

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**VAZÕES LÍQUIDAS E SÓLIDAS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS SOB DIFERENTES CENÁRIOS
AMBIENTAIS NO SUL DA AMAZÔNIA**

DANIELA ROBERTA BORELLA

PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA

Orientador

PROF. DR. CORNELIO ALBERTO ZOLIN

Coorientador

**CUIABÁ, MT
DEZEMBRO/2022**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**VAZÕES LÍQUIDAS E SÓLIDAS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS SOB DIFERENTES CENÁRIOS
AMBIENTAIS NO SUL DA AMAZÔNIA**

DANIELA ROBERTA BORELLA

*Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal de Mato Grosso,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutora em Física Ambiental.*

PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA
Orientador
PROF. DR. CORNELIO ALBERTO ZOLIN
Coorientador

**CUIABÁ, MT
DEZEMBRO/2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

B731v BORELLA, DANIELA ROBERTA.
VAZÕES LÍQUIDAS E SÓLIDAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB
DIFERENTES CENÁRIOS AMBIENTAIS NO SUL DA AMAZÔNIA [recurso eletrônico]
/ DANIELA ROBERTA BORELLA. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 143 f., il. color., pdf).
-2022.

Orientador: ADILSON PACHECO DE SOUZA.

Coorientador: CORNELIO ALBERTO ZOLIN.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa
de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2022.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Hidrologia. 2. Hidrossedimentologia. 3. Rio Teles Pires. 4. Fronteira agrícola
brasileira. 5. Transição Cerrado-Amazônia. I. SOUZA, ADILSON PACHECO DE,
orientador. II. ZOLIN, CORNELIO ALBERTO, *coorientador*. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Vazões líquidas e sólidas em bacias hidrográficas sob diferentes cenários ambientais no Sul da Amazônia

AUTORA: DOUTORANDA **DANIELA ROBERTA BORELLA**

Tese defendida e aprovada em **16 de DEZEMBRO** de **2022**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. ADILSON PACHECO DE SOUZA (Presidente Banca / **Orientador**)

INSTITUIÇÃO: **UFMT - Campus Sinop**

2. Prof. Dr. FREDERICO TERRA DE ALMEIDA (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: **UFMT - Campus Sinop**

3. Profa. Dra. JANAINA PAULINO (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: **UFMT - Campus Sinop**

4. Prof. Dr. CONAN AYADE SALVADOR (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: **UFRRJ**

5. Prof. Dr. LEONARDO BATISTA DUARTE DA SILVA(Examinador Externo)

INSTITUIÇÃO: **UFRRJ**

6. Prof. Dr. GLAUBER AUTRÃO CARVALHO (Membro Externo Suplente)

INSTITUIÇÃO: **UFMS**

7. Prof. Dr. HANDREY BORGES ARAÚJO (Membro Interno Suplente)

INSTITUIÇÃO: **UFMT - Campus Sinop**



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO ROBERTO DE PAULO, Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 24/01/2023, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Glauber Altrão Carvalho, Usuário Externo**, em 24/01/2023, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Conan Ayade Salvador, Usuário Externo**, em 24/01/2023, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADILSON PACHECO DE SOUZA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 24/01/2023, às 21:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JANAINA PAULINO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 24/01/2023, às 23:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Duarte Ba sta da Silva, Usuário Externo**, em 25/01/2023, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FREDERICO TERRA DE ALMEIDA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 27/01/2023, às 07:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5461774** e o código CRC **C3B1C4A2**.

DEDICATÓRIA

Aos meus avós pelo carinho

Maternos: Vilma Dalla Corte e Normélio Bianchessi

Paternos (In memoriam): Angelina Breda e Dorval Borella

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Ao Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza pela orientação, confiança, suporte, paciência, compartilhamento de conhecimento no decorrer da vida acadêmica.

Aos integrantes do Projeto CAPES/ANA e do Grupo de Pesquisa Tecnologia em Recursos Hídricos no Centro-Oeste pela amizade e colaboração nas incontáveis horas de trabalho de campo, análise laboratorial e intelectual em todas as etapas do projeto.

À minha família, meu pai Ildo Borella, minha mãe Iliane Bianchessi e meus irmãos Ismael e Graciela Borella pelo carinho, compreensão e apoio, apesar das incontáveis horas ausentes dedicadas ao doutorado.

Aos meus amigos pela amizade e por me proporcionarem momentos de descontração.

Aos professores dos Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental, Ciência Ambientais e de Agronomia da Universidade Federal de Mato Grosso por compartilharem seus conhecimentos no decorrer do doutorado.

À Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pelo suporte e recursos humanos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Código de Financiamento – 001 (Processo 88887.195748/2018-00), pelo apoio financeiro ao projeto (Processo 88887.144957/2017-00).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio com as bolsas de iniciação científica e bolsa produtividade (Processo 308784/2019-7).

À 3ª Comarca de Justiça Cível de Sinop pelo apoio financeiro ao Projeto CBH Monitora e ao Comitê dos Afluentes da Margem Direita do Alto Teles Pires.

SUMÁRIO

RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. Características gerais da região de estudo	4
2.2. Bacias hidrográficas	6
2.3. Vazão líquida	7
2.4. Vazões sólidas	19
3. CAPÍTULO 1 – VAZÕES LÍQUIDAS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO EM AFLUENTES DO RIO TELES PIRES, NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA	22
Resumo	22
Abstract	22
Introdução	23
Material e métodos	25
Resultados	40
Discussão	46
Conclusões	50
Agradecimentos	50
Referências	51
4. CAPÍTULO 2 - DINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM AFLUENTES DO RIO TELES PIRES, NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA	56
Resumo	56
Abstract	56
Introdução	57
Material e métodos	60
Resultados	73
Discussão	81
Conclusões	85

Agradecimentos.....	86
Referências	86
5. CAPÍTULO 3 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RENATO: MORFOMETRIA, VAZÃO E CURVAS-CHAVE LÍQUIDA E SÓLIDA	91
Resumo	91
Abstract	91
Introdução	92
Material e Métodos.....	94
Resultados.....	105
Discussão	112
Conclusões	115
Agradecimentos.....	115
Referências	116
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
7. REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO GERAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seções transversais de monitoramento fluviométrico das oito estações fluviométricas de sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.	8
Figura 2. Medição de vazão líquida em embarcação com molinete hidrométrico <i>MLN-7</i> acoplado a haste metálica.	12
Figura 3. Medição de vazão líquida em embarcação com molinete hidrométrico <i>MLN-7</i> acoplado ao guincho fluviométrico.	12
Figura 4. Pulsos sonoros em colisão com as partículas sólidas em suspensão na água, denominado Efeito Doppler.	14
Figura 5. Perfilador de Correte Acústico Doppler – ADCP, modelo <i>RiverRay</i> fabricado pela <i>Teledyne Marine RD Instruments</i>	15
Figura 6. Interface do software de aquisição <i>WinRiver II</i> com a medição em campo da vazão líquida com o ADCP <i>RiverRay</i>	15
Figura 7. Interface do software de processamento <i>QRev 3.43</i> – MATLAB para a avaliação automatizada dos dados conforme as políticas da <i>USGS</i>	16
Figura 8. Perfil transversal da velocidade da água de um transecto medido pelo ADCP <i>RiverRay</i> diferenciando vertical (conjunto de células).	17
Figura 9. Representação na seção transversal de área não medidas pelo ADCP (margem, camada superficial e fundo), a qual terá a vazão líquida estimada por extrapolação ou interpolação.	17
Figura 10. Interface do software <i>QRev 3.43</i> demonstrando a avaliação automatizada dos dados conforme as diretrizes da <i>USGS</i>	19
Figura 11. Representação de uma seção transversal hipotética demonstrando a amostragem de sedimentos em suspensão por integração pelo método do igual incremento de largura (IIL), onde V_i indica o volume coletado.	21
Figura 12. Mapa de localização das sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.	27
Figura 13. Mapa de localização das estações fluviométricas e principais usos do solo das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.	29
Figura 14. Representação de uma seção transversal hipotética demonstrando a distância entre verticais, o número de verticais, assim como, a posição e número de pontos para as leituras de batimetria e vazão líquida de cada vertical.	30
Figura 15. Calibração da bússola e teste de leito móvel estacionário com o ADCP <i>RiverRay</i>	33
Figura 16. Medida da vazão líquida com molinete hidrométrico e ADCP em seções transversais hidrológicas paralelas.	34
Figura 17. Perfil transversal da velocidade da água de um transecto medido pelo ADCP identificando as margens e o centro da seção transversal.	34

Figura 18. Interface do software <i>WinRiver II</i> indicando os critérios pré-estabelecidos pela <i>USGS</i> , que são observados durante as medidas em campo.....	35
Figura 19. Interface do software <i>QRev 3.43</i> demonstrando uma medição de qualidade boa, que passou pela ADQA conforme as políticas da <i>USGS</i>	37
Figura 20. Interface do software <i>QRev 3.43</i> demonstrando uma medição de qualidade ruim, que não passou pela ADQA conforme as políticas da <i>USGS</i>	37
Figura 21. Tempo de medição total para estimativas de incertezas menor que 5% de cinco seções transversais em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil. .	43
Figura 22. Perfis batimétricos pelo método de referência (linha pontilhada) e pelo ADCP (linha contínua) no período seco e chuvoso, de cinco seções transversais de monitoramento em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	44
Figura 23. Equação linear de estimativa e seu desempenho estatístico da vazão líquida anual, obtida pelo método de referência em relação ao ADCP, das cinco seções transversais de monitoramento de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	45
Figura 24. Equações lineares de estimativas e seus desempenhos estatísticos da profundidade medida pelo método de referência em relação a profundidade obtida pelo ADCP em diferentes posições de medidas nas cinco seções transversais das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	46
Figura 25. Mapa de localização das oito estações fluviométricas monitoradas nas sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.	62
Figura 26. Médias mensais e desvio-padrão da chuva (A) e temperatura do ar (B), da região transição Cerrado-Amazônia da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	63
Figura 27. Mapa de localização das oito estações fluviométricas e principais usos do solo das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.	64
Figura 28. Representação de uma seção transversal hipotética demonstrando a amostragem de sedimentos em suspensão por integração pelo método do igual incremento de largura (IIL).....	66
Figura 29. Amostrador de sedimentos em suspensão <i>US DH-48</i> amostragem a vau.....	67
Figura 30. Amostrador de sedimentos em suspensão <i>US D-49</i> acoplado no guincho fluviométrico.	67
Figura 31. Armazenamentos das amostras de água com sedimentos em suspensão.	69
Figura 32. Amostrador de sedimentos de arrasto <i>US BLH-84</i> versão <i>Helley Smith</i>	70
Figura 33. Sistema de filtragem de sedimentos em suspensão.....	71
Figura 34. Separação e secagem de sedimentos de arrasto.	71
Figura 35. Perfis transversais do nível da água e da concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}), no período seco e chuvoso, de oito seções de monitoramento em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	75
Figura 36. Vazão líquida, concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) e vazão sólida em suspensão (Q_{ss}) medidas entre 06/2018 a 11/2021 nas oito seções transversais de monitoramento das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	77

