Média		0,24	3,25	0,82	3,55	0,22	0,0044	0,24	0,20	26,07	0,882	78576,78	0,15
Mediana		0,24	3,00	0,72	3,44	0,21	-	0,25	0,19	26,00	0,881	80720,20	0,16
Desvio Padrão		0,08	0,75	0,40	0,80	0,07	-	0,02	0,10	1,49	0,02	30681,52	0,03
CV (%)		31,92	23,17	48,86	22,45	33,53	-	6,92	50,67	5,70	2,54	39,05	20,20

Figura 14 - Relação entre a seção média, velocidade (a) e vazão (b) em cada vertical, na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Detalhes da abreviação: P = profundidade; U = velocidade e Q_1 = vazão.



5.3 Caracterização granulométrica do sedimento de fundo transportado e do sedimento superficial do leito

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos diâmetros característicos dos sedimentos de fundo e das amostras coletadas na margem e no leito no riacho Cachoeira, além dos coeficientes de uniformidade e de curvatura. Na caracterização granulométrica, a média dos valores das coletas de 1 a 15, apresentaram: $d_{10} = 0,21$ mm; $d_{15} = 0,23$ mm; $d_{30} = 0,30$ mm; $d_{35} = 0,32$ mm; $d_{50} = 0,40$ mm; $d_{60} = 0,46$ mm; $d_{65} = 0,49$ mm; $d_{90} = 0,87$ mm. As amostras superficiais 1 e 2 do leito, apresentaram: $d_{10} = 0,20$ mm; $d_{15} = 0,25$ mm; $d_{30} = 0,44$ mm; $d_{35} = 0,51$ mm; $d_{50} = 0,79$ mm; $d_{60} = 1,04$ mm; $d_{65} = 1,20$ mm; $d_{90} = 2,80$ mm. Em geral, os diâmetros do sedimento de fundo característicos variaram entre 0,25 a 1,21 mm para os níveis de vazão obtidos. Os valores médios de diâmetro característico das coletas ($d_{50} = 0,40$ mm) estão dentro da faixa de variação encontrada por Merten et al. (2008) (0,39-4,36 mm) ao coletaram sedimento de fundo com o amostrador USBLH-84. Entretanto, as amostras coletadas na superfície apresentaram maior d_{50} (0,79 mm) e dentro da faixa de variação dos autores. Cantalice et al. (2013) encontraram valores elevados de d_{10} (0,29 mm), d_{50} (0,77 mm) e d_{90} (1,48 mm) na bacia do Exu na região Semiárida de Pernambuco, quando comparados a este trabalho. Este resultado pode estar relacionado as variações das características morfológicas das bacias, onde a área da bacia do Exu (537,37 km²) além de ser maior que a bacia do Cachoeira (68,24 km²), apresenta maiores vazões.

Nas Figuras 15, 16 e 17 abaixo são apresentadas as curvas granulométricas dos sedimentos granulares coletados na seção transversal do riacho Cachoeira. Com exceção da coleta 15, todos sedimentos do leito coletados apresentaram distribuição granulométrica uniforme por apresentarem $C_u < 5$ (Tabela 6). A representação gráfica das curvas granulométricas das coletas 1 a 13 foi semelhante, sendo representadas pelas curvas paralelas (Figura 15). Comportamento semelhante foi observado nas coletas 14 e 15 (Figura 15) e, nas amostras 1 e 2 (Figura 16). Entretanto, as coletas 1 a 14 apresentaram maior uniformidade em comparação a coleta 15 e amostras 1 e 2, como constatado pela inclinação das curvas (Figura 17), ou seja, quanto maior a inclinação maior a desuniformidade (maior C_u). Em geral, os sedimentos coletados e amostrados no leito da seção transversal apresentaram granulometria bem graduada (C_c entre 1 e 3), ou seja, a distribuição do tamanho de partículas ocorre de forma que os espaços deixados pelas partículas maiores podem ser ocupados pelas menores. Desse modo, maior graduação dos sedimentos pode favorecer a maior estabilidade do leito do canal fluvial.

Tabela 6 - Diâmetros característicos das amostras de sedimento de fundo do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Detalhes da abreviação: d10; d15; d30; d35; d50; d60; d65; d90 = são valores de tamanho de grão nos quais 10%, 15%, 30%, 35%, 50% (diâmetro médio ou diâmetro característico), 60%, 65% e 90% do peso do material são mais finos, respectivamente. C_U = coeficiente de uniformidade; C_C = coeficiente de curvatura. (*) amostra coletada nas margens do riacho; (**) amostra coletada em um banco de sedimento presente no curso d'água à jusante da seção transversal.

Coleta	Data	d ₁₀	d ₁₅	d ₃₀	d ₃₅	d ₅₀	d ₆₀	d ₆₅	d ₉₀	C_u	C_c
		mm								adm	
1	08/04/19	0,18	0,20	0,24	0,25	0,29	0,31	0,32	0,46	1,69	1,02
2	09/04/19	0,12	0,14	0,19	0,20	0,25	0,28	0,30	0,50	2,27	1,03
3	09/04/19	0,22	0,24	0,27	0,28	0,32	0,34	0,35	0,47	1,54	1,01
4	09/04/19	0,22	0,23	0,26	0,27	0,30	0,32	0,33	0,44	1,45	0,99
5	10/04/19	0,21	0,23	0,27	0,28	0,31	0,33	0,34	0,45	1,56	1,02
6	10/04/19	0,19	0,21	0,26	0,27	0,31	0,33	0,35	0,56	1,73	1,01
7	10/04/19	0,21	0,22	0,26	0,27	0,30	0,33	0,34	0,34	1,58	1,00
8	10/04/19	0,18	0,21	0,25	0,26	0,29	0,31	0,33	0,50	1,73	1,11
9	11/04/19	0,24	0,26	0,32	0,34	0,40	0,44	0,47	0,72	1,87	1,01
10	11/04/19	0,19	0,21	0,25	0,26	0,29	0,31	0,32	0,43	1,61	1,04
11	11/04/19	0,22	0,24	0,29	0,30	0,35	0,38	0,40	0,58	1,73	1,00
12	11/04/19	0,20	0,23	0,29	0,32	0,38	0,43	0,46	0,96	2,15	1,01
13	12/04/19	0,18	0,21	0,29	0,31	0,37	0,42	0,45	0,75	2,38	1,09
14	16/04/19	0,23	0,28	0,41	0,46	0,61	0,73	0,81	1,63	3,23	1,01
15	16/04/19	0,28	0,38	0,68	0,79	1,21	1,58	1,82	4,34	5,57	1,01
Amostra 1*	16/04/19	0,24	0,31	0,49	0,56	0,79	0,99	1,11	2,31	4,05	1,00
Amostra 2**	16/04/19	0,15	0,20	0,38	0,46	0,78	1,10	1,30	3,28	7,41	0,89
Média		0,20	0,25	0,44	0,51	0,79	1,04	1,20	2,80	5,73	0,95
Máximo		0,28	0,38	0,68	0,79	1,21	1,58	1,82	4,34	5,57	1,11
Mínimo		0,12	0,14	0,19	0,20	0,25	0,28	0,30	0,34	1,45	0,99
Média		0,21	0,23	0,30	0,32	0,40	0,46	0,49	0,87	2,14	1,02
Mediana		0,21	0,23	0,27	0,28	0,31	0,33	0,35	0,50	1,73	1,01
Desvio Padrão		0,03	0,05	0,11	0,14	0,24	0,33	0,39	1,01	1,05	0,03
CV (%)		17,03	21,26	37,72	43,28	60,26	72,34	78,76	115,46	49,27	3,22

Figura 15 - Distribuição granulométrica das 15 coletas de sedimentos de fundo do riacho Cachoeira, Tabira-PE.

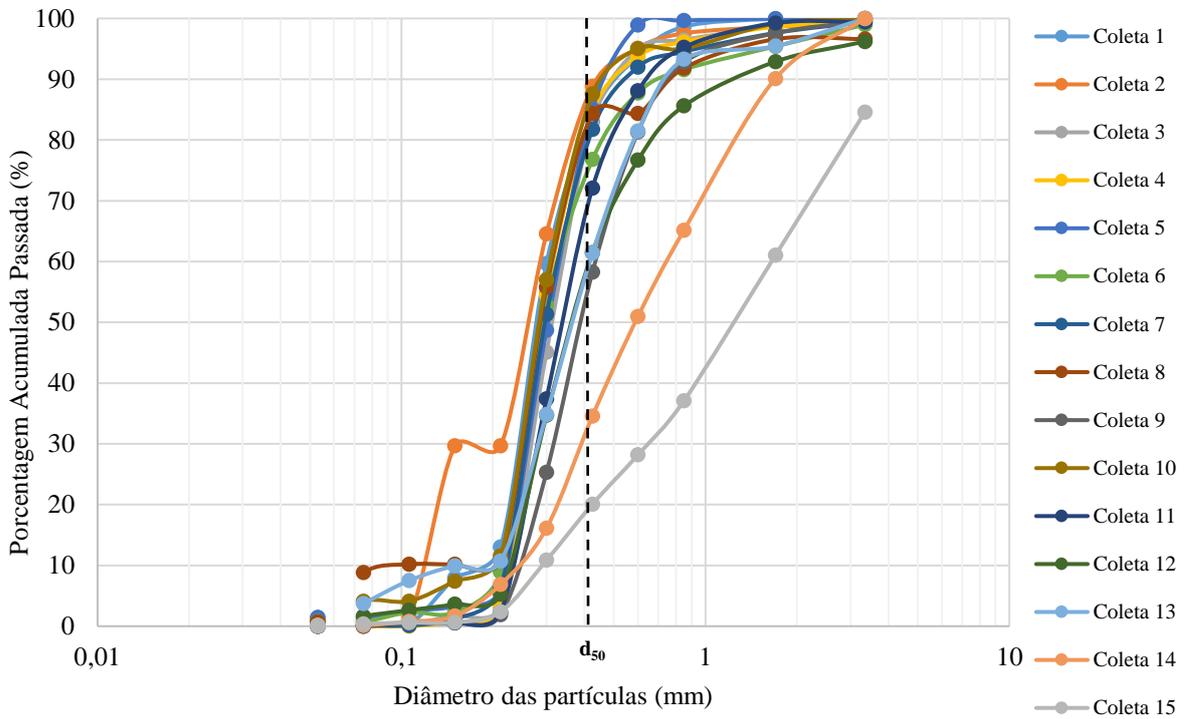


Figura 16 - Distribuição granulométrica do material coletado do leito do riacho Cachoeira, Tabira-PE. (1) amostra coletada nas margens do riacho; (2) amostra coletada em um banco de sedimentos presente no curso d'água à jusante da seção transversal.