Figura 37. Equações lineares de estimativas e seus desempenhos estatísticos da vazão sólida em suspensão por diferentes amostragens e no agrupamento anual (A-C), na estação seca (D-F) e na estação chuvosa (G-I) das oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	78
Figura 38. Vazões líquidas (A) e vazões sólidas em suspensão observadas e estimadas por diferentes amostragens nos agrupamentos anual (B), na estação seca (C) e na estação chuvosa (D) das oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	79
Figura 39. Equações lineares de estimativas e seus desempenhos estatísticos da vazão sólida total em relação a vazão sólida em suspensão por diferentes amostragens e no agrupamento anual (A-D), na estação seca (E-H) e na estação chuvosa (I-L) das oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.....	80
Figura 40. Mapa de localização e principais usos do solo da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, no sul da Amazônia, Mato Grosso, Brasil. Observação: na tabela de informações gerais das estações fluviométricas estão apresentados o período de medidas pontuais (mensal) das vazões líquida e sólida.	96
Figura 41. Médias mensais e desvio-padrão da chuva (A) e temperatura do ar (B), na região sul da Amazônia, na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, Mato Grosso, Brasil.....	97
Figura 42. Perfis transversais das seções hidrológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, demonstrando a largura, profundidade, distância entre verticais e o número de verticais de cada seção transversal no período seco (linha tracejada marrom) e chuvoso (linha contínua azul).	99
Figura 43. Curvas-chave de vazão líquida ajustadas para as seções hidrológicas 1 (A) e 2 (B) da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	107
Figura 44. Curvas-chave de vazões sólida em suspensão e total ajustadas para as seções hidrológicas 1 (A e C) e 2 (B e D) da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil. * Período de avaliação entre 05/2019 e 11/2022.	110
Figura 45. Vazão líquida (A) calculada pelo ajuste da curva-chave $y = a * x - x_0 ^b$ entre 2019 e 2021, vazão sólida em suspensão, de arrasto e total (A) amostradas mensalmente entre 2020 e 2021 e chuva (B) na seção hidrológica 1, na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, Mato Grosso, Brasil.	111
Figura 46. Vazão líquida (A) calculada pelo ajuste da curva-chave $y = a * x - x_0 ^b$ entre 2019 e 2022, vazão sólida em suspensão, de arrasto e total (A) amostradas mensalmente entre 2020 e 2021 e chuva (B) na seção hidrológica 2, na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, Mato Grosso, Brasil.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações gerais das oito estações fluviométricas (EF) de sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	9
Tabela 2. Distância entre verticais fixas, conforme a largura da seção transversal do rio..	10
Tabela 3. Profundidade, número e posição dos pontos da vertical de medição e o cálculo da velocidade média para a respectiva vertical.	10
Tabela 4. Especificações da equação de calibração do molinete hidrométrico <i>MLN-7</i>	13
Tabela 5. Informações gerais de cinco estações fluviométricas de sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	28
Tabela 6. Características hidráulicas obtidas pelos métodos de referência em seções transversais de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	41
Tabela 7. Características gerais obtidas pelo método acústico por Efeito Doppler - ADCP <i>RiverRay</i> em seções transversais de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	42
Tabela 8. Informações gerais de oito estações fluviométricas monitoradas nas sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	63
Tabela 9. Vazões líquidas e sólidas médias em diferentes estações hídricas do ano, para oito estações fluviométricas de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	76
Tabela 10. Percentuais médios das vazões sólidas de arrasto sobre as vazões sólidas totais em diferentes estações hídricas do ano, para oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	81
Tabela 11. Modelos de regressão utilizados para ajustar as curvas-chave de vazões líquida e sólida para as seções hidrológicas 1 e 2 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	104
Tabela 12. Características fisiográficas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	105
Tabela 13. Características hidráulicas das seções hidrológicas 1 e 2 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.	106
Tabela 14. Coeficientes de modelos matemáticos de regressão utilizados para ajustar as curvas-chave de vazões líquida e sólidas da seção hidrológica 1 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.....	108
Tabela 15. Coeficientes de modelos matemáticos de regressão utilizados para ajustar as curvas-chave de vazões líquida e sólidas da seção hidrológica 2 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.....	109

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AD	Área de drenagem	(km ²)
ADCP	Perfilador de Correte Acústico Doppler	
ADQA	Automated Data Quality Assessment	
A _{máx}	Área molhada máxima	(m ²)
A _{méd}	Área molhada média	(m ²)
A _{mín}	Área molhada mínima	(m ²)
ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico	
BH	Bacia Hidrográfica	
CPRM	Serviço Geológico Brasileiro	
C _{ss}	Concentração de sedimentos em suspensão	(mg L ⁻¹)
dw	Índice de concordância de Willmott	
GFL	Guincho Fluviométrico Completo	
IIL	Igual Incremento de Largura	
MBE	Erro quadrático médio	
MLN	Molinete Hidrométrico	
LAS	Lastro Fluviométrico	
L _{máx}	Largura da seção máxima	(m)
L _{méd}	Largura da seção média	(m)
L _{mín}	Largura da seção mínima	(m)
Q _{sa}	Vazão sólida de arrasto	(t d ⁻¹)
Q _L	Vazão líquida	(m ³ s ⁻¹)
Q _{Lmáx}	Vazão líquida máxima	(m ³ s ⁻¹)
Q _{Lméd}	Vazão líquida média	(m ³ s ⁻¹)
Q _{Lmín}	Vazão líquida mínima	(m ³ s ⁻¹)
Q _m	Vazão líquida medida	(m ³ s ⁻¹)
Q _{ss}	Vazão sólida em suspensão/por vertical	(t d ⁻¹)
Q _{ssc}	Vazão sólida composta	(t d ⁻¹)
Q _{ssvp}	Vazão sólida vertical padrão	(t d ⁻¹)
Q _{ssp}	Vazão sólida percentis	(t d ⁻¹)
Q _{st}	Vazão sólida total	(t d ⁻¹)
Q _t	Vazão líquida total	(m ³ s ⁻¹)
Q _{stesp}	Vazão sólida total específica	(t d ⁻¹ km ⁻²)
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional	
RMSE	Raiz quadrática do erro quadrático médio	
US BLH	United States Manually operated bed discharge samplers	
UHEs	Usinas Hidrelétricas	
USGS	United States Geological Survey	
US D	United States Vertically integrated sampler	
US DH	United States Manually operated vertically integrated sampler	
P _{máx}	Profundidade da seção máxima	(m)
P _{méd}	Profundidade da seção média	(m)
P _{mín}	Profundidade da seção mínima	(m)
V _{máx}	Velocidade da água máxima	(m s ⁻¹)
V _{méd}	Velocidade da água média	(m s ⁻¹)
V _{mín}	Velocidade da água mínima	(m s ⁻¹)

RESUMO

BORELLA, D. R. Vazões líquidas e sólidas em bacias hidrográficas sob diferentes cenários ambientais no sul da Amazônia, 143f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2022.

O aumento da demanda pelos recursos naturais água e solo na região de transição dos biomas Cerrado-Amazônia tem estimulado a necessidade de conhecer a disponibilidade hídrica e a dinâmica dos processos hidrossedimentológicos para adequada gestão dos recursos hídricos. Visto que, o uso e ocupação da terra sem planejamento têm gerado grandes perdas de solo por erosão hídrica, aumento da carga de sedimentos nos rios, poluição das águas e redução do escoamento superficial. Nesse contexto, o presente estudo avaliou: I - vazões líquidas (Q_L) obtidas pelos métodos tradicional e acústico por Efeito Doppler; II - vazões sólidas (Q_s) coletadas pelo método do igual incremento de largura com amostragens de sólidos em suspensão (Q_{ss}) por vertical, composta, vertical padrão e percentis, e, III - determinou as características fisiográficas e estabeleceu curvas-chave para as vazões líquida e sólida. As medidas de Q_L e coletas de Q_s foram realizadas mensalmente entre 2018 e 2021 para representar a sazonalidade hídrica e a dinâmica hidrossedimentológica das seções hidrológicas dos rios Caiabi 1 e 2, Celeste, Nandico, Preto, Renato 1 e 2 e córrego Rosana, afluentes do rio Teles Pires. As Q_L foram obtidas por molinete hidrométrico *MLN-7* e Perfilador de Corrente Acústico Doppler (*ADCP RiverRay*), enquanto as Q_s foram obtidas por amostradores de sedimentos em suspensão e de arrasto, e as vazões sólidas totais (Q_{st}) foram calculadas. Foram ajustados modelos de regressão para verificar a concordância das Q_L obtidas entre molinete e ADCP, das profundidades entre haste metálica graduada e ADCP, para estimativas de Q_{ss} e Q_{st} , e para as curvas-chave líquida e sólida. Os desempenhos estatísticos foram avaliados pelo erro relativo médio (MBE), raiz do erro relativo médio (RMSE), índice de concordância de Willmott (dw), eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e teste de médias. As características fisiográficas foram determinadas utilizando o software QGIS versão 3.16.11. As Q_L obtidas por molinete e ADCP apresentaram dinâmica semelhantes na sazonalidade hídrica e em cada seção hidrológica, com picos de máxima e mínima entre o período chuvoso e seco da região, respectivamente. As Q_L variaram de 3,5 a 61,0 m³ s⁻¹ para o molinete e 2,7 a 54,0 m³ s⁻¹ para o ADCP, entre as seções hidrológicas, com dw de 0,9998 para Q_L e superior a 0,9995 para profundidade. As Q_s apresentaram dinâmica semelhantes entre as formas de amostragem, acompanhando os picos de máximas e mínimas das Q_L em cada seção hidrológica. As Q_{ss} e Q_{st} variaram de 0,31 a 39,35 t d⁻¹ e de 0,32 a 43,70 t d⁻¹, respectivamente, entre o período seco e chuvoso da região e entre as seções hidrológicas. Quanto as estimativas das Q_s , os valores de dw foram superiores a 0,9815 para Q_{ss} e 0,9975 para Q_{st} . A sub-bacia hidrográfica do rio Renato apresentou densidade de drenagem regular = 0,505 km km⁻², formato alongado ($k_f = 0,19$; $k_c = 2,17$ e $I_c = 0,21$) e o relevo variou de plano a fortemente ondulado (0 a 30%). Os modelos de regressão (linear, polinomial, potencial e exponencial) ajustados para Q_L apresentaram desempenho estatístico satisfatório, com dw entre 0,8999 e 0,9599 e NSE entre 0,60 e 0,83, enquanto para as Q_s os modelos não ajustaram de forma satisfatória. As medições pelo método tradicional e ADCP apresentaram compatibilidade para obtenção das Q_L em rios rasos (até 6,5 m de profundidade) da bacia hidrográfica do rio Teles Pires. A dinâmica de produção e transporte de sedimentos foi influenciada pelo uso e ocupação da terra, área de drenagem e sazonalidade hídrica da região. As diferentes formas de amostragens de sedimentos em suspensão apresentam compatibilidade para obtenção da vazão sólida em suspensão e total. A sub-bacia

hidrográfica do rio Renato é pouco susceptível a ocorrência de enchentes, devido seu formato alongado e densidade de drenagem regular. Os modelos de regressão ajustaram de forma satisfatória para Q_L e insatisfatória para Q_{ss} e Q_{st} .

Palavras-chave: Hidrologia; Hidrossedimentologia; Rio Teles Pires; Fronteira agrícola brasileira; Transição Cerrado-Amazônia.

ABSTRACT

BORELLA, D. R. Flow and sediment in watersheds basin under different environmental scenarios in southern Amazonia. 143f. Thesis (Doctor in Environmental Physics), Physics Institute, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2022.

The increased demand for the natural resources of water and soil in the transition region of the Cerrado-Amazon biomes has stimulated the need to know water availability and the dynamics of hydro-sedimentological processes for proper management of water resources. Since, the use and occupation of the land without planning have generated great losses of soil by water erosion, increase of the load of sediments in the rivers, water pollution and reduction of the surface drainage. In this context, the present study evaluated: I - net flows (Q_L) obtained by traditional and acoustic methods by Doppler Effect; II - solid flows (Q_s) collected by the method of equal increment of width with samples of solids in suspension (Q_{ss}) by vertical, composite, standard vertical and percentiles, and, III - determined the physiographic characteristics and established key curves for the flows liquid and solid. Q_L measurements and Q_s collections were carried out monthly between 2018 and 2021 to represent the water seasonality and the hydro-sedimentological dynamics of the hydrological sections of the Caiabi 1 and 2, Celeste, Nandico, Preto, Renato 1 and 2 rivers and Rosana stream, tributaries of the river Teles Pires. Q_L were obtained by *MLN-7* hydrometric windlass and Doppler Acoustic Current Profiler (ADCP *RiverRay*), while Q_s were obtained by suspended and drag sediment samplers, and total solid flows (Q_{st}) were calculated. Regression models were adjusted to verify the agreement of the Q_L obtained between reel and ADCP, of the depths between graduated metal rod and ADCP, for estimates of Q_{ss} and Q_{st} , and for the liquid and solid key curves. Statistical performances were evaluated by mean relative error (MBE), root mean relative error (RMSE), Willmott concordance index (dw), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and test of means. Physiographic characteristics were determined using QGIS software version 3.16.11. The Q_L obtained by windlass and ADCP showed similar dynamics in the water seasonality and in each hydrological section, with maximum and minimum peaks between the rainy and dry periods of the region, respectively. The Q_L ranged from 3.5 to 61.0 m³ s⁻¹ for the windlass and 2.7 to 54.0 m³ s⁻¹ for the ADCP, between hydrological sections, with dw of 0.9998 for Q_L and greater than 0.9995 for depth. The Q_s showed similar dynamics between the sampling methods, following the maximum and minimum peaks of the Q_L in each hydrological section. The Q_{ss} and Q_{st} ranged from 0.31 to 39.35 t d⁻¹ and from 0.32 to 43.70 t d⁻¹, respectively, between the dry and rainy periods of the region and between the hydrological sections. As for the Q_s estimates, the dw values were greater than 0.9815 for Q_{ss} and 0.9975 for Q_{st} . The Renato River sub-basin had a regular drainage density = 0.505 km km⁻², an elongated shape (K_f = 0.19; K_c = 2.17 and I_c = 0.21) and the relief

varied from flat to strongly undulating (0 to 30%). The regression models (linear, polynomial, potential and exponential) adjusted for Q_L showed satisfactory statistical performance, with d_w between 0.8999 and 0.9599 and NSE between 0.60 and 0.83, while for Q_s the models did not adjust in a satisfactory way. Measurements by the traditional method and ADCP were compatible to obtain Q_L in shallow rivers (up to 6.5 m deep) in the Teles Pires river basin. The dynamics of sediment production and transport was influenced by land use and occupation, drainage area and water seasonality in the region. The different ways of sampling suspended sediments are compatible to obtain suspended and total solid flow rates. The Renato river hydrographic sub-basin is little susceptible to the occurrence of floods, due to its elongated shape and regular drainage density. The regression models adjusted satisfactorily for Q_L and unsatisfactorily for Q_{ss} and Q_{st} .

Keywords: Hydrology; Hydrossedimentology; Teles Pires river; Brazilian agricultural frontier; Cerrado-Amazon transition.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

A intensificação dos conflitos pelos usos da água tem gerado impactos nas diversas cadeias produtivas, na qualidade de vida da sociedade e na manutenção dos ecossistemas naturais. O aumento pela demanda de água, associada com o crescimento e desenvolvimento populacional e com a ocupação territorial desordenada, tem causado sérios problemas de escassez hídrica, inundações, contaminação das águas superficiais e subterrâneas, perdas de solo e insumos em áreas agricultáveis, deposição de sedimentos em rios e reservatórios e perda da biodiversidade, nas diversas escalas espaciais.

O regime hidrológico de uma região ou das bacias hidrográficas que a compõem, é dependente das condições climáticas, da geomorfologia do solo e do tipo de cobertura vegetal e dentro outros fatores. As mudanças de uso e ocupação da terra possibilitam alterações nos processos hidrossedimentológicos, como exemplo, a ausência de práticas conservacionistas em solos agricultáveis e a supressão da vegetação natural influenciam na capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento da água da chuva no solo e nas taxas de produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas.

Nesse aspecto, o conhecimento da disponibilidade hídrica superficial e da dinâmica de produção e transporte de sedimentos em cursos d'água tem sido cada vez mais necessário, pois essas informações podem subsidiar o planejamento, a gestão e a conservação adequada da água e do solo. Apesar da relevância do tema, ainda há pouco conhecimento desses processos hidrossedimentológicos em bacias e sub-bacias hidrográficas da Amazônia brasileira, sendo que, os poucos estudos existentes de processos hidrossedimentológicos estão concentrados nos principais cursos d'água de bacias hidrográficas de maior impacto ao abastecimento urbano brasileiro.

A baixa cobertura espacial e temporal do monitoramento hidrossedimentológico na bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, se deve a grande extensão territorial, disponibilidade hídrica e densidade da rede de drenagem, além da dificuldade de acesso e logística em pequenos cursos d'água, que dificultam as medições *in loco*, as instalações e a manutenção de equipamentos para o monitoramento de rotina. Na região de transição Cerrado-Amazônia, sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires apresentam poucas informações sobre a disponibilidade hídrica e dinâmica hidrossedimentológica, visto que, ainda é incipiente a

aplicação de metodologias de medição de vazão líquida e do transporte de sedimentos conhecidas e validadas, para os rios dessa região.

1.2. JUSTIFICATIVA

A transição Cerrado-Amazônia é uma região de fronteira agrícola, com potencial de desenvolvimento econômico no agronegócio, na produção de energia renovável, na industrialização e na prestação de serviços. A demanda hídrica para manutenção dessas atividades é cada vez maior, e, requer o conhecimento da disponibilidade e da qualidade desse recurso natural para seu gerenciamento com o propósito de evitar problemas de escassez hídrica e perda da qualidade das águas superficiais nessa região.

Inserida regionalmente na transição Cerrado-Amazônia, a bacia hidrográfica do rio Teles Pires, já possui cinco empreendimentos hidroelétricos (UHEs) instalados no seu curso principal, além da alta captação superficial para irrigação por pivôs centrais, da diluição de efluentes e outras demandas da urbanização, sobretudo, nos pequenos cursos d'água, que em geral, são mais susceptíveis a poluição hídrica e a eventos hidrológicos extremos.

A determinação e o monitoramento *in loco* da disponibilidade e dinâmica hidrológica de bacias hidrográficas são fundamentais para compreender esses processos, e, construir uma base de dados consistentes para a definição de curvas-chave e calibração de modelos que permitam previsões de eventos hidrológicos extremos que, consequentemente, ajudarão na tomada de decisão para mitigar os efeitos negativos sobre a sociedade e o meio ambiente. Além disso, as informações hidrológicas servem como base para o planejamento e dimensionamento de projetos hidroagrícolas e florestais, além do abastecimento de água para as diversas atividades antrópicas.

Além do limitado conhecimento hidrológico de afluentes da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, também se faz necessária, a adequação/validação de formas de medição da vazão líquida e do transporte de sedimentos, visto que existem diversos métodos e modelos de equipamentos desenvolvidos para condições ambientais distintas. Nesse sentido, precisa-se saber qual a melhor forma de medir e construir bases de dados consistentes que vão subsidiar a gestão e conservação da água e do solo, bem como, a implementação de projetos na região.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a dinâmica das vazões líquida e sólida em sub-bacias hidrográficas, sob diferentes cenários ambientais no sul da Amazônia.

1.3.2 Objetivos Específicos

Estimar e comparar a vazão líquida obtida por dois métodos de medição *in loco* em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires.

Estimar e avaliar a produção de sedimentos em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, por meio de diferentes formas de amostragens da vazão sólida em suspensão.

Descrever a dinâmica de produção e o transporte de sedimentos em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires.

Descrever as características fisiográficas e estabelecer curvas-chave das vazões líquida e sólida na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Características gerais da região de estudo

A bacia hidrográfica do rio Teles Pires está localizada entre as latitudes 7° 16' 47" e 14° 55' 17" S, longitudes 53° 49' 46" e 58° 7' 58" W e altitudes de 800 a 95 m, abrangendo os territórios dos estados de Mato Grosso e Pará, Brasil (EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2009). Essa bacia está hidrologicamente situada na macrorregião da Bacia Amazônica e mesorregião da Bacia Tapajós (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021) e ocupa área de drenagem de cerca de 141.278 km² e extensão da hidrovía principal aproximada de 1.481 km (EPE, 2009).

A região do Alto Teles Pires, compreende uma área aproximada de 37.500 km² com declividade média de 0,79 m km⁻¹ e vazão líquida média específica registrada de 28,14 L s⁻¹ km⁻². A região do Médio Teles Pires apresenta área de 82.300 km², declividade média de 0,29 m km⁻¹ e vazão líquida média específica 24,39 L s⁻¹ km⁻². Enquanto o Baixo Teles Pires, abrange a menor área com cerca de 23.000 km², declividade média de 0,14 m km⁻¹ e vazão líquida média específica com 23,13 L s⁻¹ km⁻² (EPE, 2009). A ampla extensão territorial da bacia hidrográfica do rio Teles Pires lhe confere diferentes características climáticas, vegetativas, geomorfológicas e socioeconômicas.

De acordo com a classificação climática de Köppen, a bacia apresenta dois climas predominantes, no Alto e parte do Médio Teles Pires o clima é caracterizado como Aw (tropical quente e úmido), com temperaturas médias mensais variando de 24 a 27 °C e precipitação média anual de 1.970 mm. A sazonalidade climática é definida por duas estações hídrica, o verão chuvoso (outubro a abril) e inverno seco (maio a setembro) (SOUZA et al., 2013). Enquanto em parte do Médio e no Baixo Teles Pires o clima é Am (monções) com estação seca de curta duração e elevadas precipitações durante a estação chuvosa variando de 2.000 a 3.000 mm (ALVARES et al., 2013).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, os solos mais recorrentes no Alto Teles Pires são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Cambissolos e Neossolos Quartzarênicos. A região do Médio Teles Pires é caracterizada pedologicamente por Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelhos, Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos e Plintossolos, e na região do Baixo Teles Pires são os Argissolos, Latossolos, Neossolos e os Plintossolos (IBGE, 2009).

O rio Teles Pires tem origem no bioma Cerrado (formações savânicas), com nascente nas Serras Azul e Finca Faca no município de Paranatinga, Mato Grosso, percorre uma extensa faixa de transição Cerrado-Amazônia e deságua no bioma Amazônia (formações florestais ombrófilas) na confluência com o rio Tapajós. A faixa de transição Cerrado-Amazônia tem aproximadamente 200 km de largura está situada entre o Alto e Médio Teles Pires (MARQUES et al., 2019).

O bioma Cerrado é formado por formações savânicas (cerradão), distribuindo-se na forma de campos limpos, campos sujos e cerradão (BUENO et al., 2013). O bioma Amazônia, por sua vez, apresenta formações florestais ombrófilas, com vegetação densa e de grande porte. A transição Cerrado-Amazônia é composta por florestas transicionais, misturando fisionomia do Cerrado e da Amazônia que lhe conferem uma hiperdinâmica da biodiversidade de vegetação e geomorfologia (OLIVEIRA et al., 2017; MARQUES et al., 2019).

Considerada uma das principais regiões da fronteira agrícola brasileira, a região de transição Cerrado-Amazônia recebe constantes pressões sobre os recursos naturais (hídricos e florestais) pelo intenso crescimento econômico e demográfico nas últimas décadas (ZAIATZ et al., 2018; SIMÕES et al., 2020). No contexto das regiões do Alto e Médio Teles Pires a base da economia é o agronegócio, com predomínio das atividades agrícolas (cultivo de soja, milho, algodão e feijão), pecuária (produção de carne e leite) e o extrativismo (vegetal e mineral) (CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2022).

O rio Teles Pires apresenta boa disponibilidade hídrica superficial, com potencial aproximado de 3.600 MW para geração de energia proveniente de hidrelétricas, visto que já existem 6 empreendimentos (Usinas Hidrelétricas - UHEs) instalados no seu curso principal e projetos de 7 Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs. A UHE Sinop tem como abrangência os municípios de Cláudia, Itaúba, Ipiranga do Norte, Sinop e Sorriso, com áreas inundadas de aproximadamente 78,78; 17,78; 41,59 175,37 e 21,79 km², respectivamente, e o maior reservatório com 330 km² (EPE, 2009).

As sub-bacias hidrográficas objetos do presente estudo são os rios Caiabi, Celeste, Nandico, Renato, ribeirão Preto e córrego Rosana. A população estimada na região dessas sub-bacias hidrográficas estudadas é de aproximadamente 292.430 habitantes abrangendo os municípios de Cláudia, Itaúba, Nova Santa Helena, Nova Ubitatã, Santa Carmem, Sinop, Sorriso e Vera do estado de Mato Grosso (IBGE, 2021).