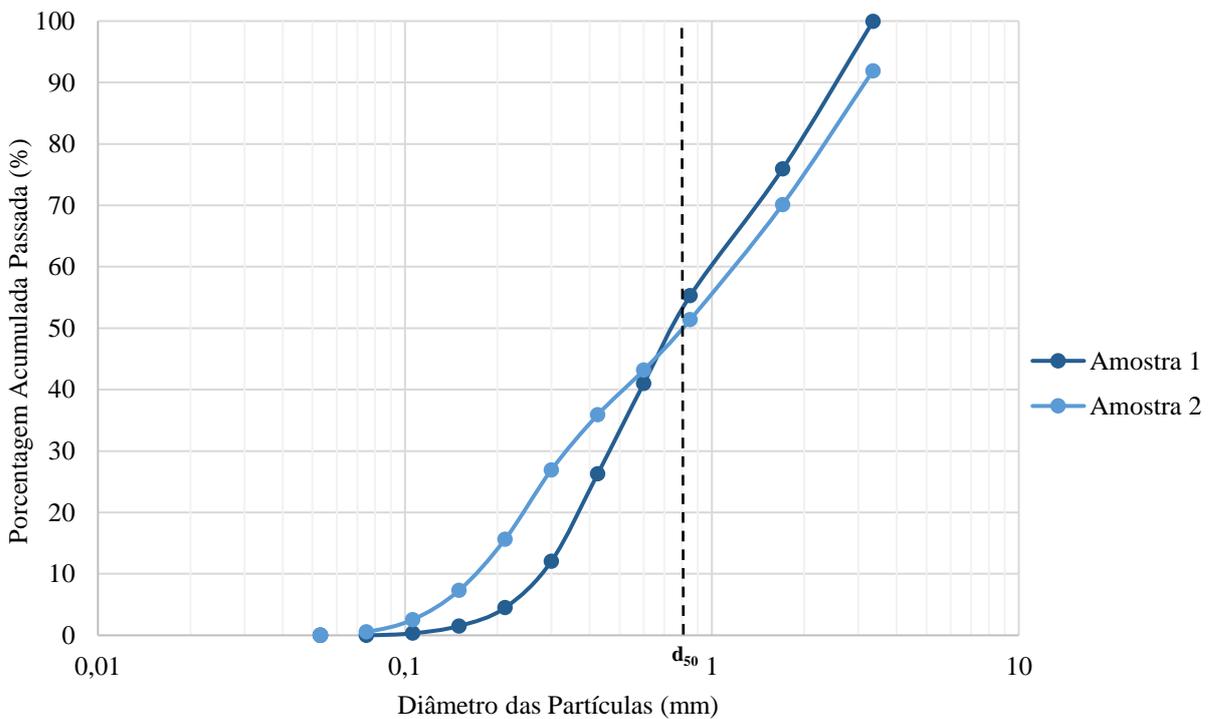
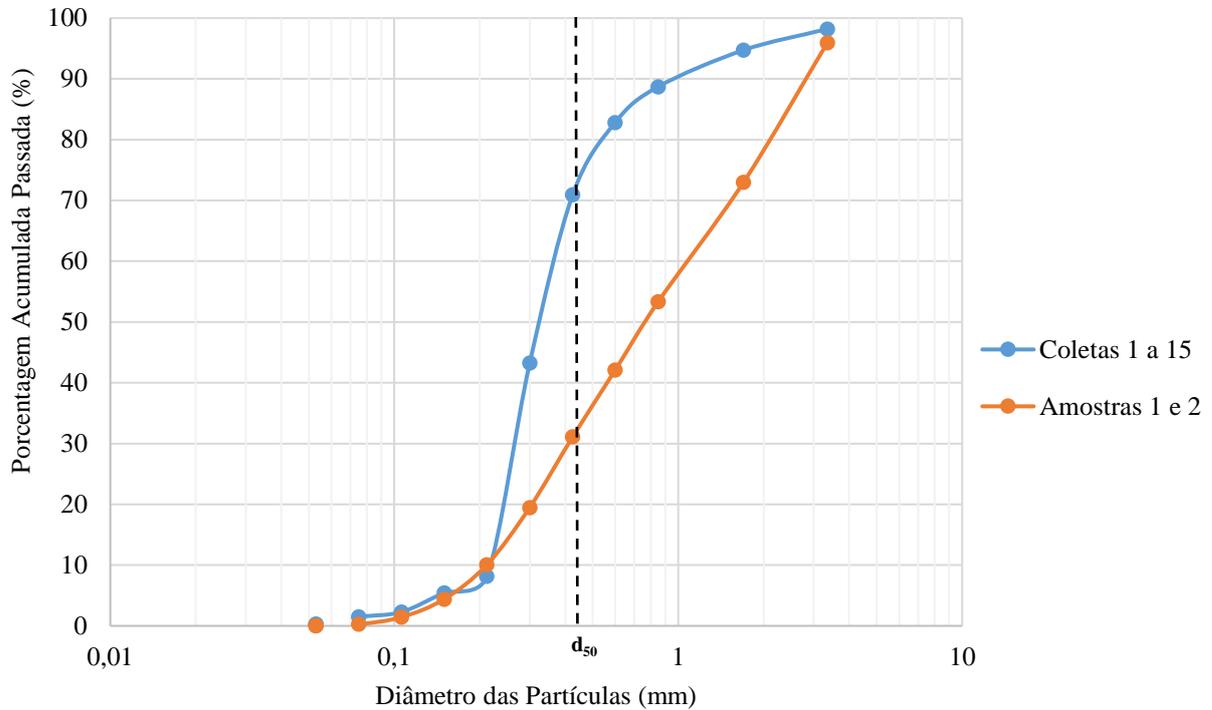


Figura 17 - Média da distribuição granulométrica das coletas e das amostras do leito do Riacho Cachoeira, Tabira-PE. (1) amostra coletada nas margens do riacho; (2) amostra coletada em um banco de sedimentos presente no curso d'água à jusante da seção transversal.



Estatisticamente, pôde-se agrupar por similaridade as coletas e amostras de sedimento do leito, a partir dos valores dos diâmetros e coeficientes analisados (Figura 18). As unidades encontradas nos grupos demonstram o grau de similaridade, dessa forma, o primeiro grupo foi formado pelas coletas: C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C10; o segundo grupo e mais próximo ao grupo um foi formado pelas coletas: C9, C11, C12 e C13; e terceiro grupo mais distante dos dois primeiros grupos, ou seja, que apresentou baixa ou nenhuma similaridade foi formado pelas coletas: C14 e C15, e amostras: A1 e A2.

A menor similaridade do grupo três com os outros grupos pode estar relacionada a distribuição e tamanho dos grãos com a redução do fluxo na seção transversal. As coletas apresentadas no grupo três foram as últimas realizadas, sendo que nesse período de amostragem as vazões e o perímetro molhado da seção encontravam-se bastante reduzidos em relação as primeiras amostragens, com o surgimento do banco de areia onde realizou-se a segunda amostragem do sedimento do leito. Apresentando correlação negativa significativa ($r = 0,61$; $p < 0,01$), o fato da maior deposição de sedimentos de fundo ocorrer em vazão reduzida, pode ser observado e comprovado na Figura 19, onde menor vazão acarretou em maior não uniformidade dos sedimentos, desse modo, os resultados corroboram com as alegações anteriores sobre a estabilidade dos canais fluviais.

Figura 18 - Dendrograma com grupos de coletas realizadas na bacia do riacho Cachoeira, formado com base na distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo.

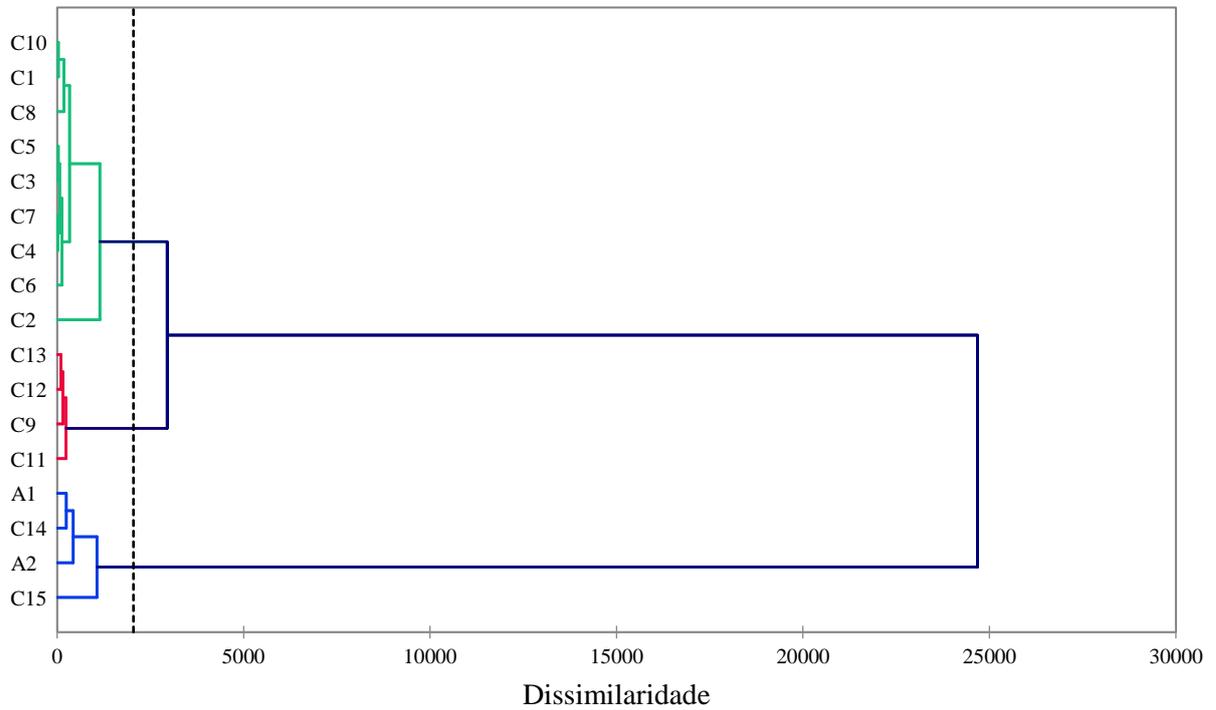
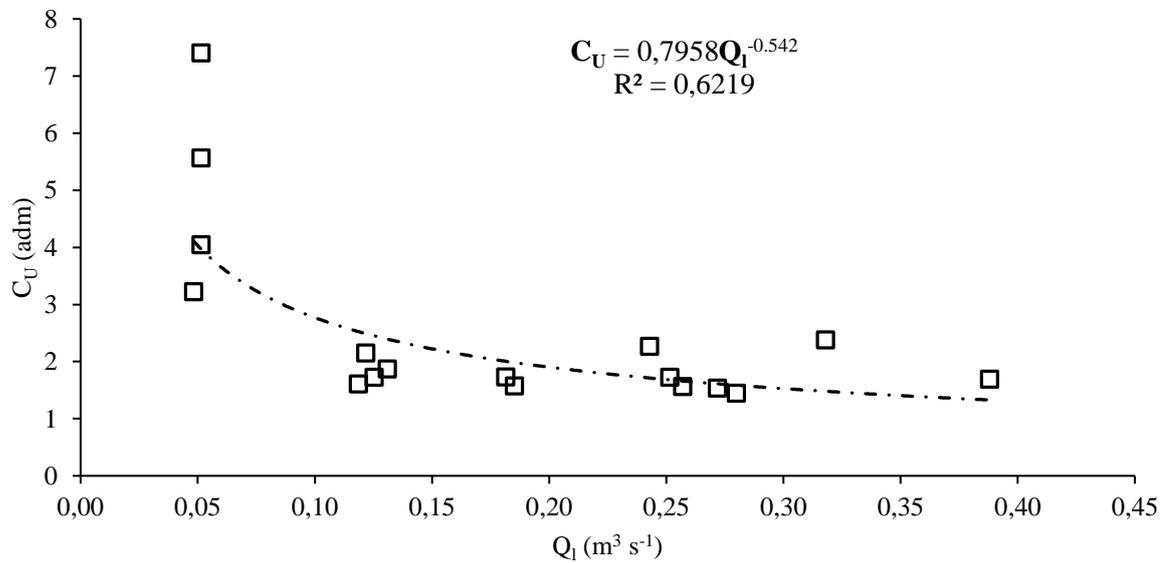


Figura 19 - Relação entre vazão (Q_1) e coeficiente de uniformidade (C_u) das partículas.



5.4 Resistência hidráulica da vegetação e transporte de sedimentos do riacho Cachoeira

A partir da relação entre a velocidade do fluxo e a relação de submersão ($U_m \times S_r$) foram definidas as zonas de cisalhamento e fluxo livre, como descrito por Raupach et al. (1996), no qual explica o comportamento do fluxo sobre a vegetação e, a resistência exercida pela vegetação ao escoamento (Figura 20). Na seção transversal, o efeito da vegetação foi analisado nas margens direita e esquerda, onde, as hastes da *I. pes-caprae* concentraram-se até 0,40 m e 1,20 m das margens, respectivamente. Na margem direita, a partir da relação $U_m \times S_r$ foram encontradas as zonas de cisalhamento ($S_r > 1,0$) e de fluxo livre ($0,32 < S_r < 1,0$), além da zona de transição entre o comportamento submerso e emerso da vegetação ao fluxo ($S_r = 1$) (Figura 20a). Na margem esquerda, a vegetação apresentou-se emersa durante os quinze dias de campanha, ou seja, com relação de submersão abaixo de um (Figura 20b).

Cantalice et al. (2015) encontraram valores de S_r para zona de cisalhamento de 0,6 a 1 e para zona de fluxo livre de 1 a 2, num trecho vegetado do riacho Jacú, em bacia semiárida de Pernambuco. Silva Filho et al. (2019) avaliaram o riacho Cachoeira no ano de 2018, durante o período de 03 a 06 de abril, obtendo valores de S_r para zona de cisalhamento entre 0,2 e 1. Resultado semelhante descrito pelos autores anteriormente, foram encontrados para o ano de 2019.

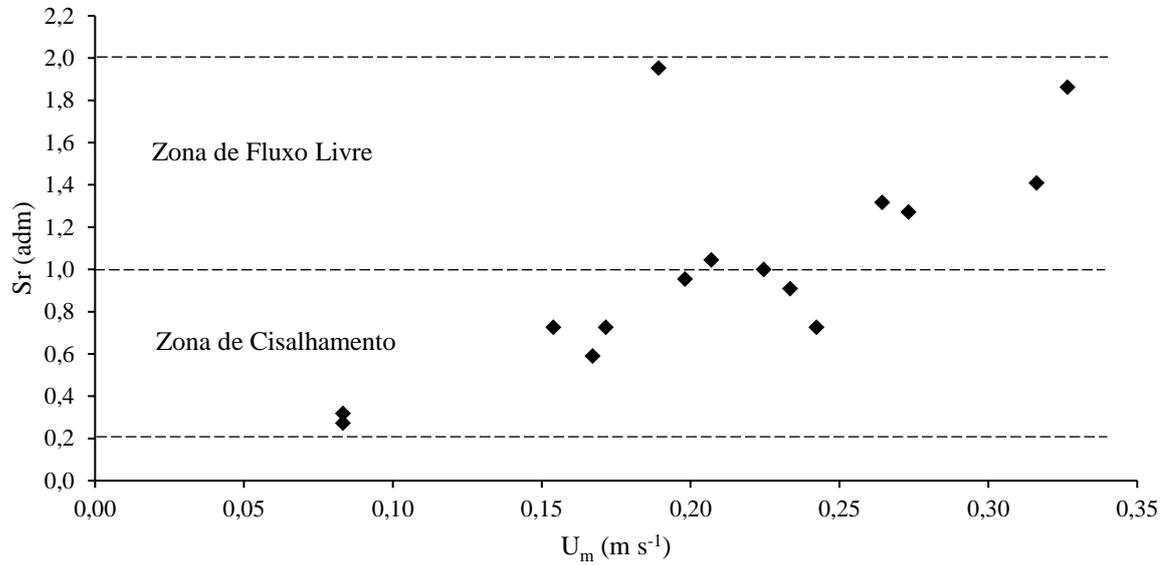
A altura média da vegetação de *I. pes-caprae* foi de 0,24 m e a altura máxima 0,36 m, sendo medida a partir da parte inferior das hastes ($\bar{\phi} = 6$ mm) até as folhas das plantas presentes no leito do rio. Entretanto, nas margens direita e esquerda foram encontradas alturas médias de 0,22 m e 0,26 m, respectivamente. Essas dimensões são bastante semelhantes as encontradas por Cantalice et al. (2015) em estudo realizado em canal natural vegetado situado no semiárido de Pernambuco.

Os parâmetros hidráulicos apresentaram variação durante o monitoramento: coeficiente de rugosidade de Manning (n) de 0,10 $m^{-1/3}$ (0,06-0,14 $m^{-1/3}$; $\pm 0,02$); coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f) de 1,31 adm. (0,56-2,36 adm.; $\pm 0,44$); tensão de cisalhamento (τ) de 9,47 $N m^{-2}$ (4,22-16,33 $N m^{-2}$; $\pm 3,18$) (Tabela 7).

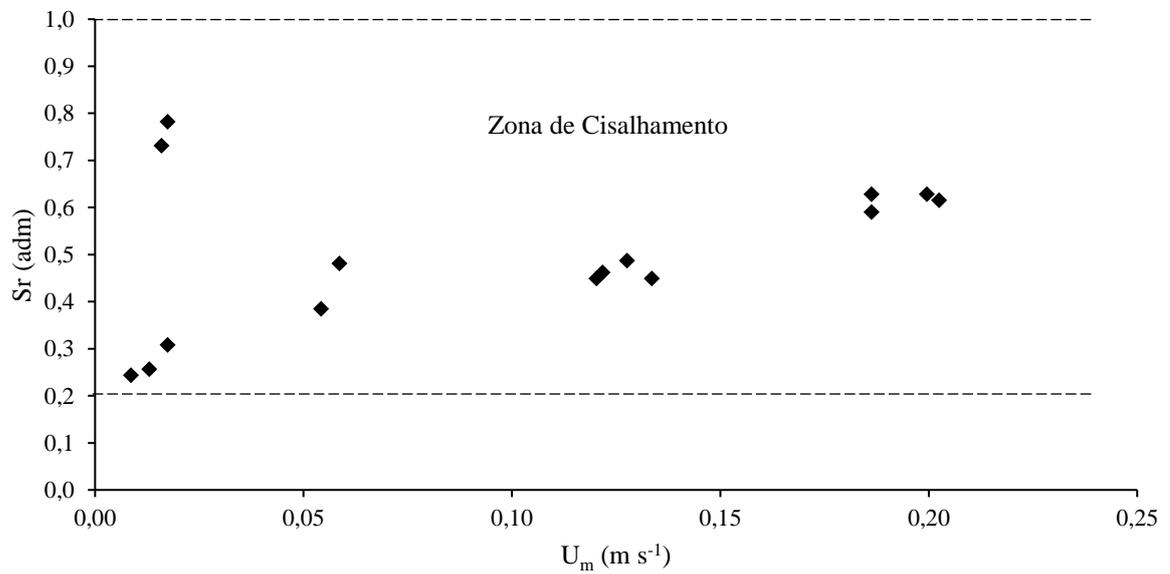
Com base nos resultados experimentais, o coeficiente de arrasto vegetal C_D e a tensão de arrasto vegetal τ_{veg} da *I. pes-caprae* apresentaram estados diferentes em função da condição de submersão da vegetação apresentada nas margens esquerda e direita (Tabela 7).

Figura 20 - Relação de submersão (S_r) – h/H_v (profundidade do fluxo/altura média da vegetação) com a velocidade média do escoamento (U_m) das margens direita (a) e esquerda (b) do riacho Cachoeira sob arranjo vegetal natural da espécie *Ipomoea pes-caprae*.

a)



b)



Os parâmetros de cada condição da vegetação determinados para os dois estados de submersão na margem direita e um estado de submersão na margem esquerda por Wu, Fu-Chun et al., 1999, são mostrados da seguinte forma: na margem direita, $S_r = 1,95 - 1,05$ adm; $C_D = 4,71 - 2,11 \text{ m}^{-1}$; $\tau_{veg} = 19,44 - 19,44 \text{ N m}^{-2}$, a vegetação submersa apresenta baixo coeficiente de arrasto vegetal, entretanto, apresenta maior força de arrasto exercida na vegetação (Tabela 7). Isso indica, que mesmo estando na zona de fluxo livre, onde as forças gravitacionais do fluxo atuam com maior energia e além da menor quantidade de hastes, a área de projeção efetiva da vegetação atua na direção normal do fluxo, criando barreiras ao escoamento e a formação de vortex na zona de mistura, o que pode acarretar em maior dispersão dos sedimentos, além de efeito erosivo nas margens do riacho.

Silva et al. (2016) em seu estudo desenvolvido na bacia hidrográfica do Capibaribe, avaliando uma seção transversal vegetada e a mesma seção após a retirada da vegetação, constatou que ocorreu uma redução a tensão de cisalhamento na avaliação da seção com a presença da vegetação.

Na margem direita existe uma fronteira entre a vegetação e o fluxo onde atua uma força cisalhante que tende a equilibrar a força gravitacional na zona de fluxo livre, sendo que nesta condição $S_r = 1,00$ adm.; $C_D = 1,71 \text{ m}^{-1}$ e $\tau_{veg} = 0,39 \text{ N m}^{-2}$ (Tabela 7). Para a condição emersa na margem direita, no qual, a força de arrasto atua através da vegetação para resistir à força de cisalhamento, a condição fluxo é $S_r = 0,95 - 0,27$; $C_D = 2,20 - 12,46 \text{ m}^{-1}$; $\tau_{veg} = 0,31 - 1,94 \text{ N m}^{-2}$. Observa-se que com diminuição da relação de submersão (S_r), ou seja, maior altura da vegetação em relação ao fluxo, maiores os coeficientes e tensões de arraste vegetal. A relação S_r na margem direita, demonstra um estado de oscilação. Cantalice et al. (2015) destacam que o estresse causado pela presença da vegetação acarreta em variações de velocidade de escoamento, por isso nem todos dos perfis de velocidade seguem uma lei logarítmica.

Na margem esquerda, observou-se apenas a condição de vegetação emersa, caracterizada pelos maiores valores do coeficiente de arrasto, fato devido ao maior número de hastes e maior densidade de plantas, sendo o efeito da vegetação no barramento ao escoamento expressivamente maior. De acordo com Lee et al. (2004), as características vegetativas que influenciam o arrasto exercido pela vegetação ao fluxo, são principalmente a distribuição espacialmente, forma, dimensão, rigidez e população de plantas por unidade de área.

De modo geral, observou-se que o coeficiente de arraste vegetal (C_D) de Wu Fu-Chun et al. (1999) apresentou correlação negativa significativa com U_m ($r = -0,88$; $p < 0,01$) e Q_1 ($r = -0,57$; $p < 0,10$) (Tabela 8), como também, apresentando boa regressão não-linear exponencial

com ambas as variáveis (Figuras 21a, 21b). Nepf (2012) ressalta que o coeficiente de arrasto varia inversamente com a velocidade média do fluxo. Liu e Zeng (2016) afirmam que a vegetação no meio aquático aumenta a resistência do fluxo afetando a velocidade da descarga líquida.