2.2. Bacias hidrográficas

Bacia hidrográfica é uma unidade geomorfológica de captação natural da água da chuva, é delimitada pelos pontos mais altos do terreno formando uma linha divisora de água, constituída por uma rede de drenagem, ou seja, canais fluviais que se conectam e convergem para o ponto mais baixo da área compondo a hidrografia principal da bacia hidrográfica (MELLO, 2013). As bacias hidrográficas apresentam características climáticas (PINHEIRO et al., 2018; SOUSA et al., 2020; LOPES et al., 2021), edáficas (ALMEIDA et al., 2018; ANDRADE: RIBEIRO, 2020; BERIHUN et al., 2022), vegetativas (MENDES et al., 2018; ANDRADE et al., 2018; SOUZA et al, 2019) e fisiográfica (WENZEL et al., 2017; COSER: GRISON, 2019; SANTOS et al., 2019) distintas que contribuem para sua formação, dinâmica da água e de sedimentos no ciclo hidrológico e nos processos sedimentológicos.

O ciclo hidrológico pode ser compreendido nas diversas escalas espaciais (local, regional, continental e global) e temporais (meses, anos e décadas), iniciando com a interação da radiação solar sobre a água precipitada nos estados líquido e/ou sólido, e em estado de vapor, permitindo que a água componha os principais processos do ciclo hidrológico como a evaporação, evapotranspiração, precipitação, infiltração, escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos (COLLISCHONN: DORNELLES, 2015).

Na hidrologia, a dinâmica da água em bacias hidrográficas pode ser estudada por meio do balanço hídrico a partir da precipitação, da evapotranspiração, do escoamento de superfície, subsuperfície e de base, e da variação do armazenamento de água. O balanço hídrico permite determinar aproximadamente a quantidade de água disponível para manutenção dos ecossistemas natural e produtivo. A precipitação e a evapotranspiração representam a entrada e saída, respectivamente, e o escoamento superficial, denominado vazão líquida, é a parte disponível e variável (GROPPO et al., 2019; KOOL et al., 2022), que também é considerada como saída. No processo sedimentológicos de bacias hidrográficas, a chuva é o principal fator que inicia a produção e transporte de sedimentos (BORELLI et al., 2017; BERIHUN et al., 2022).

Na hidrossedimentologia, o processo inicial da sedimentação fluvial é a erosão do solo, ocasionada principalmente pela força cinética das gotas de água da chuva, que desagregam e transportam as partículas de solo para os cursos d'água (ZHANGA et al., 2019). O escoamento superficial formado pela chuva transporta os sedimentos para os corpos d'água, onde ocorre a deposição das partículas sólidas maiores e mais pesadas. Os processos

de transporte e deposição dessas partículas são dinâmicos e dependentes de diversos fatores, como a forma, o tamanho e a massa das partículas, além da declividade, morfologia e velocidade de escoamento superficial do curso d'água (LEPESQUEUR et al., 2019; PEIXOTO et al., 2021).

As bacias hidrográficas funcionam como unidades de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos para atender os diversos usos consuntivos, que são alteração significativa da quantidade de água, e não consuntivos, ou seja, pouca alteração no volume de água (COLLISCHONN: DORNELLES, 2015; STINGHEN: MANNICH, 2022). Dessa forma, é importante a instalação de seções de monitoramento distribuídos pela rede de drenagem da bacia hidrográfica para compreender e quantificar a dinâmica das variáveis hidrológicas, principalmente chuva e vazão (SOUZA et al., 2017; CARVALHO et al., 2022).

Além das variáveis hidrológica, é preciso conhecer o tamanho e formato da área de drenagem, a densidade da rede de drenagem, o tipo de solo e cobertura, o relevo, a declividade, o regime hidrológico, a geração de escoamento superficial, se é perene (permanente), intermitente (escoamento apenas na época das chuvas) ou efêmero (escoamento durante e logo após um evento de chuva) (MELLO, 2013). O levantamento básico dessas informações permite desenvolver ferramentas adequadas para o manejo de bacias hidrográficas (BERIHUN et al., 2022).

2.3. Vazão líquida

Fluviometria é a parte da hidrometria responsável pelas medições das principais características hidráulicas do escoamento superficial, notadamente o nível ou lâmina d'água, a velocidade e vazão líquida de um canal fluvial. Para conhecer a dinâmica hidrossedimentológica dos rios, da sazonalidade das vazões e da influência do regime pluviométrico com distribuições espaciais e temporais é preciso a realização do monitoramento contínuo realizado pela instalação de estações fluviométricas ou seções hidrológicas de controle em pontos previamente definidos (ANA, 2021).

Existem critérios para a escolha da seção hidrológica controle para o monitoramento contínuo das condições hidráulicas, visando a obtenção de dados com boa qualidade. A escolha das seções segue os seguintes critérios: facilidade de acesso e logística, local livre de ações antrópicas, trecho com velocidades bem distribuídas, leito e margem estáveis, bem definidos e livres de vegetação, rochas e outros obstáculos, trecho retilíneo com margens

paralelas, perfil longitudinal regular e livres de remansos e local distante das confluências, local com condições adequadas para instalação, manutenção e operação dos equipamentos (SANTOS et al., 2001). Dessa forma, no presente estudo foram definidas as seções transversais com a instalação de oito estações fluviométricas para o monitoramento das vazões líquida e sólida nas sub-bacias dos rios Caiabi (1 e 2), Celeste, Nandico, Renato (1 e 2), ribeirão Preto e córrego Rosana (Figura 1 e Tabela 1).



Figura 1. Seções transversais de monitoramento fluviométrico das oito estações fluviométricas de sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.

Tabela 1. Informações gerais das oito estações fluviométricas (EF) de sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Sub-bacia	Área total (km ²)	Hidrografia total (km)	EF	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Subárea (km ²)	Hidrografia (km)
Caiabi	493	63	Caiabi 1	12°10'32" S	55°23'05" W	372	340	40
			Caiabi 2	12°09'27" S	55°28'30" W	345	454	53
Celeste	1.800	220	Celeste	12°17'39" S	55°33'56" W	319	1788	211
Nandico	590	64	Nandico	12°13'38" S	55°31'31" W	334	570	57
Preto	244	30	Preto	11°58'01" S	55°37'20" W	325	243	25
Renato	1.336	95	Renato 1	11°31'18" S	55°12'12" W	345	130	17
			Renato 2	11°04'06" S	55°14'59" W	281	1181	80
Rosana	85	21	Rosana	12°00'37" S	55°31'08" W	332	47	11

A frequência de medição da vazão líquida e nível d'água pode ser feita em escala diária, mensal e sazonal, contudo recomenda-se manter o monitoramento detalhado das variações do nível da água por meio de linígrafos, esses são sensores de pressão, ultrassônico ou sistema de boia com contrapeso que podem ler e armazenar dados em intervalos de minutos. Na mesma seção hidrológica controle são instaladas réguas linimétricas, que tem a mesma função descrita acima, possibilitando medidas pontuais e instantâneas que são utilizadas para a construção da curva-chave (ANA, 2021).

As curvas-chave líquida são equações ajustadas a partir das medidas instantâneas da vazão com as medidas do nível d'água obtida pela régua linimétrica; a definição de curvas-chave é necessária para futuras estimativas das vazões líquidas (ANA, 2021). Além disso, o desenvolvimento e calibração de modelos hidrológicos baseados em dados contínuos são importantes para previsões de eventos hidrológicos extremos, como escassez hídrica e ocorrência de inundações (JOHANSSON et al., 2015; CASAVECCHIA et al., 2018; ULIANA et al., 2019; ALMEIDA et al., 2020; LOPES et al., 2021; BERIHUN et al., 2022; KOOL et al., 2022).

Esses modelos servem como ferramentas que ajudam a tomar medidas mitigadoras como implementação de práticas de manejo da terra (BERIHUN et al., 2022), definição de projetos hidroagrícolas e florestais (ZOLIN et al., 2016; ZOLIN et al., 2021), regularização de vazões em reservatórios (ABDUL RAZAD et al., 2018; PASSAIA et al., 2020) e disponibilidade para abastecimento de água para as diversas atividades antrópicas (STINGHEN; MANNICH, 2022).

As medidas de vazão líquida em campo podem ser realizadas por diferentes métodos e equipamentos (SANTOS et al., 2001; CARVALHO, 2008; GAMARO et al., 2013; MALDONADO et al., 2015). Os equipamentos mais utilizados são os molinetes hidrométricos e os ADCPs (Perfiladores de Corrente Acústico Doppler). Esses equipamentos estimam a vazão líquida instantânea do rio, a partir da obtenção das velocidades e área de segmentos de uma seção transversal, fornecendo leituras confiáveis estatisticamente, desde que o operador siga os critérios de medição. Contudo, cada equipamento tem uma metodologia de medição que lhes permitem diferir em alguns aspectos operacionais (GAMARO, 2012).

A estimativa de vazão líquida com o molinete hidrométrico é a mais tradicional e consiste em realizar medições diretas e pontuais da velocidade da água (SANTOS et al., 2001). A seção transversal é fragmentada em subseções, representadas por verticais fixas posicionadas longitudinalmente ao longo da seção e distanciadas entre si conforme a largura da seção transversal (Tabela 2), em cada vertical é definido a posição e o número de pontos de medidas que podem variar conforme a profundidade das seções transversais (Tabela 3).

Tabela 2. Distância entre verticais fixas, conforme a largura da seção transversal do rio.

Largura do rio (m)	Distância entre verticais (m)
<3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1
15 a 30	2
30 a 50	3
50 a 80	4
80 a 150	6
150 a 250	8
>250	12

Fonte: SANTOS et al. (2001).

Tabela 3. Profundidade, número e posição dos pontos da vertical de medição e o cálculo da velocidade média para a respectiva vertical.

P (m)	Nº de pontos	Posição dos pontos	Velocidade média na vertical
0,15 a 0,60	1	0,6 P	$V_{0,6}$
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8 P	$(V_{0,2} + V_{0,8})/2$
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6 e 0,8 P	$(V_{0,2} + 2*V_{0,6} + V_{0,8})/4$
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 P	$(V_{0,2} + 2*V_{0,4} + 2*V_{0,6} + V_{0,8})/6$

$$> 4,00 \quad 6 \quad S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 \text{ P e F} \quad [V_S + 2*(V_{0,2} + V_{0,4} + V_{0,6} + V_{0,8}) + V_F]/10$$

Em que: P é a profundidade do rio (m); S é o ponto muito próximo à superfície; F é o ponto muito próximo ao fundo/leito. Fonte: SANTOS et al. (2001).

O molinete hidrométrico utilizado no presente estudo é da fabricante *JCTM Ltda*, modelo *MLN-7* com faixa de medição de 0,025 a 10 m s⁻¹ e hélice de diâmetro 120/125 mm. Esse equipamento é composto por um contador de giros eletrônico conectado por um fio a uma hélice de metal que é posicionada contra a direção de fluxo da água, a hélice gira no sentido contrário do fluxo sob ação do movimento da água do rio e envia sinais elétricos ao contador de giros, que relaciona o número de rotação por segundo com a velocidade do escoamento.

As medições podem ocorrer a vau, com o molinete acoplado a haste metálica (Figura 2), ou, no guincho fluviométrico (Figura 3), modelo *GFL-25* e um lastro de 15 kg, da mesma fabricante do molinete e do modelo *LAS-15*, instalados a uma embarcação (ANA, 2014). Para se obter a velocidade média em cada vertical, as rotações foram convertidas em velocidades por meio de uma equação linear estabelecida pela fabricante. Salienta-se que essa equação dispõe de coeficientes diferentes para rotações iguais ou inferiores, e superiores a 0,2730 rotações por segundo (Tabela 4). A vazão líquida total da seção transversal é determinada pelo somatório do produto da velocidade da água e área molhada de cada subseção (ANA, 2014).