Entretanto, a tensão de arraste vegetal apresentou apenas correlação positiva significativa com a descarga líquida, sendo ausente alguma significância com as descargas sólidas (Tabela 7; Figura 22). O C_D da vegetação foi utilizado como parâmetro chave para entender a distribuição vertical da velocidade de fluxo (WU FU-SHENG, 2008), enquanto que Cassan, Roux e Garambois (2017) destacam que as variações no perfil de velocidade estão diretamente ligadas aos elementos rugosos do leito e ao coeficiente de arrasto. De acordo com James et al. (2001), o diâmetro e a densidade da haste são considerados características fundamentais no controle do transporte de carga de sedimentos em canais abertos. A influência do C_D na dinâmica fluvial, tendo a vegetação aquática impacto hidráulico na capacidade de transporte de fluxo (BUSARI; LI, 2015), ou seja, conforme o C_D diminui a resistência da vegetação ao fluxo diminui provocando uma elevação no valor do número de U_m e Q_l . A capacidade de transporte de carga dos cursos d'água diminui com o aumento da resistência ao fluxo devido à vegetação emergente (JAMES et al., 2002). Os resultados comprovam o efeito da vegetação na redução da velocidade de fluxo, entretanto, a obtenção de correlações significativas entre o coeficiente e a tensão de arraste vegetal com a descarga sólida, ainda são difíceis.

Tabela 7 - Variáveis de resistência ao escoamento na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE, nas condições de submersão e emersão de *Ipomoea pes-caprae* (Salsa de praia). Detalhes da abreviação: S_r = relação de submersão; C_D = coeficiente de arraste da vegetação; τ_{veg} = tensão de arraste da vegetação.

Margem direita		Coleta	S_r	C_D	τ_{veg}	Margem esquerda		Coleta	S_r	C_D	τ_{veg}	τ	n	f
			adm,	m^{-1}	$N m^{-2}$				adm,	m^{-1}	$N m^{-2}$	$N m^{-2}$	$m^{-1/3}$	adm
Zona de Fluxo Livre	Emersa	C13	1,95	4,71	19,44	Zona de Cisalhamento	Submersa	C1	0,78	284,08	1,02	4,22	0,06	0,56
		C1	1,86	1,51	19,43			C13	0,73	338,92	1,08	9,00	0,09	1,10
		C4	1,41	1,22	19,44			C10	0,63	2,49	1,87	8,57	0,11	1,53
		C2	1,32	1,63	19,44			C11	0,63	2,17	1,87	8,23	0,09	1,05
		C3	1,27	1,47	19,44			C9	0,62	2,10	1,90	8,01	0,09	1,18
		C6	1,05	2,11	19,44			C12	0,59	2,49	1,97	7,54	0,09	1,18
Transição		C8	1,00	1,71	0,39			C5	0,49	5,30	1,39	4,42	0,06	0,65
Zona de Cisalhamento	Submersa	C5	0,95	2,20	0,31			C14	0,48	25,08	3,13	8,45	0,10	1,34
		C7	0,91	1,58	0,43			C6	0,46	5,82	1,43	13,91	0,14	2,36
		C9	0,73	1,47	0,62			C7	0,45	4,84	1,95	16,33	0,13	1,83
		C10	0,73	2,93	0,62			C8	0,45	5,97	1,97	10,91	0,12	1,67
		C11	0,73	3,64	0,62			C15	0,38	29,33	3,68	10,43	0,10	1,33
		C12	0,59	3,09	0,76	C3	0,31	284,08	2,25	10,28	0,10	1,26		
		C15	0,32	12,46	1,67	C2	0,26	509,70	2,22	9,41	0,10	1,19		
		C14	0,27	12,46	1,94	C4	0,24	1168,29	2,63	12,38	0,11	1,50		

Tabela 8 - Correlação entre variáveis hidráulicas, descarga sólida e rugosidade vegetal. Detalhes da abreviação: C_D = coeficiente de arraste da vegetação; τ_{veg} = tensão de arraste da vegetação; U_m = velocidade média do escoamento; Q_l = vazão; C_{SS} = concentração de sedimentos em suspensão; Descarga sólida em suspensão; Q_{SS} = descarga sólida de fundo. (*) $p < 0,01$; (**) $p < 0,05$; (***) $p < 0,10$.

Margem Direita	C_D	τ_{veg}	U_m	Q_l	C_{SS}	Q_{SS}	Q_{SF}
C_D	1						
F_D	-0,316	1					
U_m	-0,881*	0,531	1				
Q_l	-0,569***	0,875*	0,798*	1			
C_{SS}	0,296	-0,439	-0,298	-0,424	1		
Q_{SS}	-0,335	0,208	0,225	0,280	0,273	1	
Q_{SF}	-0,320	0,529***	0,533***	0,627**	-0,067	0,483	1
Margem Esquerda	C_D	τ_{veg}	U_m	Q_l	C_{SS}	Q_{SS}	Q_{SF}
C_D	1						
τ_{veg}	0,191	1					
U_m	-0,663**	-0,029	1				
Q_l	-0,662**	-0,172	0,982*	1			
C_{SS}	-0,025	-0,201	0,097	0,226	1		
Q_{SS}	-0,258	-0,191	0,325	0,418	0,898*	1	
Q_{SF}	0,096	-0,469	-0,144	-0,016	0,336	0,155	1

Figura 21 - Coeficiente de arraste vegetal (C_D) em relação a velocidade média do escoamento (U_m) nas margens direita (a) e esquerda (b) da seção transversal do riacho Cachoeira.

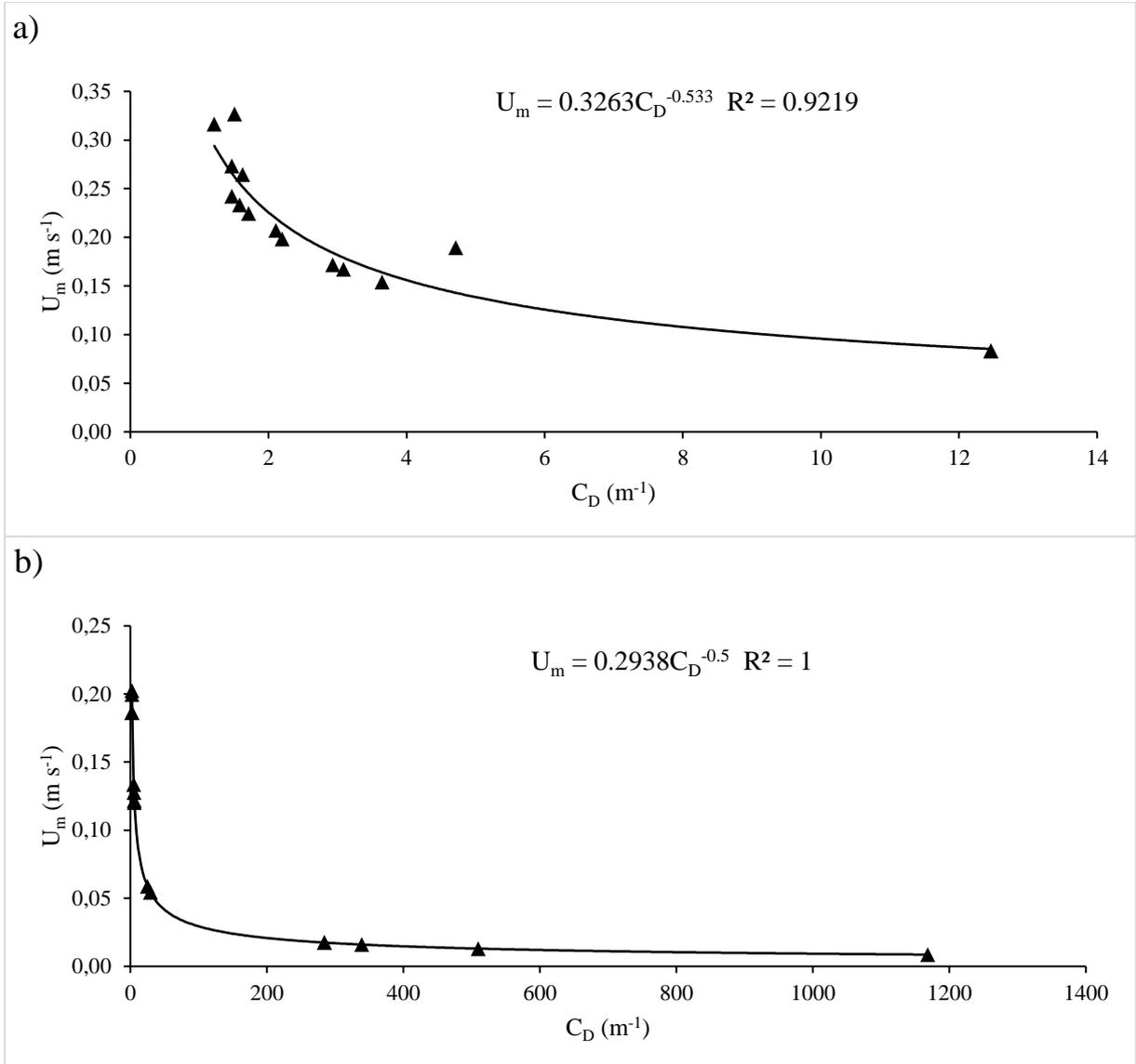
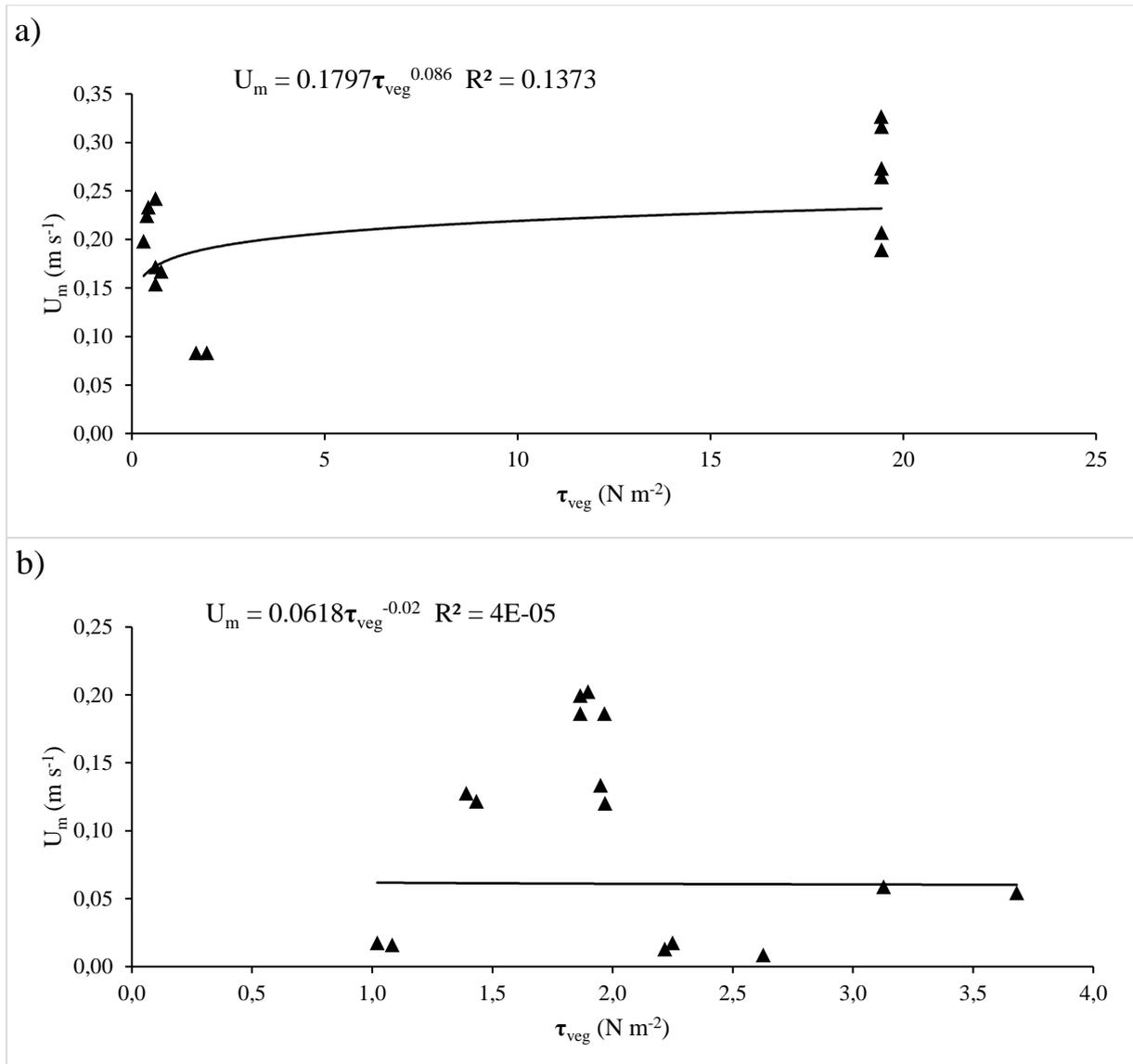


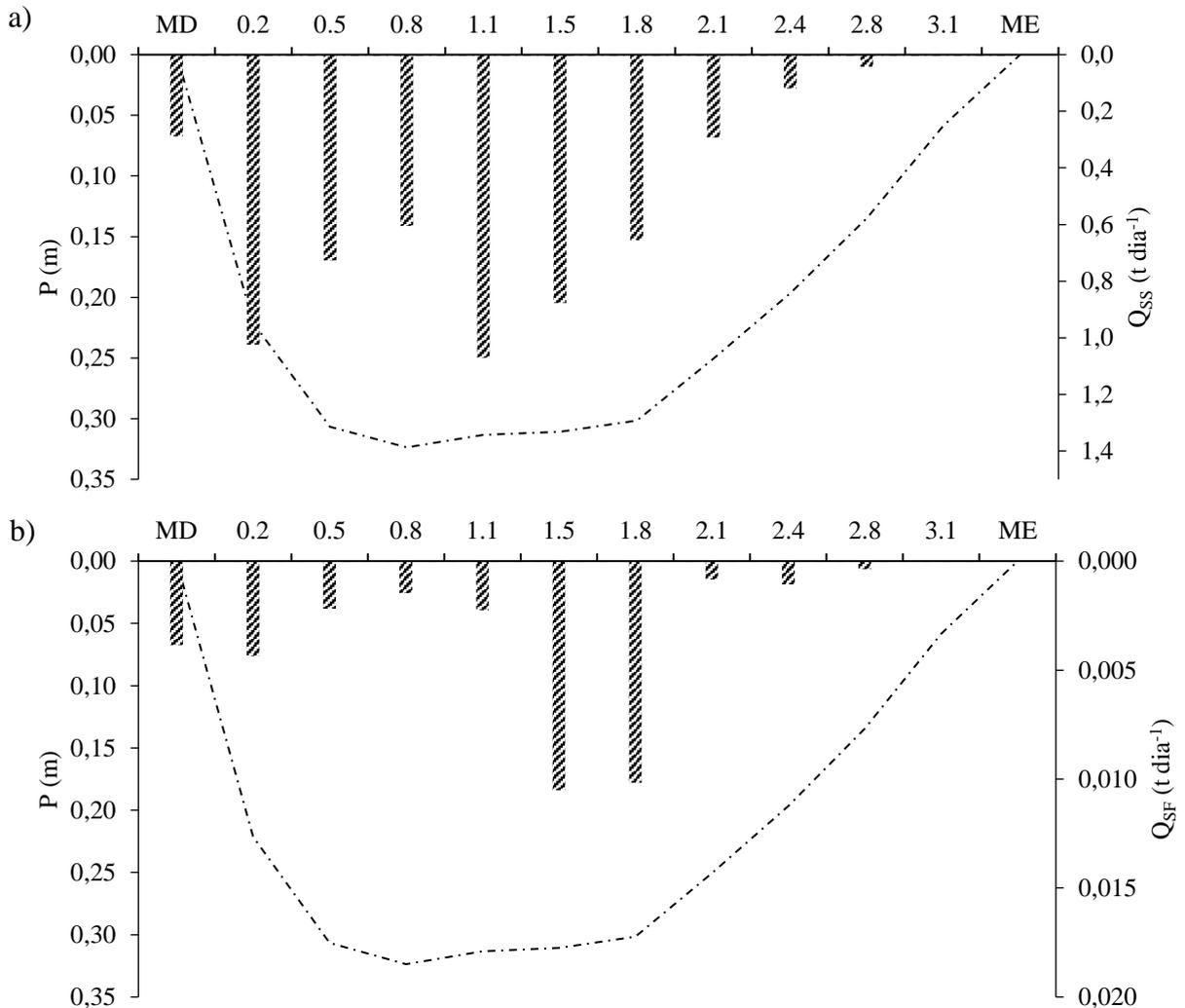
Figura 22 - Tensão de arraste vegetal (τ_{veg}) em relação a velocidade média do escoamento (U_m) nas margens direita (a) e esquerda (b) da seção transversal do riacho Cachoeira.



5.5 Transporte de sedimento suspenso e de fundo e curvas-chave do riacho Cachoeira

Na Tabela 8 são apresentados os resultados das 15 medições de descarga líquida e sólida obtidos na seção transversal do riacho Cachoeira, na cidade de Tabira, Pernambuco. Observou-se no perfil longitudinal da seção em estudo que as maiores Q_{SS} (1,02 e 1,07 $t\ dia^{-1}$) foram encontradas entre 0,31-0,32 m de profundidade e, menor valor (0,04 $m\ s^{-1}$) na menor profundidade (0,06 m) (Figura 30a). Entretanto, maiores valores de Q_{SF} (0,010 e 0,011 $t\ dia^{-1}$) foram encontrados no centro da seção, mas, no sentido da margem esquerda (parte mais rasa da seção) e, em todos os outros pontos foram encontrados baixos valores (0,00-0,004 $t\ dia^{-1}$) (Figura 30b).

Figura 23 - Relação entre a seção média, descarga sólida em suspensão (a) e descarga sólida de fundo (b) em cada vertical, na seção transversal do riacho Cachoeira, Tabira-PE. Detalhes da abreviação: P = profundidade; Q_{SS} = descarga sólida em suspensão e Q_{SF} = de descarga sólida de fundo.



Os parâmetros sedimentométricos apresentaram variação durante o monitoramento: concentração de sedimentos suspensos (C_{SS}) de 395,13 $mg\ L^{-1}$ (30,60-1.021,50 $mg\ L^{-1}$;

$\pm 285,80$); descarga sólida em suspensão (Q_{SS}) de $6,23 \text{ t dia}^{-1}$ ($0,34\text{-}12,41 \text{ t dia}^{-1}$; $\pm 3,68$); produção de sedimento em suspensão (Y_{SS}) de $0,126 \text{ t dia}^{-1}$ ($0,007\text{-}0,251 \text{ t dia}^{-1}$; $\pm 0,07$); descarga sólida de fundo (Q_{SF}) de $0,069 \text{ t dia}^{-1}$ ($0,011\text{-}0,387 \text{ t dia}^{-1}$; $\pm 0,10$); produção de sedimento de fundo (Y_{SF}) de $0,0009 \text{ t dia}^{-1}$ ($0,0002\text{-}0,0032 \text{ t dia}^{-1}$; $\pm 0,001$) e a produção de sedimento total (Y_{ST}) de $0,127 \text{ t dia}^{-1}$ ($0,007\text{-}0,252 \text{ t dia}^{-1}$; $\pm 0,07$) (Tabela 8). Silva et al. (2011) obtiveram valores de C_{SS} entre $58,97$ e $550,10 \text{ mg L}^{-1}$ em bacia representativa do semiárido de Pernambuco, com área de 12.436 ha , aproximadamente duas vezes maior que a bacia estudada ($6.823,53 \text{ ha}$). Já Cantalice et al. (2013) em uma bacia do semiárido de Pernambuco com área de 53.737 ha , obtiveram valores de C_{SS} variando entre 217 a 4.847 mg L^{-1} , valores bastante elevados, proporcionais ao tamanho e as características hidráulicas da bacia. Estes autores também encontraram vazões entre $0,53$ e $32,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sendo a maior e a menor descarga sólida em suspensão obtidas na primeira e última coleta respectivamente, no período de $26/03/2008$ a $16/05/2008$ no rio Exu, Semiárido de Pernambuco.

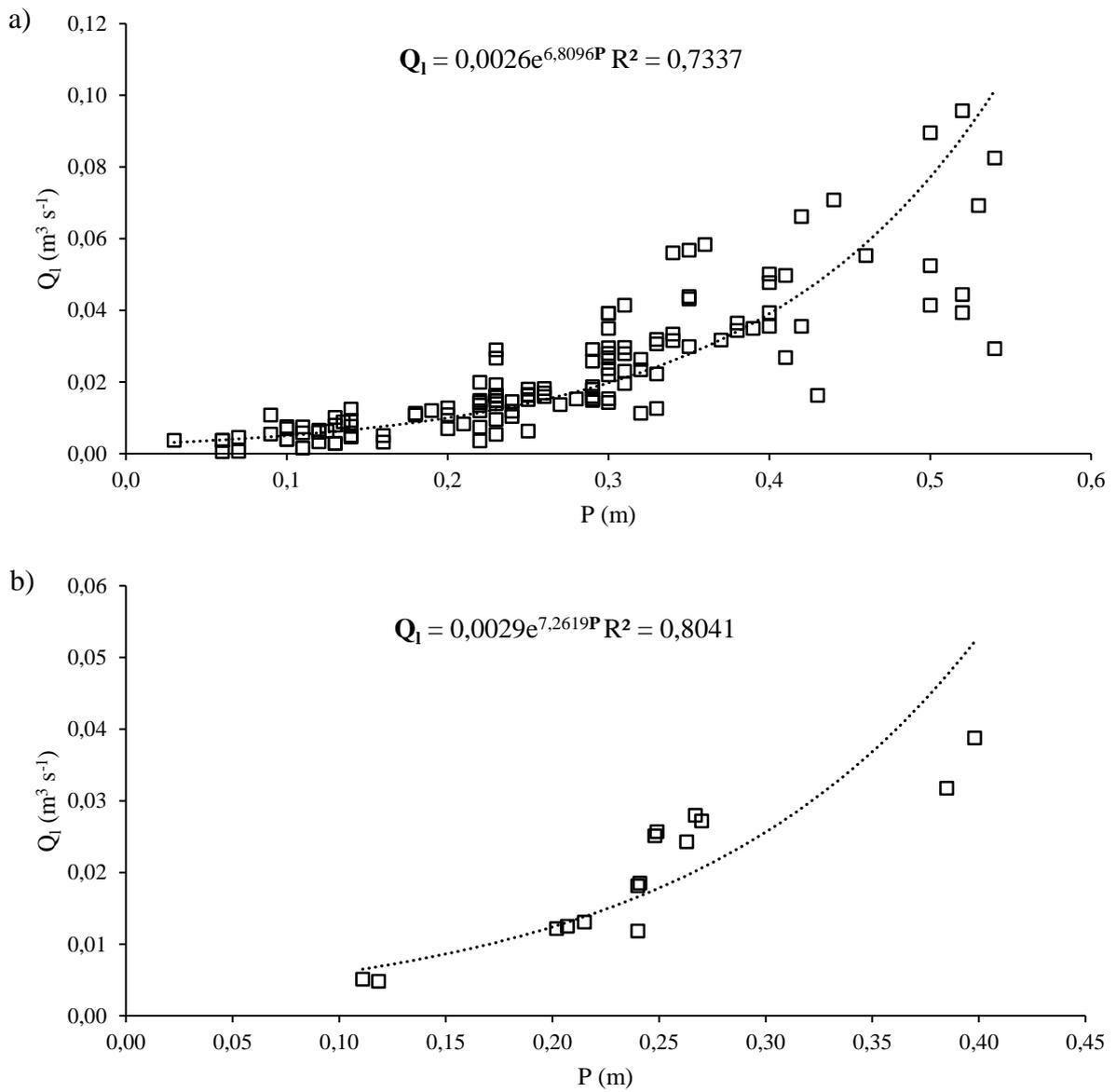
Os totais para o período estudado no riacho Cachoeira foram: Q_I ($2,96 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$); C_{SS} ($5926,91 \text{ mg L}^{-1}$); Q_{SS} ($93,47 \text{ t dia}^{-1}$); Y_{SS} ($1,89 \text{ t dia}^{-1}$); Q_{SF} ($1,03 \text{ t dia}^{-1}$); Y_{SF} ($0,0136 \text{ t dia}^{-1}$) e Y_{ST} ($1,90 \text{ t dia}^{-1}$). Constatou-se que 99% de toda a descarga sólida produzida correspondeu ao sedimento em suspensão. Segundo Yang, (1996), a taxa de sedimento suspenso é cerca de 75-95% do total de sedimentos transportados em um corpo hídrico. Esse comportamento também está de acordo com o descrito por Merten e Poletto (2006), onde cerca de 90% de todo sedimento transportado em uma bacia hidrográfica por carga de suspensão, dá-se no período chuvoso. Os picos da Q_{SF} observados na relação Q_{SF}/Q_{SS} demonstram a variabilidade desses sedimentos nos rios de regiões Semiáridas (ACHITE; OUIILLON, 2007). Assim como na Q_{SS} os valores de Q_{SF} obtidos na margem direita (onde apresenta maior densidade vegetal) são maiores que os da margem esquerda, isso também pode ter favorecido os maiores valores observados na posição central da seção, onde a presença da vegetação é reduzida. As amostras individuais de cada vertical por evento amostrado apresentaram valores de coeficiente Box em sua maioria satisfatórios, quando o ideal é estar entre $0,9$ e $1,2$ e aceitáveis entre $0,67$ e $1,5$ (GRAY, 2005), indicando que as C_{SS} do riacho Cachoeira foram consideradas suficientemente precisas.