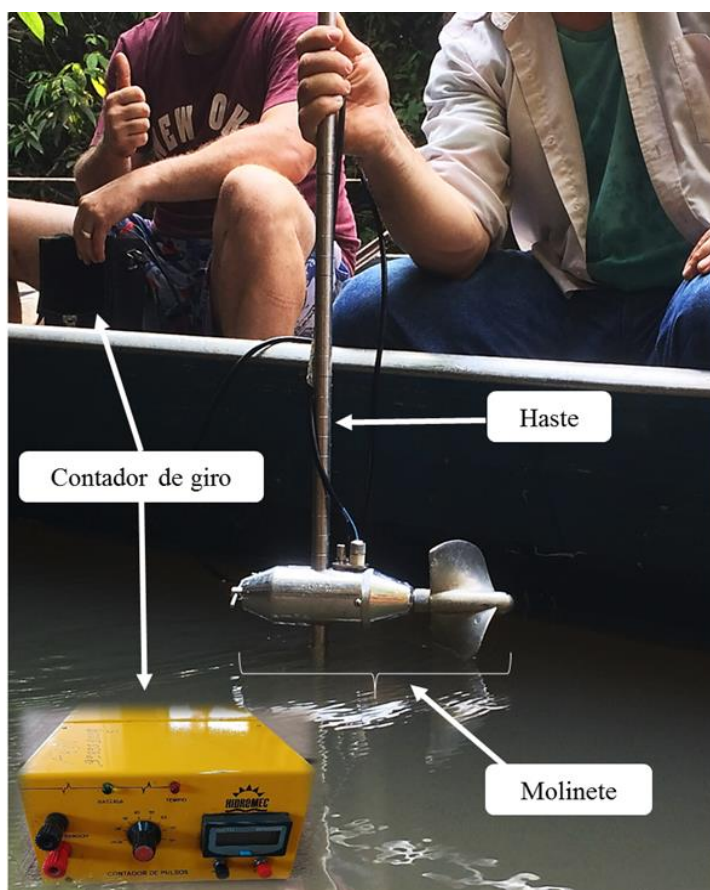


Figura 2. Medição de vazão líquida em embarcação com molinete hidrométrico *MLN-7* acoplado a haste metálica.



Figura 3. Medição de vazão líquida em embarcação com molinete hidrométrico *MLN-7* acoplado ao guincho fluviométrico.

Tabela 4. Especificações da equação de calibração do molinete hidrométrico *MLN-7*.

Condição	Coeficientes da equação		Equação
	a	b	
$N \leq 0,2730$	0,01051736	0,24938665	$V = a + b * N$
$N > 0,2730$	0,00451692	0,27136711	$V = a + b * N$

Em que: N é o número de rotações por segundo; V é a velocidade (m s^{-1}).

As vantagens do molinete hidrométrico estão associadas à sua robustez, fácil operação, melhor custo-benefício, e possibilita a medição em rios com lâmina d'água acima de 0,2 m. Entretanto, como desvantagens exige uma equipe de campo com pelo menos 5 pessoas dependendo do tamanho da seção transversal do rio e demanda mais tempo e instrumentos para medição completa (ANA, 2021).

A tecnologia acústica para obtenção da vazão líquida foi inserida no Brasil no início da década de 1990 com as primeiras medições no rio Solimões em Manacapuru e na Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional. A utilização dessa tecnologia teve início em mares e oceanos com medições estáticas, e com o tempo os ADCPs foram sendo adaptados para medições pontuais e dinâmicas na orientação vertical (*Up-Down*), horizontal e inclinada para variadas condições hidrodinâmica e mais turbulentas da água (GAMARO, 2012).

Existem diferentes modelos de ADCPs com embarcação para diversas finalidades como a medição de vazão líquida, batimetria, concentração e transporte de sedimentos em rios naturais e reservatórios (MUELLER, 2013; FARINA et al., 2015; CHEN et al., 2021; ENDOH et al., 2022; MARINHO et al., 2022). Essas medições seguem as diretrizes de aquisição e processamento determinadas pela *USGS* (Serviço Geológico dos Estados Unidos) que asseguram a qualidade dos dados (MUELLER et al., 2013).

O princípio de funcionamentos dos ADCPs é o Efeito Doppler, que estima a vazão líquida a partir da velocidade de propagação de uma onda sonora refletida pelas partículas em suspensão, que assume ser a mesma da velocidade da água. O transdutor emite pulsos sonoros de frequência conhecida que ao colidirem com as partículas sólidas em suspensão na água esses pulsos sonoros são refletidos e parte são lidos pelo transdutor (Figura 4). A frequência de retorno desses pulsos é proporcional à velocidade de movimentação das partículas e a distância entre o transdutor e as partículas (RD INSTRUMENTS, 1996; GAMARO, 2012).

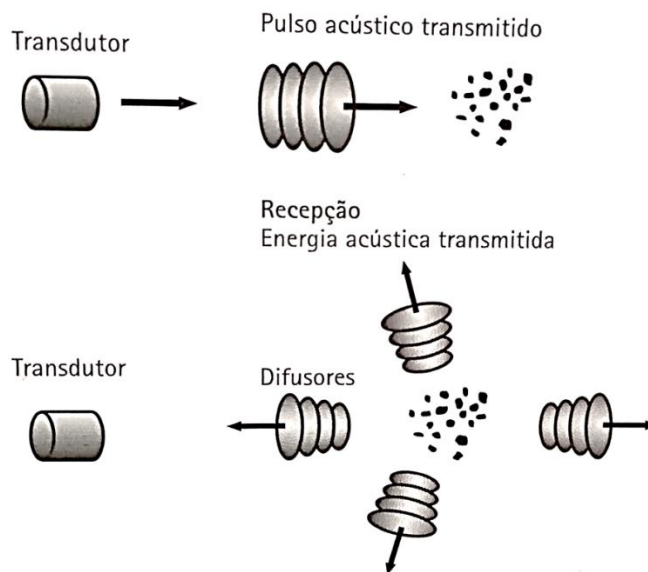


Figura 4. Pulsos sonoros em colisão com as partículas sólidas em suspensão na água, denominado Efeito Doppler.

Fonte: SIMPSON, 2001.

O Perfilador de Correte Acústico Doppler modelo *RiverRay* da fabricante *Teledyne Marine RD Instruments* utilizado no presente estudo (Figura 5) apresenta um transdutor formado por cerâmica piezoelétrica (matriz de 58 x 58 elementos), com quatro feixes que atuam em pares com 30° de ângulo de abertura entre si, e operam na frequência de 600 kHz, com alcance de pulso de fundo para estimativa da velocidade da água entre 0,4 e 60 m. O transdutor é instalado ao trimarã e operado manualmente fazendo a travessia de margem a margem do rio, além de ser posicionado contra a direção do fluxo com emissão de onda seguindo a orientação vertical, o que o torna mais preciso para o levantamento batimétrico detalhado (GAMARO, 2012; MUELLER et al., 2013).

No ADCP *RiverRay* vem acoplado sensores padrão de temperatura, pressão, inclinação, profundidade acústica, bússola interna, GPS (Sistema de Posicionamento Global) e uma bateria de 12 V. A transmissão dos dados para o notebook ocorre via bluetooth com alcance de 200 m e os softwares de aquisição e processamento são o *WinRiver II* (Figura 6) e o *QRev 3.43* (Figura 7), respectivamente (RD INSTRUMENTS, 1996; MUELLER et al., 2016). Além disso, o sistema operacional do *RiverRay* trabalha com múltiplos modos de operação, que atuam de forma independente do operador em campo, ou seja, dependendo da profundidade medida pelos pulsos de fundo, é determinado o modo de operação (modos 1, 5, 8, 11, 12 e modos de fundo) (GAMARO, 2012; MUELLER et al., 2013).

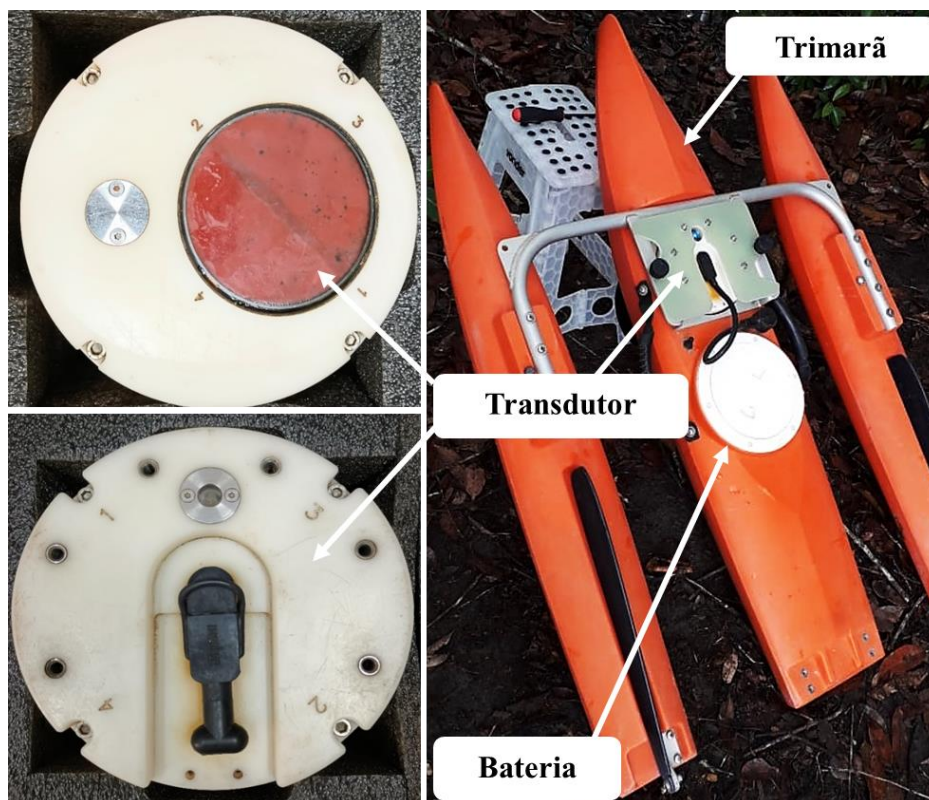


Figura 5. Perfilador de Correte Acústico Doppler – ADCP, modelo RiverRay fabricado pela Teledyne Marine RD Instruments.

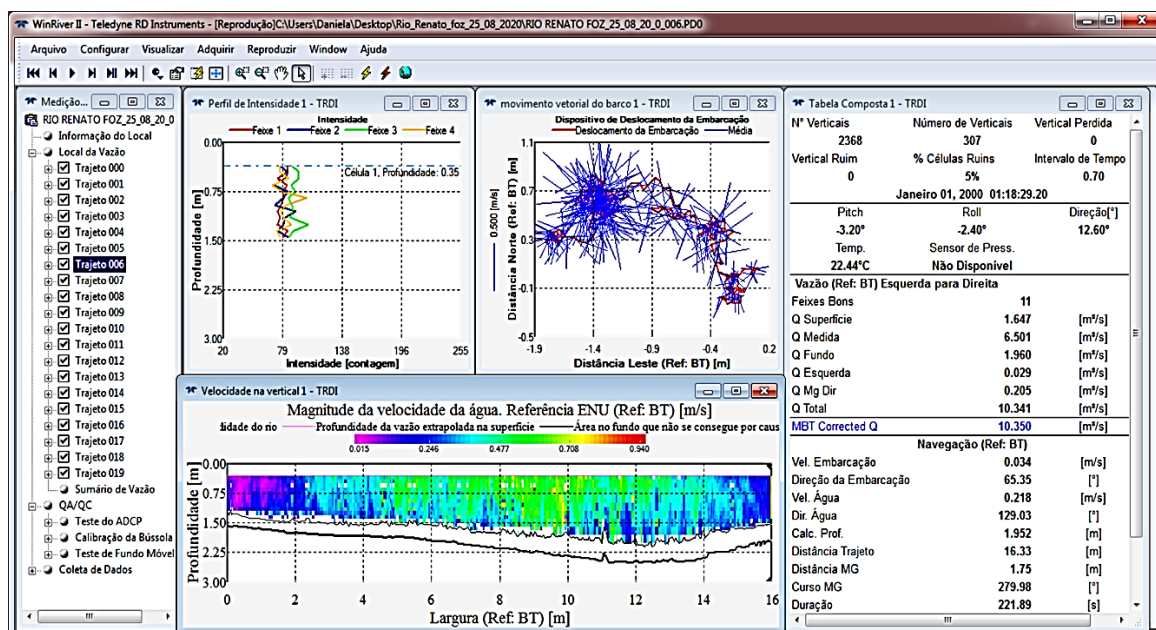


Figura 6. Interface do software de aquisição WinRiver II com a medição em campo da vazão líquida com o ADCP RiverRay.

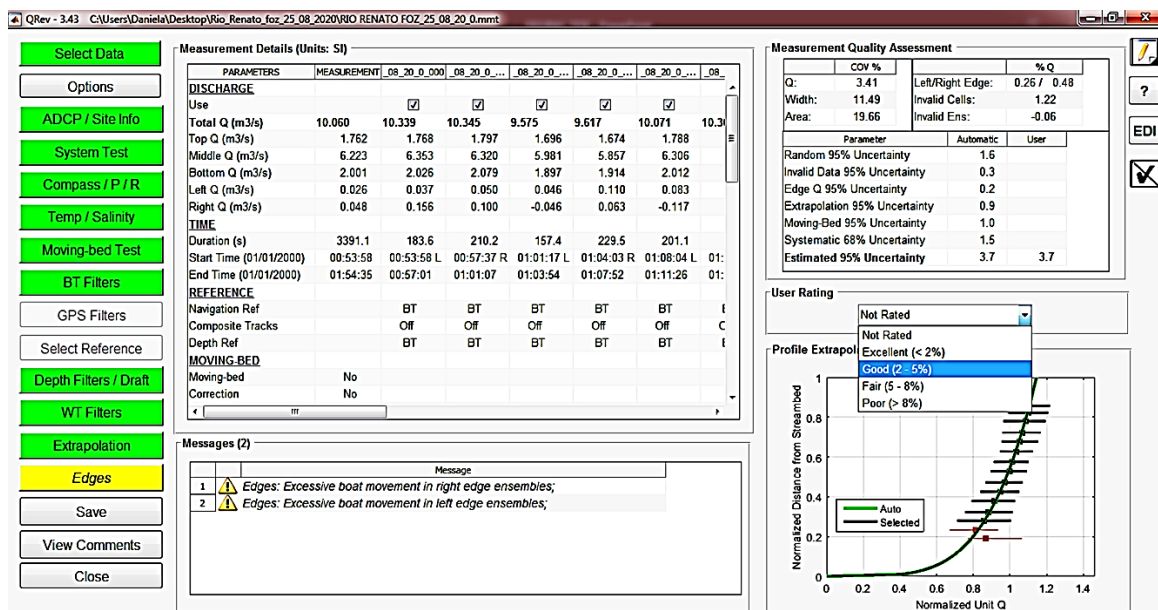


Figura 7. Interface do software de processamento QRev 3.43 – MATLAB para a avaliação automatizada dos dados conforme as políticas da USGS.

Para estimativa da vazão líquida instantânea, o ADCP realiza simultaneamente um detalhamento da velocidade da água, área molhada e profundidade da seção transversal a partir de um conjunto de verticais formado por células que fornecem valores individuais das variáveis supracitadas acima (Figura 8). O somatório dos produtos entre a velocidade de escoamento da água e área de cada vertical resulta na vazão líquida medida (MUSTE et al., 2004). Além da medição dessas variáveis, é necessária a calibração da bússola interna que é responsável por determinar a direção do fluxo d'água em diferentes profundidades, do movimento da embarcação com relação ao norte magnético e do teste de fundo (leito) móvel. Essa última variável indica a velocidade dos sedimentos arrastados no leito do rio e é computado no cálculo de correção da vazão líquida total (GAMARO, 2012).

Dentre as vantagens do ADCP destacam-se a otimização de tempo e de equipe para operação em campo desonerando a logística de campo, medições detalhadas e acuradas, e a trajetória de leitura não necessariamente precisa ser perpendicular à seção. Entretanto, existe algumas limitações do equipamento e da seção transversal selecionada para medição que podem comprometer a qualidade dos dados, como áreas não medidas e erros de medição (GAMARO, 2012; ANA, 2021).

As áreas não medidas dependem das limitações do ADCP e da morfologia e hidrodinâmica da seção transversal, elas são calculadas por extrapolação e interpolação (Figura 9) (MUELLER, 2013). As limitações às margens ocorrem principalmente por: a) pela

baixa profundidade e velocidade da água, além de existir na camada superficial a demanda por uma profundidade de imersão do transdutor e do espaço necessário para emissão e recepção do sinal; b) e, no leito ocorre uma dispersão do sinal fora do feixe principal, como também devido a frequência de retorno apresentar-se fora da faixa de medição, ou seja, produz um eco muito forte que não consegue ser medido (GAMARO, 2012).

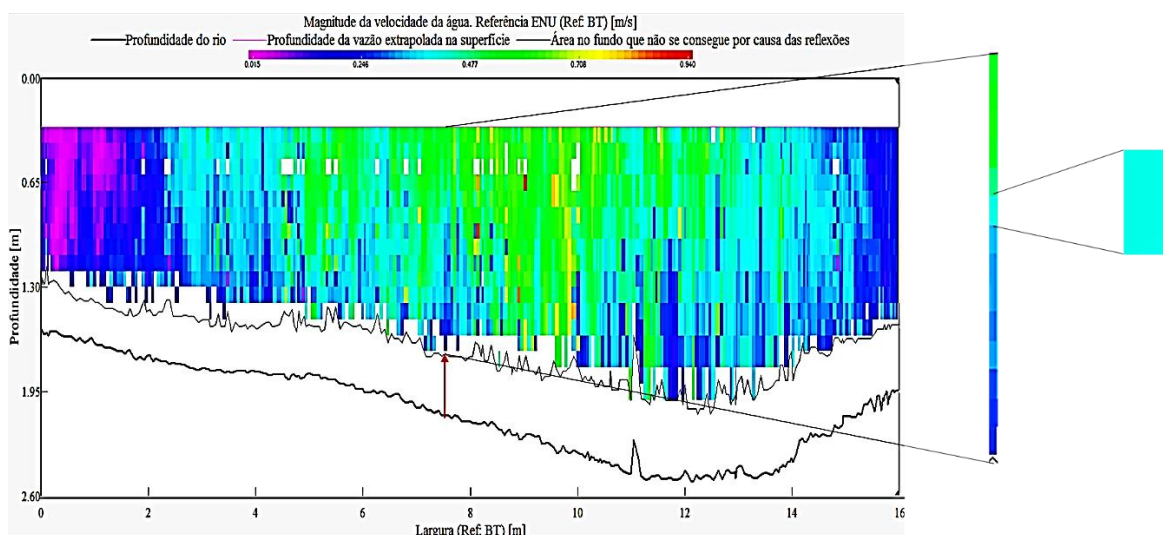


Figura 8. Perfil transversal da velocidade da água de um transecto medido pelo ADCP *RiverRay* diferenciando vertical (conjunto de células).

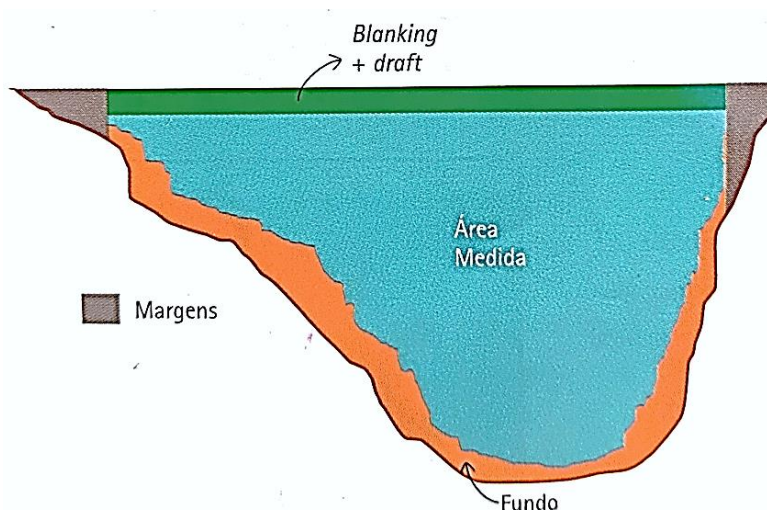


Figura 9. Representação na seção transversal de área não medidas pelo ADCP (margem, camada superficial e fundo), a qual terá a vazão líquida estimada por extrapolação ou interpolação.

Fonte: GAMARO, 2012.

A qualidade da medição inicia no campo com a escolha da seção transversal, da seleção do modelo e montagem adequados do equipamento para o tamanho da seção e,

durante o processo de medição, deve-se observar erros aleatórios que podem ser identificados e minimizados. Dentre os variados erros destacam-se alguns devido ao tempo mínimo de medição, a elevada inclinação do equipamento no sentido longitudinal e transversal do barco (*pitch* and *roll*), a perda de células e de verticais (*bins* and *beams*), presença de plantas, dunas e rochas, alta turbulência, correntes bidirecionais, erro na profundidade do ADCP (*draft*), erros de margem, erro de análise, velocidade da embarcação elevada, vazão líquida medida inferior a 50% da vazão líquida total, entre outros erros (MUELLER et al., 2013).

O processamento das medições de vazão líquida com ADCP no barco em movimento é avaliado no *QRev 3.43*, que é um software MATLAB desenvolvido pelo USGS (<https://www.usgs.gov/software/qrev-2-and-3>). Esse software realiza uma avaliação automatizada da qualidade dos dados usando algoritmos consistentes que revisa, processa, interpreta e gera um feedback ao usuário a partir de gráficos, tabelas e parâmetros de estimativa de incerteza, além de fornecer uma classificação da medição (MUELLER et al., 2016).

A classificação dos dados ocorre com base nos parâmetros de incertezas aleatória, de dados inválidos, de vazão de borda, de extrapolação, do teste de leito móvel, de incerteza sistemática. Com base na estimativa de incerteza, todas com 95% de nível de confiança, permite-se categorizar a medição (Figura 10) como excelente ($< 2\%$); boa (entre 2 e 5%); regular (entre 5 e 8%), e ruim ($> 8\%$) (MUELLER et al., 2016).

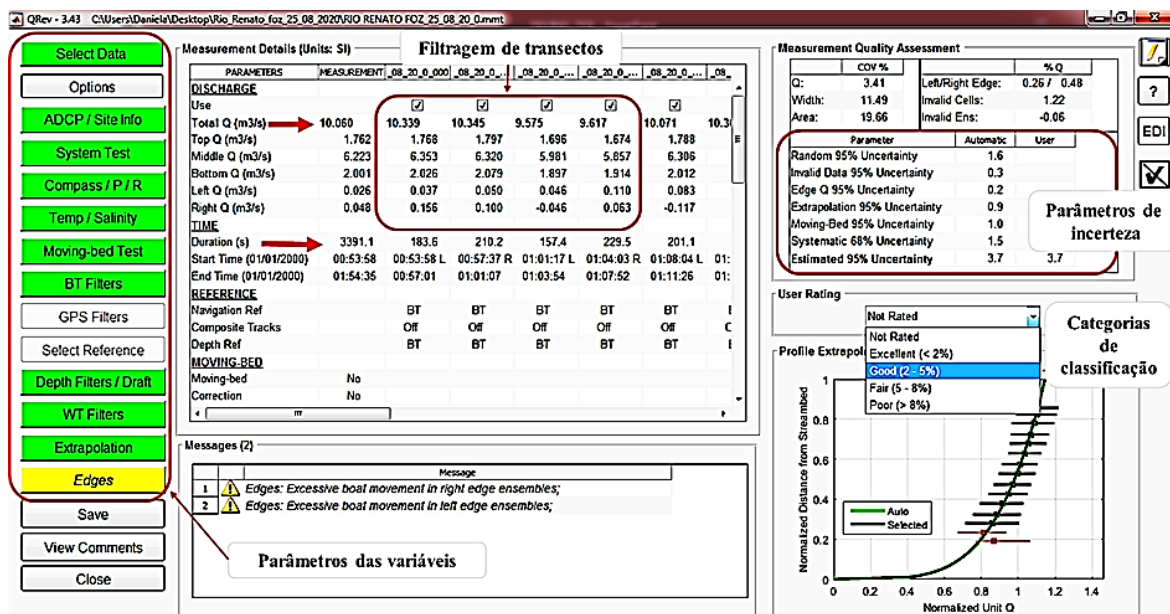


Figura 10. Interface do software QRev 3.43 demonstrando a avaliação automatizada dos dados conforme as diretrizes da USGS.

2.4. Vazões sólidas

O processo sedimentológico (erosão) natural ocorre no tempo geológico, pela ação combinada ou isolada dos agentes físicos (água, vento, gelo, topografia, gravidade e cobertura vegetal), químicos e biológicos (microrganismos e ações humanas), fragmentando as rochas em partículas menores que podem ser transportadas e depositadas pelos mesmos agentes em outros ambientes (BORRELLI et al., 2017).