Tabela 9 - Variáveis de transporte e produção de sedimentos das campanhas de medição. Detalhes da abreviação: QI = vazão; CSS = concentração de sedimentos suspensos; QSS = descarga sólida em suspensão; YSS = produção de sedimento em suspensão; QSF = descarga sólida de fundo; Y_{SF} = produção de sedimento de fundo; Y_{ST} = produção de sedimento total e BC = coeficiente box.

Coleta	Data	Q _I	C _{SS}	Q _{SS}	Y _{SS}	Q _{SF}	Y _{SF}	Y _{ST}	(Q _{SF} /Q _{SS})x100	BC
		m ³ s ⁻¹	mg L ⁻¹	t dia ⁻¹					%	Adm
1	08/04/19	0,388	310,68	10,19	0,206	0,087	0,0018	0,208	0,86	0,84 - 1,17
2	09/04/19	0,243	345,27	7,30	0,148	0,011	0,0002	0,148	0,15	0,85 - 1,18
3	09/04/19	0,272	388,69	9,80	0,198	0,047	0,0009	0,199	0,48	0,78 - 1,24
4	09/04/19	0,280	378,85	9,12	0,184	0,387	0,0007	0,185	4,24	0,78 - 1,28
5	10/04/19	0,257	269,12	6,75	0,136	0,028	0,0006	0,137	0,41	0,67 - 1,24
6	10/04/19	0,251	326,76	6,74	0,136	0,011	0,0002	0,136	0,17	0,69 - 1,87
7	10/04/19	0,185	254,28	3,93	0,079	0,044	0,0009	0,080	1,13	0,42 - 5,26
8	10/04/19	0,182	447,96	1,27	0,026	0,012	0,0002	0,026	0,97	0,19 - 0,88
9	11/04/19	0,115	59,81	7,18	0,145	0,069	0,0014	0,147	0,97	0,46 - 1,81
10	11/04/19	0,119	30,60	4,88	0,099	0,011	0,0002	0,099	0,22	0,66 - 1,27
11	11/04/19	0,125	374,25	0,50	0,010	0,055	0,0011	0,011	10,96	0,25 - 0,55
12	11/04/19	0,122	30,60	0,34	0,007	0,029	0,0006	0,007	8,58	0,13 - 0,44
13	12/04/19	0,318	374,25	9,09	0,184	0,032	0,0007	0,184	0,36	0,52 - 1,49
14	16/04/19	0,048	1.021,50	12,41	0,251	0,044	0,0009	0,252	0,35	0,57 - 2,69
15	16/04/19	0,051	879,03	3,99	0,081	0,160	0,0032	0,084	4,02	0,63 - 2,17
Máximo		0,388	1.021,50	12,41	0,251	0,387	0,0032	0,252	10,96	
Mínimo		0,048	30,60	0,34	0,007	0,011	0,0002	0,007	0,15	
Média		0,197	395,13	6,23	0,126	0,069	0,0009	0,127	2,26	
Mediana		0,185	345,27	6,75	0,136	0,044	0,0007	0,137	0,86	
Desvio Padrão		0,10	285,80	3,68	0,07	0,10	0,001	0,07	3,34	
CV (%)		50,67	72,33	59,12	59,12	140,37	86,55	58,71	147,97	

As curvas-chave obtidas das 15 campanhas de medição direta realizadas durante a estação chuvosa de 2019 no riacho Cachoeira, referente às relações $P \times Q_I$, é apresentada na Figura 31. Houve correlação positiva significativa entre as profundidades e vazões dos 132 pontos amostrados ($r = 0,83$; $p < 0,01$) e das 15 campanhas de medição ($r = 0,92$; $p < 0,01$) (Figuras 31a e 31b). Cantalice et al. (2013) em estudo realizado na bacia semiárida do riacho Exu, obtiveram curva-chave $P \times Q_I$ de função potencial com coeficiente de determinação (R^2) de 0,975, referente a 76 medições diretas. A explicabilidade da regressão não linear obtida pelos autores foi maior do que a encontrada neste trabalho ($R^2 = 0,7337$). Isso, devido a maior variabilidade dos dados observados, quando se utilizou dos 132 pontos amostrados, entretanto, quando se utiliza as médias dos valores das campanhas, o ajuste da regressão não linear aumenta para 80%.

Figura 24 - Curvas de classificação profundidade (P) - descarga líquida (Q_l) do riacho Cachoeira, Tabira-PE. a) n = 132 pontos amostrais; b) n = 15 campanhas.



6 CONCLUSÕES

O riacho Cachoeira mostra um padrão de distribuição de velocidade e vazão típicos de inundações canalizadas, após eventos de precipitação de picos múltiplos em curto espaço de tempo, bem como, dependente da geometria e presença da vegetação na seção transversal.

A relação granulométrica dos sedimentos amostrados e coletados no leito e em banco de sedimentos avaliada através de análise de cluster, expressam a relação do transporte de sedimentos do leito com a redução do fluxo e consequente capacidade de transporte.

O efeito da resistência hidráulica gerado por *Ipomoea pescaprae* (Salsa de praia) na seção transversal do riacho Cachoeira bem observado pelo modelo matemático aplicado de Wu Fu-Chun et al. (1999) (C_D Wu), com ajustes de regressão acima de 90% para as relações entre os parâmetros de rugosidade avaliados.

As descargas sólidas em suspensão e de fundo do riacho Cachoeira apresentaram distribuição em função da geometria e presença da vegetação na seção transversal, já que, as curvas-chave com as descargas líquida não apresentaram bom ajustes de regressão.

Este trabalho contribuiu para o conhecimento da variação temporal do transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica semiárida, bem como os métodos mais adequados para avaliar a rugosidade hidráulica ao escoamento provocada pela vegetação presente na seção transversal do riacho Cachoeira.

Recomenda-se a continuidade do trabalho na seção transversal e em outros pontos possíveis de amostragem, visando obter maiores informações para uma série de longos dados, para futuras simulações sedimentométricas no riacho Cachoeira, Tabira-PE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHITE, M.; OUIILLON, S. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). **Journal of hydrology**. v. 343, p. 187– 202, 2007.
- AJU, P. C. Why rehabilitation, restoration and protection of watershed forests in Nigeria should be given a priority attention. **Journal of Research in Forestry: Wildlife and Environment**, v. 9, n. 2, p.36-43, jun. 2017.
- ALBUQUERQUE, A. R. C. Bacia Hidrográfica: Unidade de Planejamento Ambiental. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.4, n.4, p.201 – 209, 2012.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711–728, 2014.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>
- ATTANASIO, C. M. **Plano de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade**. 2004. 2, 17, 29, 30, 33, 36p Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo. 2004.
- BATALLA, R. J.; VERICAT, D. A review of sediment quantity issues: Examples from the River Ebro and adjacent basins (Northeastern Spain). **Integrated Environmental Assessment And Management**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.256-268, 3 ago. 2010. <http://dx.doi.org/10.1002/ieam.126>.
- BUSARI, A. O.; LI, C. W. A hydraulic roughness model for submerged flexible vegetation with uncertainty estimation. **Journal of Hydro-environment Research**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.268-280, jun. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2014.06.005>.
- CANTALICE, J. R. B.; FILHO, C. M.; STOSIC, D. B.; PISCOYA, C. V.; GUERRA, S. M. S.; SINGH, P. Relationship between bedload and suspended sediment in the sand-bed Exu River, in the semi-arid region of Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 58, n. 8, p.1789-1802, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.839875>.
- CANTALICE, J. R. B.; MELO, R. O.; SILVA, Y. J. A. B. Hydraulic roughness due to submerged, emergent and flexible natural vegetation in a semiarid alluvial channel. **Journal of Arid Environments**, [s.l.], v. 114, p.1-7, mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.10.012>.
- CAROLLO, F. G.; FERRO, V.; TERMINI, D. Flow Resistance Law in Channels with Flexible Submerged Vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 131, n. 7, p.554-564, jul. 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2005\)131:7\(554\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:7(554)).

- CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, p.599. 2008.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. p.25, 55-60,372.
- CASSAN, L.; ROUX, H.; GARAMBOIS, P. A Semi-Analytical Model for the Hydraulic Resistance Due to Macro-Roughnesses of Varying Shapes and Densities. **Water**, [s.l.], v. 9, n. 9, p.637-655, 25 ago. 2017.
- CAVALCANTE, D. M. **Processos de decomposição de resíduos vegetais em ambiente semiárido**. 2018. 117 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco/Sede-Recife. 2018.
- CHENG, L. Flow structure and sediment transport with impacts of aquatic vegetation. **Journal of Hydrodynamics**, v.20, n.4, p.461-468, 2008.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, DR. M. L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill; 1988.
- CRISPIM, A. B.; SOUZA, N. M.; SILVA, V. E.; QUEIRÓZ, B. P. H. A questão da seca no semiárido nordestino e a visão reducionista do estado: a necessidade da desnaturalização dos problemas socioambientais. **Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.39-59, 2016.
- DEVI, T. B.; KUMAR, B. Turbulent flow statistics of vegetative channel with seepage. **Journal of Applied Geophysics**, v. 123, p. 267-276, 2015. doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.11.002
- DING, J.; RICHARDS, K. Preliminary modelling of sediment production and delivery in the Xihanshui River basin, Gansu, China. **Catena**, [s.l.], v. 79, n. 3, p.277-287, dez. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.014>.
- DOWNING, J. A.; PRAIRIE, Y. T.; COLE, J. J.; DUARTE, C. M.; TRANVIK, L. J.; STRIEGL, R. G.; MCDOWELL, W. H.; KORTELAJINEN, P.; CARACO, N. F.; MELACK, J. M.; MIDDELBURG, J. J. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. **Limnology And Oceanography**, [s.l.], v. 51, n. 5, p.2388-2397, set. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>.
- EDWARDS, T.K.; GLYSSON, G.D. **Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment**. In: Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia 1999
- EINSTEIN, H. A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. Washington: USDA Technical Bulletin, 65p., 1950.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FAO (2008): Forests and Water. FAO Forestry Paper 155: 38 – 43

FILHO, S. J. A.; CANTALICE, J. R. B.; GUERRA, S. M. S.; NUNES, E. O. S.; SANTOS, J. C. P.; CORRÊA, M. M.; JÚNIOR, G. B.; JUNIOR, V. P. S. Drag coefficient and hydraulic roughness generated by an aquatic vegetation patch in a semi-arid alluvial channel. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 141, p.105598-105608, dez. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105598>.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M.; GAVA, C. A. T. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física** n. 06, p. 1233-1253, 2011.