O processo erosivo pode ser acelerado pelas atividades antrópicas e resultar em grandes perdas de solo por erosão hídrica e produção de sedimentos (vazões sólidas) em bacias hidrográficas. O transporte e a deposição desses sedimentos são dependentes de diversos fatores, como a forma, o tamanho e a massa das partículas, além da declividade, morfologia e velocidade de escoamento superficial dos cursos d'água (LEPESQUEUR et al., 2019; PEIXOTO et al., 2020; PEIXOTO et al., 2021). Esses processos hidrossedimentológicos são complexos e dinâmicos e dependentes das interações entre as intensidades e duração das precipitações pluviais com a densidade da cobertura vegetal (ALMEIDA et al. 2019; SOUSA et al., 2020), do tipo de solo e das práticas de manejo (BERIHUN et al., 2022; HIMANSHU et al., 2019; RIEGER et al., 2016; ZOLIN et al., 2016).

Nos corpos d'água o transporte de sedimentos apresenta distribuição horizontal e vertical ao longo do curso d'água, sendo dependente das características hidráulicas

(CARVALHO, 2008), do tipo de material e da granulometria dos sedimentos produzidos em cada bacia hidrográfica (LEPESQUEUR et al., 2019). A vazão sólida total produzida e transportada pelos cursos d'água é representada pelas partículas finas em suspensão e por partículas maiores que são arrastadas longitudinalmente ou depositadas no leito do rio (Figura 11), entre ambas, ocorre uma faixa de material saltante nomeada de zona não amostrada, mas que é corrigida em cálculos da vazão sólida total por equações ou por meio da amostragem em campo (CARVALHO, 2008).

A determinação *in loco* da carga de sedimentos em suspensão é fundamental em função das variações sazonais, visto que o transporte de sedimentos aumenta durante a estação chuvosa (PEIXOTO et al., 2021) e corresponde a maior fração, aproximadamente 90%, da vazão sólida total (CARVALHO, 2008). A determinação da concentração e da vazão sólida em suspensão pode ser feita por método direto, indireto, estimados por equações matemáticas como as curvas-chave para sedimentos (PEIXOTO et al., 2020; MENEZES et al., 2021; SMINIONI et al., 2021) e por meio de geotecnologias (DORNELES et al., 2019; MACEDO et al., 2021; MARINHO et al., 2022).

Dentre os métodos de amostragem, o de igual incremento de largura (IIL) é o mais utilizado para amostragem de sedimentos em suspensão, em função da sua simplicidade e maior detalhamento hidrossedimentológico na seção transversal (CARVALHO, 2008; SIMIONI et al., 2021; PEIXOTO et al., 2021). O método IIL consiste em dividir a seção transversal em segmentos (subseções) ou verticais em igual largura, permitindo a obtenção de amostras de água e sedimentos em suspensão em cada subseção. Quanto a amostragem pode ser pontual, por integração na vertical, amostragem instantânea ou integração pontual (Figura 11) (CARVALHO, 2008).

Os sedimentos arrastados também podem ser determinados a partir da medição direta com amostradores portáteis ou estruturas fixas e por métodos indiretos, que são aplicados quando ocorrem limitações de equipamentos, recursos humanos e financeira. Salienta-se que todas as vazões sólidas em suspensão, de arrasto e total podem ser estimadas e simuladas por modelos compostos de grandezas físicas e hidráulicas do canal fluvial (CARVALHO, 2008; GUAN et al., 2015; LEPESQUEUR et al., 2019).

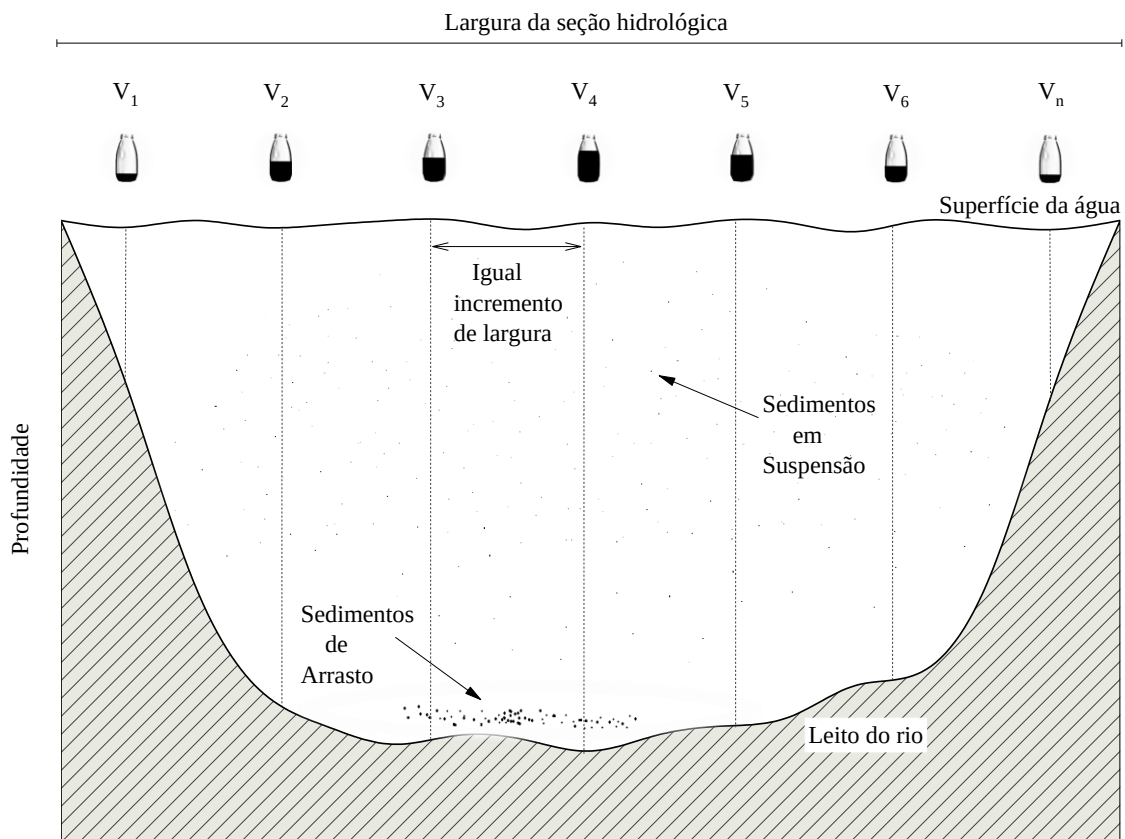


Figura 11. Representação de uma seção transversal hipotética demonstrando a amostragem de sedimentos em suspensão por integração pelo método do igual incremento de largura (IIL), onde V_i indica o volume coletado.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

Os estudos voltados para o desenvolvimento de equações de estimativa e de modelagem hidrossedimentológica tem-se destacados nos últimos anos, diante a sua importância para a tomada de medidas preventivas e de controle da produção, transporte e deposição de sedimentos (GIROLAMO: LO PORTO, 2015; ABDUL RAZAD et al 2018; CHEN: CHAU, 2019; SIMIONI et al., 2021; MARINHO et al., 2022; SERRA et al., 2022). Isso se deve aos impactos negativos gerados pelo transporte de elevadas concentrações de sedimentos, como a poluição dos corpos hídricos, redução e extinção de espécies aquáticas (ANDRIETTI et al, 2016; WANG et al., 2016), empobrecimento de solos agricultáveis com a perda da camada superficial, assoreamentos e maior suscetibilidade a formação de enchentes, alterações do volume e fluxo d'água, da morfologia do leito e da margem de bacias hidrográficas (ZHANGA et al., 2019), diminuição da vida útil de obras, de reservatórios, abrasão de turbinas e outros equipamentos (ZIEMBOWICZ et al., 2018).

3. CAPÍTULO 1 – VAZÕES LÍQUIDAS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO EM AFLUENTES DO RIO TELES PIRES, NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA

Resumo

A intensificação dos conflitos associados aos usos da água na região de transição dos biomas Cerrado e Amazônia causados pelo crescimento populacional e econômico, aliado ao interesse de geração de energia proveniente de usinas hidrelétricas, despertam a necessidade de quantificar a disponibilidade hídrica superficial de rios contribuintes com diferentes áreas de drenagem. O presente estudo estimou e comparou medições *in loco* da vazão líquida (Q_L) e profundidade de rios da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, pelos métodos de referência (molinete hidrométrico *MLN-7* e haste de metal/guincho) e por Perfilador de Corrente Acústico por Efeito Doppler (ADCP *RiverRay*), além disso, avaliou o tempo de medição total sob incerteza de estimativa pelo ADCP. As medidas de campo foram realizadas em intervalos mensais entre março de 2020 a outubro de 2021 buscando representar a sazonalidade hídrica e as variações de profundidade e de Q_L nas seções transversais dos rios Caiabi 1 e 2, Celeste, Preto e Renato. Os rios avaliados apresentaram vazão líquida entre 3,48 e 60,78 m³ s⁻¹ pelo molinete e entre 2,66 e 54,30 m³ s⁻¹ pelo ADCP, enquanto as profundidades obtidas foram de 0,17 a 6,34 m pela haste/guincho e de 0,65 a 6,20 m pelo ADCP. Os métodos resultaram em medição da vazão líquida e profundidade semelhantes em cada uma das seções transversais, sendo que o desempenho estatístico do modelo de regressão linear foi satisfatório com índice de concordância de Willmott de 0,9977 e de 0,9819 para estimativas da Q_L e da profundidade das seções transversais, respectivamente. O ADCP mediu com acurácia a vazão líquida e profundidade em seções transversais rasas (até 6,5 m) de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires com relação ao método de referência. A determinação do tempo de medição total e pares de transectos para obtenção de Q_L precisas pelo ADCP depende das características hidráulicas dos cursos d'água.

Palavras-chave: Hidrologia de superfície; Batimetria; Método acústico; Molinete hidrométrico; ADCP *RiverRay*.

FLOW MEASUREMENT AND MEASUREMENT METHODS IN TRIBUTARIES OF THE TELES PIRE RIVER IN THE CERRADO-AMAZON TRANSITION

Abstract

The intensification of conflicts associated with the use of water in the transition region of the Cerrado and Amazon biomes caused by population and economic growth, combined with the interest in generating energy from hydroelectric plants, raise the need to quantify the surface water availability of rivers contributing with different drainage areas. The present study estimated and compared *in loco* measurements of liquid flow (Q_L) and depth of rivers in the Teles Pires river basin, by reference methods (*MLN-7* hydrometric windlass and metal rod/winch) and by Acoustic Current Profiler

by Doppler Effect (ADCP *RiverRay*), in addition, evaluated the total measurement time under estimation uncertainty by ADCP. Field measurements were carried out at monthly intervals between March 2020 and October 2021, seeking to represent the water seasonality and depth and Q_L variations in the cross sections of the Caiabi 1 and 2, Celeste, Preto and Renato rivers. The evaluated rivers had a net flow between 3.48 and 60.78 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ by the windlass and between 2.66 and 54.30 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ by the ADCP, while the depths obtained were from 0.17 to 6.34 m by the rod/winch and from 0.65 to 6.20 m by the ADCP. The methods resulted in similar measurements of net flow and depth in each of the cross sections, and the statistical performance of the linear regression model was satisfactory with a Willmott concordance index of 0.9977 and 0.9819 for estimates of Q_L and of the depth of the cross sections, respectively. The ADCP accurately measured net discharge and depth in shallow (up to 6.5 m) cross-sections of Teles Pires River in relative to the reference method. The determination of the total measurement time and pairs of transects to obtain accurate Q_L by ADCP depends on the hydraulic characteristics of the watercourses.

Keywords: Surface hydrology; Bathymetry; Acoustic method; Hydrometric windlass; ADCP *RiverRay*.