GOMES, J.P.M.; MERTEN, G.H. & RIBEIRO, G.S. **Estimativa da umidade antecedente do solo e sua influência na produção de sedimentos**. VII ENES. Porto alegre. 2006.

GRAY, Andrew B. The impact of persistent dynamics on suspended sediment load estimation. **Geomorphology**, [s.l.], v. 322, p.132-147, dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.001>.

GRAY, J. R. **Sediment Data Collection Techniques**. Washington: United States Geological Survey, 35 p., 2005.

GREGORY, S. The definition of wet and dry periods for discrete regional units. **Weather, Hoboken**, v. 34, 1979.

GURNELL, A. Plants as river system engineers. **Earth Surface Processes And Landforms**, [s.l.], v. 39, n. 1, p.4-25, 16 abr. 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3397>.

HABERSACK, H.; KREISLER, A.; RINDLER, R.; AIGNER, J.; SEITZ, H.; LIEDERMANN, M.; LARONNE, J.B. Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers. **Geomorphology**, [s.l.], v. 291, p.80-93, ago. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.020>.

HASSAN, M. A.; CHURCH, M.; LISLE, T.; BRARDINONI, F.; BENDA, L.; GRANT, G. E. Sediment transport and channel morphology of small, forested streams. **Journal of The American Water Resources Association**, [s.l.], p.853-876, jan. 2005.

HOLLANDA, M. P.; CECÍLIO, R. A.; CAMPANHARO, W. A.; ZANETTI S. S.; ANDRADE, L. N.; GARCIA, G. de O. Avaliação do TOPMODEL na estimativa do escoamento superficial em microbacia hidrográfica em diferentes usos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 19, n. 5, p.489-496, maio 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p489-496>.

HUI, E; HU, X.; JIANG, C; MA, F.; ZHU, Z. A Study of Drag Coefficient Related with Vegetation Based on the Flume Experiment. **Journal of hydrodynamics**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.329-337, jun. 2010. [http://dx.doi.org/10.1016/s1001-6058\(09\)60062-7](http://dx.doi.org/10.1016/s1001-6058(09)60062-7).

INSA, Instituto Nacional do Semiárido. **Censo Demográfico do Semiárido Brasileiro**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2012 Disponível em: < <https://portal.insa.gov.br/acervo-livros/198-sinopse-do-censo-demografico-para-o-semiarido-brasileiro> > Acesso em 02 de Novembro de 2018.

JULIEN, P. Y. Erosion and sedimentation. Milbourne, Cambridge University Press, 1st ed. 280 p., 1995.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. – KÖPPEN, W., R. GEIGER (Eds.): Handbuch der Klimatologie. – Gebruder Borntrager, Berlin, v. 1, p. 1–44, part C, 1936.

LEE, J. K.; ROIG, L. C.; JENTER, H. L.; VISSER, H. M. Drag coefficients for modeling flow through emergent vegetation in the Florida everglades. **Ecological Engineering**, v. 22, n. 4-5, p. 237 – 248, 2004. doi: 10.1016/j.ecoleng.2004.05.001

LEONARDO, H. C. L. **Indicadores de qualidade de solo e água para avaliação do uso sustentável da microbacia hidrográfica do Rio Passo Cue, Região Oeste do Estado do Paraná**. 5, 6, 7, 30p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo. 2003.

LI, JI.; CAO, Z.; QIAN, H.; LIU, Q.; PENDER, G. A. depth-averaged two-phase model for fluvial sediment-laden flows over erodible beds. **Advances in Water Resources**, [s.l.], p.1-16, ago. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.014>.

LIU, X.; ZENG, Y. Drag Coefficient for Rigid Vegetation in Subcritical Open Channel. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 154, p.1124-1131, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.522>.

MAHONEY, D. T.; FOX, J. F.; AAMERY, N. A. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 561, p.862-883, jun. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.034>.

MELO, R. O.; CANTALICE, J. R. B.; ARAUJO, A. M.; CUNHA, F. M. **Produção de sedimento suspenso de uma típica bacia hidrográfica semi-árida**. In: VIII encontro nacional de engenharia de sedimentos - ENES, 2008, Campo Grande. VIII Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos - ENES. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos hídricos, 2008.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; CUNHA, R. B.; GOMES, S. T. **Avaliação da descarga sólida do leito em rio de montanha com uso do amostrador BLH-84**. VIII ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento, 2008.

- MERTEN, G.H., POLETO, C. **Qualidade dos sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2006.
- MILLARES, A.; POLO, M. J.; MOÑINO, A.; HERRERO, J.; LOSADA, M. A. Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. **Geomorphology**, [s.l.], v. 206, p.330-342, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.038>.
- MOULAI, L. H.; MESBAH, M.; GAMANE, D. S.; MEDJERAB, A. Detecting hydroclimatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. **Natural Hazards**, v.65, n. 3, p. 1293 – 1311, 2013.
- NEARING, M. A.; NICHOLS, M. H.; STONE, J. J.; RENARD, K. G.; SIMANTON, J. R. Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch. **Water Resources Research**, v.43, p.6426-6436. 2007.
- NEPF, H. M. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research* 35 (2), 479-489, 1999.
- NEPF, H. M. Hydrodynamics of vegetated channels. **Journal of hydraulic research**, [s.l.], v. 50, n. 3, p.262-279, jun. 2012. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2012.696559>.
- NEPF, H. M.; VIVONI, E. R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s.l.], v. 105, n. 12, p.28547-28557, 15 dez. 2000. <http://dx.doi.org/10.1029/2000jc900145>.
- NOGUEIRA, P. F.; CABRAL, J. B. P.; OLIVEIRA, S. F. Análise da concentração dos sólidos em suspensão, turbidez e tds nos principais afluentes do reservatório da Barra dos Coqueiros-GO. **Revista Geonorte**, Coqueiros, v. 4, n. 3, p.485-494, 2012.
- PARK, J.; HUNT, J. R. Coupling fine particle and bedload transport in gravel-bedded streams. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 552, p.532-543, set. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.023>.
- PIQUÉ, G.; BATALLA, R. J.; LÓPEZ, R.; SABATER, S. The fluvial sediment budget of a dammed river (upper Muga, southern Pyrenees). **Geomorphology**, [s.l.], v. 293, p.211-226, set. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.018>.
- POWELL. D.M. **Dryland rivers: processes and forms**. In: A.J. Parsons and A.D. Abrahams, eds. *Geomorphology of deserts environments*. 2nd ed. Berlin: Springer, p. 333–373. 2009.
- RAUPACH, M. R.; FINNIGAN, J. J.; BRUNEL, Y. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy. **Boundary-layer Meteorology**, [s.l.], v. 78, n. 3-4, p.351-382, mar. 1996. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00120941>.
- SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.2, p.1- 19, 2009.

SERIO, F.; MEFTAH, M.; MOSSA, M.; TERMINI, D. Experimental investigation on dispersion mechanisms in rigid and flexible vegetated beds. **Advances in Water Resources**, [s.l.], v. 120, p.98-113, out. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.005>.

SILVA FILHO, J. A. **Rugosidade hidráulica gerada por arranjo vegetal em um canal aluvial semiárido**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco/Sede-Recife. 2019.

SILVA JUNIOR, V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, T. P. N.; GUERRA, S. M. S.; SANTOS, E. S. Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 15, n. 10, p.1074-1081, 09 ago. 2011.

SILVA, L. C. DO N.; FERNANDES, A. L. V.; IZIPPATO, F. J.; OLIVEIRA, W. Uso do solo no manejo de bacias hidrográficas: o caso da microbacia córrego Prata, três lagoas MS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 01, p.01-13, 31 ago. 2008.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológicos acoplado a um SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.520-526, 2008.

SILVA, Y. J. A. B.; CANTALICE, J. R. B.; SINGH, V. P.; CRUZ, C. M. C. A.; SOUZA, W. L. S. Sediment transport under the presence and absence of emergent vegetation in a natural alluvial channel from Brazil. **International Journal of Sediment Research**, v. 31, n. 4, p. 360-367, 2016. Doi: 10.1016/j.ijsrc.2016.01.001.

SIMONI, A.; PONZA, A.; PICOTTI, V.; BERTI, M.; DINELLI, E. Earthflow sediment production and Holocene sediment record in a large Apennine catchment. **Geomorphology**, Bolonha, n. 188, p.42-53, 06 dez. 2012.

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. Sediment transport technology. Colorado State University. Fort Collins, CO. 897p. 1997.

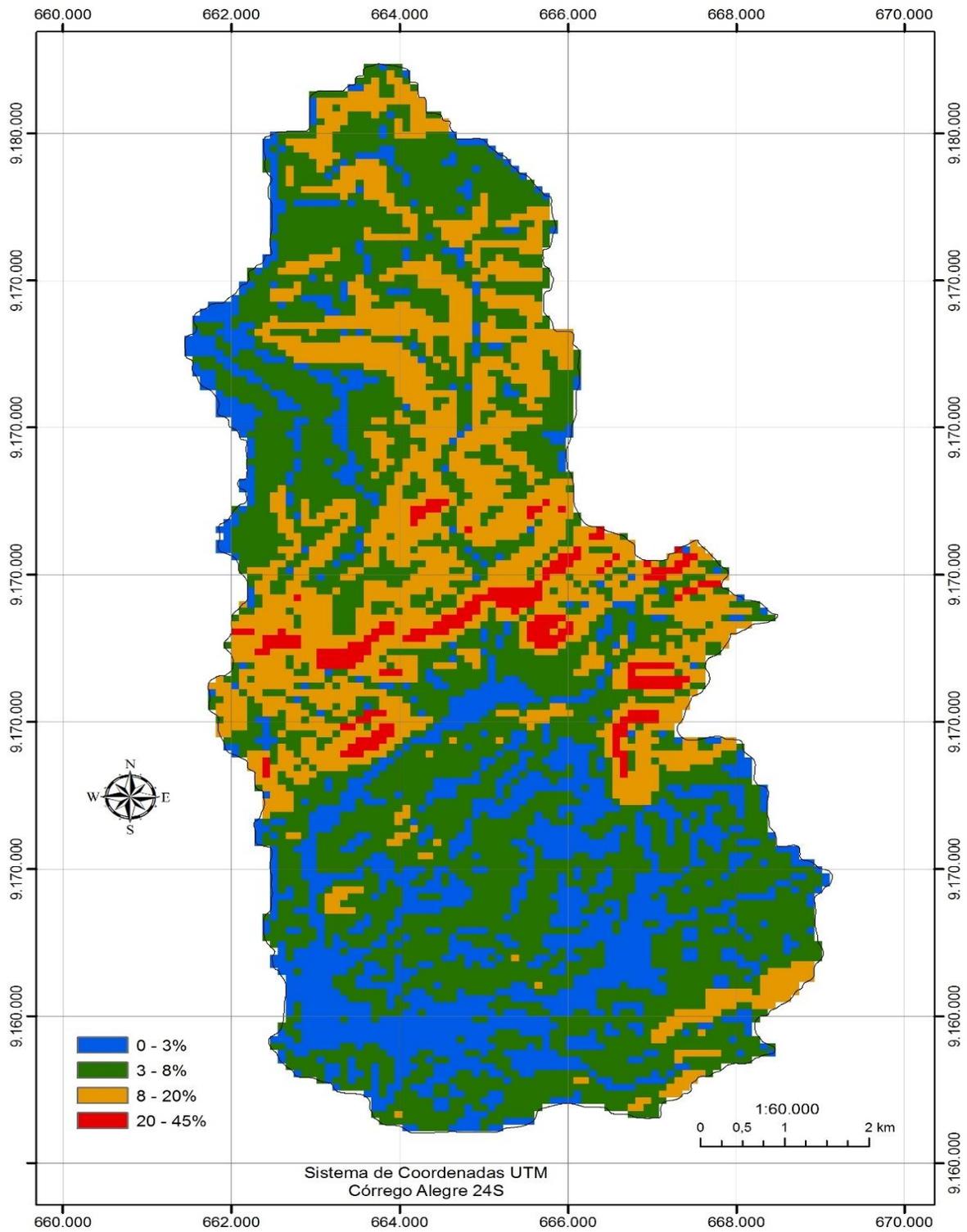
SIMONS, D.B.; SENTURK, F. **Sediment Transport Technology: Water and Sediment dynamics**. In: WATER Resources Publications. Colorado, [s.n.], p. 897. 1992.

SINGH, P.K.; BHUNYA, P.K.; MISHRA, S.K.; CHAUBE, U.C. A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 349, n. 1-2, p.244-255, jan. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.004>.

SIQUEIRA, M. DA S.; SILVA, C. E. M.; ALCÂNTARA, H. M.; RIBEIRO, G. DO N.; MEDEIROS, P. DA C.; AFONSO, J. P. S. D.; MEDEIROS, A. C.; MARACAJÁ, P. B. Influência do efeito de escala sobre a produção de sedimentos em bacias hidrográficas não instrumentadas no semiárido. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, v. 11, n. 01, p.99-105, 2016.

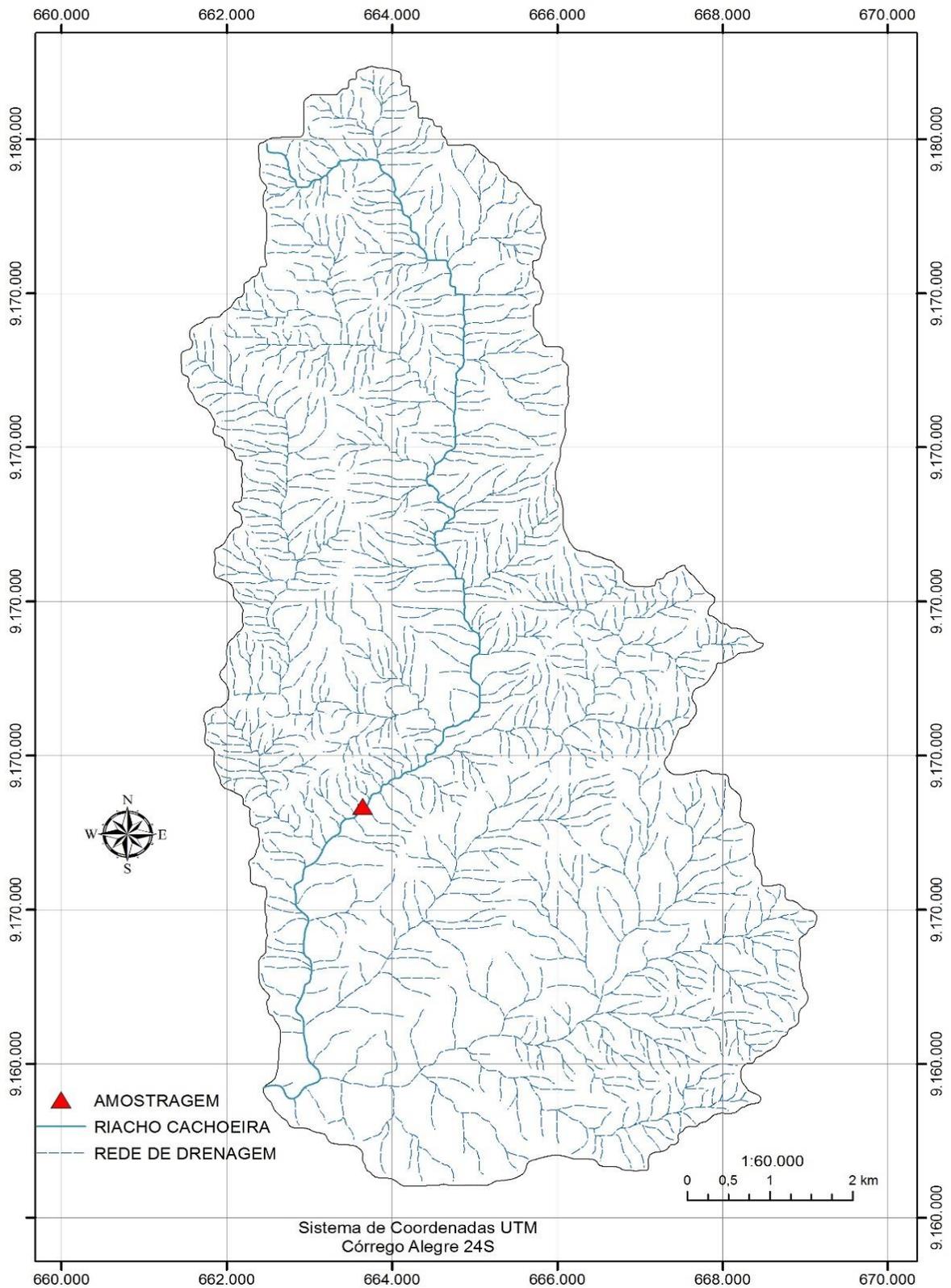
- SÓLYOM, P.B.; TUCKER, G.E. The importance of the catchment area-length relationship in governing non-steady state hydrology, optimal junction angles and drainage network pattern. **Geomorphology** v.88, n. 1-2, p. 84-108, 2007.
- SOUZA, C. F.; MERTEN, G. H. Comparação dentre estimativas de produção de sedimentos na bacia do Rio Potiribu. In: Encontro Nacional De Engenharia de Sedimentos, VII, 2006, Porto Alegre. **VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Porto Alegre: Enes, 2006. p. 1 - 21.
- SOUZA, J. O. P.; ALMEIDA, J. D. M. Processos Fluviais Em Terras Secas: Uma revisão. **Okara: Geografia em Debate**, João Pessoa, v. 9, n. 1, p.108-122, 2015.
- SOUZA, J. O. P.; CORREA, A. C. B.; BRIERLEY, G. J. An approach to assess the impact of landscape connectivity and effective catchment area upon bedload sediment flux in Saco Creek Watershed, Semiarid Brazil. **Catena**, [s.l.], v. 138, p.13-29, mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.006>.
- TANG, H.; ZHIJUN, T.; JING, Y.; SAIYU, Y. Determining drag coefficients and their application in modelling of turbulent flow with submerged vegetation. **Advances in Water Resources**, [s.l.], v. 69, p.134-145, jul. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.006>.
- TOOTH, S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. **Earth-Science Reviews**. v.51, p. 67–107, 2000.
- TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: Tucci, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, RS: ABRH-Edusp, 1993. cap. 2.
- UNEP. **World Atlas of Desertification** (2nd Edn). London: Arnold. 1997.
- USDA. Soil Mechanics Level I, Module 3 - USDA Textural Soil Classification, Study Guide, National Employee Development Staff, Soil Conservation Service. 1987.
- USGS – **United States Geological Survey**. Sediment Data Collection Techniques. Washington, 2005.
- USGS – **United States Geological Survey**. Techniques of Water Resources Investigations. Washington, 1973.
- VAGHEFI, M.; AKBARI, M.; FIOUZ, A. R. An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress. **Ksce Journal of Civil Engineering**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.1582-1593, 7 ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-015-1560-0>.
- 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**. 268 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

- WALLING, D.E. **Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land.** In: *Soil Erosion on Agricultural Land*. Ed.: BOARDMAN, J.; FOSTER, I.D.L.; DEARING, J.A. Wiley, Chichester. p. 129-152. 1990.
- WANG, W. J.; HUAI, W. X.; THOMPSON, S.; PENG, W. Q.; KATULE, G. G. Drag coefficient estimation using flume experiments in shallow non-uniform water flow within emergent vegetation during rainfall. **Ecological Indicators**, v. 92, p. 367-378, 2017. doi: 10.1016/j.ecolind.2017.06.041.
- WANG, W.; HUAI, W.; LI, S.; WANG, P.; WANG, Y.; ZHANG, J. Analytical solutions of velocity profile in flow through submerged vegetation with variable frontal width. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 124088, n. 587, p.1-9, 31 ago. 2019.
- WILDE, F.D.; RADKE, D.B. **Field measurements.** In: *National field manual for the collection of water-quality data*. US Geological Survey Techniques, Water Resource Investigations, v. 9, n.4, p. 7-99. 1998.
- WOLANSKI, E.; ELLIOTT, M. *Estuarine Ecohydrology: An Introduction*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, p 269. 2007.
- WU, F. C.; SHEN, H. W.; CHOU, Y. J. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 9, p. 934–941, 1999.
- WU, F. S. Characteristics of flow resistance in open channels with non-submerged rigid vegetation. **Journal of Hydrodynamics**, v .20, n. 2, p.239-245. 2008.
- YANG, C. T. Bedload Transport. In: **Sediment Transport: theory and practice**. McGraw-Hill, p.90-121.1996.
- ZAPICO, I.; LARONNE, J.B.; MARTÍN-MORENO, C.; MARTÍN-DUQUE, J.F.; ORTEGA, A., SÁNCHEZ-CASTILLO, L. Baseline to evaluate off-site suspended sediment-related mining effects in the Alto Tajo Natural Park, Spain. **Land Degrad.** v. 28 n, 1, p, 232–242. 2017. <https://doi.org/10.1002/ldr.2605>.
- ZARFL, C.; LUCÍA, A. The connectivity between soil erosion and sediment entrapment in reservoirs. **Current Opinion In: Environmental Science & Health**, [s.l.], v. 5, p.53-59, out. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2018.05.001>.
- ZHANG, S.; FAN, W.; LI, Y.; YI, Y. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 574, p.34-45, jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.024>.
- Zhao, Z. L.; Zhao, H. P.; Li, B. W.; Nie, B. D.; Feng, X. Q.; Gao, H. Biomechanical tactics of chiral growth in emergent aquatic macrophytes. **Scientific Reports**, v. 5, n. 12610, p. 1-13, 2015. doi: 10.1038/srep12610

ANEXOS**Anexo 1 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, Tabira-PE.**

Fonte: Filho et al. (2019).

Anexo 2 - Mapa da rede de drenagem e localização do ponto de amostragem da bacia hidrográfica do riacho Cachoeira, Tabira-PE.



Fonte: Filho et al. (2019e)