Introdução

A gestão dos recursos hídricos é cada vez mais necessária, diante à sua importância para as diversas realidades hidrológicas e aumento da demanda múltipla do uso da água para abastecimento humano, industrial, dessedentação animal, irrigação agrícola, geração de energia, recreação, turismo, navegação, manutenção dos ecossistemas naturais e dentre outros (STINGHEN: MANNICH, 2022). Nas últimas décadas com o aumento populacional, os conflitos associados aos usos da água têm aumentado expressivamente nos aspectos socioeconômicos, independentemente da escala espacial (PAIVA et al., 2020). Nesse sentido, para a adequada gestão da água é preciso compreender e quantificar esse recurso natural por meio das componentes do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas.

O Brasil é o país mais abundante em disponibilidade hídrica superficial, mas com distribuição espacial e temporal desuniforme sobre as regiões/biomas (ANA, 2021). A intensificação dos conflitos pelos usos da água e mudanças no clima, causados pelo aumento populacional e atividades antrópicas, geram impactos na cadeia produtiva, na qualidade de vida da sociedade e na manutenção dos ecossistemas naturais (LAPOLA et al., 2019). Os impactos como, a escassez hídrica, enchentes e inundações, bem como, perda de qualidade da água superficial (SEKHARAN et al., 2022), aumento nas concentrações de partículas sólidas em suspensão (PEIXOTO et al., 2020), e presença de contaminantes e poluentes

(WANG et al., 2016) são reflexos da supressão da vegetação natural, ausência de práticas conservacionistas (BERIHUN et al., 2022), despejo de efluentes de processos industriais e redes de esgoto sem tratamento nos corpos d'água (GU et al., 2022; SEKHARAN et al., 2022).

Nesse aspecto, levantar informações hidrológicas sobre a disponibilidade hídrica superficial de cursos d'água naturais podem servir de subsídio para o planejamento e a gestão adequada da água e do solo. Uma das componentes do ciclo hidrológico possível de ser monitorada e quantificada é a vazão líquida de um rio, denominada de escoamento superficial, subsuperficial e de base, que é dependente das características das chuvas (intensidade, quantidade, duração e frequência), cobertura vegetal, solo, clima (ALMEIDA et al., 2019; SOUSA et al., 2020) e das características fisiográficas da bacia hidrográfica (WENZEL et al., 2017).

Em rios naturais a estimativa da vazão líquida é complexa, pois a seção transversal pode ser irregular, nesse caso é recomendada a medição *in loco* da vazão (COLLISCHONN: DORNELLES, 2015). As principais variáveis obtidas *in loco* são a velocidade e o nível da água e, por sua vez, a vazão líquida, independentemente do método. Dentre os métodos, o mais tradicional é a medição de vazão por velocidade e área que pode utilizar equipamento mecânico, como o molinete hidrométrico, ou, em caso mais refinado, por equipamento eletroacústico como o Perfilador de Corrente Acústico por Efeito Doppler (ADCP) (GAMARO, 2012).

Os equipamentos supracitados fornecem medições com acurácia e limites de incerteza aceitáveis, entretanto, apresentam diferenças metodológicas e no nível de detalhamento das informações obtidas na seção transversal. O molinete realiza medições pontuais da velocidade da água por meio de pulsos eletromecânicos, suas limitações se concentram na maior demanda por tempo e equipe de campo e restrição a velocidades e profundidades elevadas na seção (ANA, 2021). O ADCP modelo *RiverRay* faz um mapeamento contínuo da velocidade da água por meio da velocidade e frequência de onda acústica emitida e refletida nas partículas sólidas em suspensão, que se deslocam na mesma velocidade da água, e sendo suas principais limitações não medir velocidade da água em profundidades $< 0,4$ m, em áreas marginais, de superfície e de fundo do corpo d'água (MUELLER, 2013).

A determinação *in loco* da vazão líquida em cursos d'água naturais são fundamentais para a definição de curvas-chave e calibração de modelos hidrológicos que permitem fazer

previsões de eventos de inundações, escassez hídrica, perda de solo e assoreamento de reservatórios, além de ajudar na tomada de medidas mitigadoras para esses problemas como, na implementação de práticas adequadas de gestão da terra (LOPES et al., 2021; BERIHUN et al., 2022), na definição de projetos hidroagrícolas e florestais (ZOLIN et al., 2016), na regularização de vazões em reservatórios (ULIANA et al., 2016) e abastecimento de água para as diversas atividades antrópicas (STINGHEN: MANNICH, 2022).

No contexto regional da transição Cerrado-Amazônia têm-se a bacia hidrográfica do rio Teles Pires, que apesar de apresentar boa disponibilidade hídrica superficial, nota-se a existência de potenciais conflitos pelo uso da água, principalmente associados à geração de energia proveniente de hidrelétricas (ANA, 2019; LOPES et al., 2021), visto que já existem cinco empreendimentos (Usinas Hidrelétricas – UHEs) instalados no seu curso principal, demanda para irrigação por pivôs centrais (ANA, 2019), diluição de efluentes e outras demandas da urbanização.

A escassez de informações hidrológicas de afluentes da bacia hidrográfica do rio Teles Pires tem motivado a realização de estudos sobre a dinâmica hidrológica e monitoramento contínuo de canais perenes e de baixa rede de drenagem, visto que essas informações podem contribuir para o gerenciamento dos recursos hídricos dessa região de transição Cerrado-Amazônia. Nesse contexto, objetivou-se estimar e comparar a vazão líquida e profundidade de seções transversais, em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, por diferentes métodos (molinete fluviométrico e acústico) de medição *in loco*, e, avaliar as incertezas na obtenção da vazão líquida pelo método acústico.

Material e métodos

Área de estudo e instalações

A área de estudo corresponde às sub-bacias pertencentes à bacia hidrográfica do rio Teles Pires, localizada entre as latitudes 7° 16' 47" e 14° 55' 17" S e longitudes 53° 49' 46" e 58° 7' 58" W, abrangendo os territórios dos estados de Mato Grosso e Pará, Brasil. Essa bacia hidrográfica apresenta área de drenagem e extensão da hidrovia principal de cerca de 141.278 km² e 1.498 km, respectivamente. A cobertura vegetal predominante são os biomas Cerrado (Alto Teles Pires), uma faixa de transição Cerrado-Amazônia (Alto e Médio Teles Pires) e Amazônia (Médio e Baixo Teles Pires) (Figura 12). No contexto atual, essa bacia

está inserida na região polo do agronegócio matogrossense, com predomínio de atividades agropecuárias, seguido por empreendimentos hidrelétricos e industriais.

O clima da região de estudo (transição Cerrado-Amazônia) é o Aw (tropical quente e úmido), com sazonalidade climática definida por duas estações hídricas, a chuvosa (outubro a abril) e seca (maio a setembro). A precipitação média anual é de 1.970 mm, concentrando mais de 1.700 mm na estação chuvosa, a evapotranspiração de referência oscila de 84 a 131 mm mês⁻¹, entre os períodos chuvoso e seco da região, respectivamente, e a temperatura média anual varia de 24 a 27 °C (SOUZA et al., 2013).

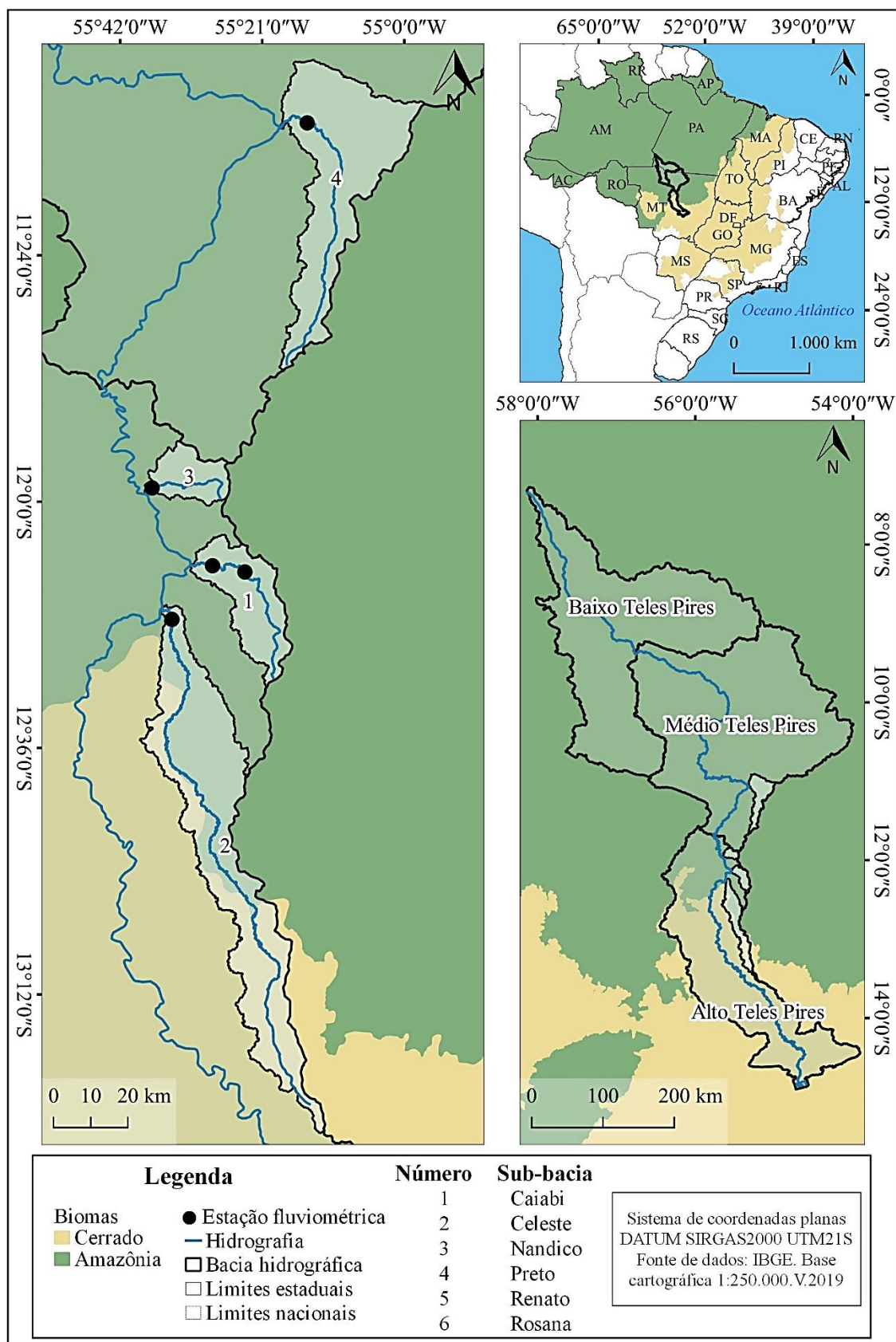


Figura 12. Mapa de localização das sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.

A definição das cinco seções transversais de monitoramento fluviométrico seguiu os seguintes critérios: facilidade de acesso e logística, local livre de ações antrópicas, trecho com velocidades bem distribuídas, leito e margem estáveis, bem definidos e livres de vegetação, rochas e outros obstáculos, trecho retilíneo com margens paralelas, perfil longitudinal regular e livres de remansos e local distante das confluências, local com condições adequadas para instalação, manutenção e operação dos equipamentos (SANTOS et al., 2001).

As informações gerais das estações fluviométricas, estão apresentadas na Tabela 5. As áreas das sub-bacias hidrográficas dos rios Caiabi, Celeste e ribeirão Preto apresentam predomínio de atividades agrícolas, com o cultivo da soja, milho, algodão e feijão e uma considerável ocupação urbana na área do ribeirão Preto, enquanto na área do rio Renato predomina vegetação nativa e pecuária, e uma ascensão expressiva da agricultura (Figura 13).

Tabela 5. Informações gerais de cinco estações fluviométricas de sub-bacias hidrográficas, afluentes do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Estação Fluviométrica	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Subárea (km ²)	Hidrografia (km)	Período de dados
Caiabi 1	12°10'32" S	55°23'05" W	372	340	40	12/2020 a 09/2021
Caiabi 2	12°09'27" S	55°28'30" W	345	454	53	03/2020 a 09/2021
Celeste	12°17'39" S	55°33'56" W	319	1.788	211	08/2020 a 10/2021
Preto	11°58'01" S	55°37'20" W	325	243	25	05/2020 a 09/2021
Renato	11°04'06" S	55°14'59" W	281	1.181	80	04/2020 a 06/2021

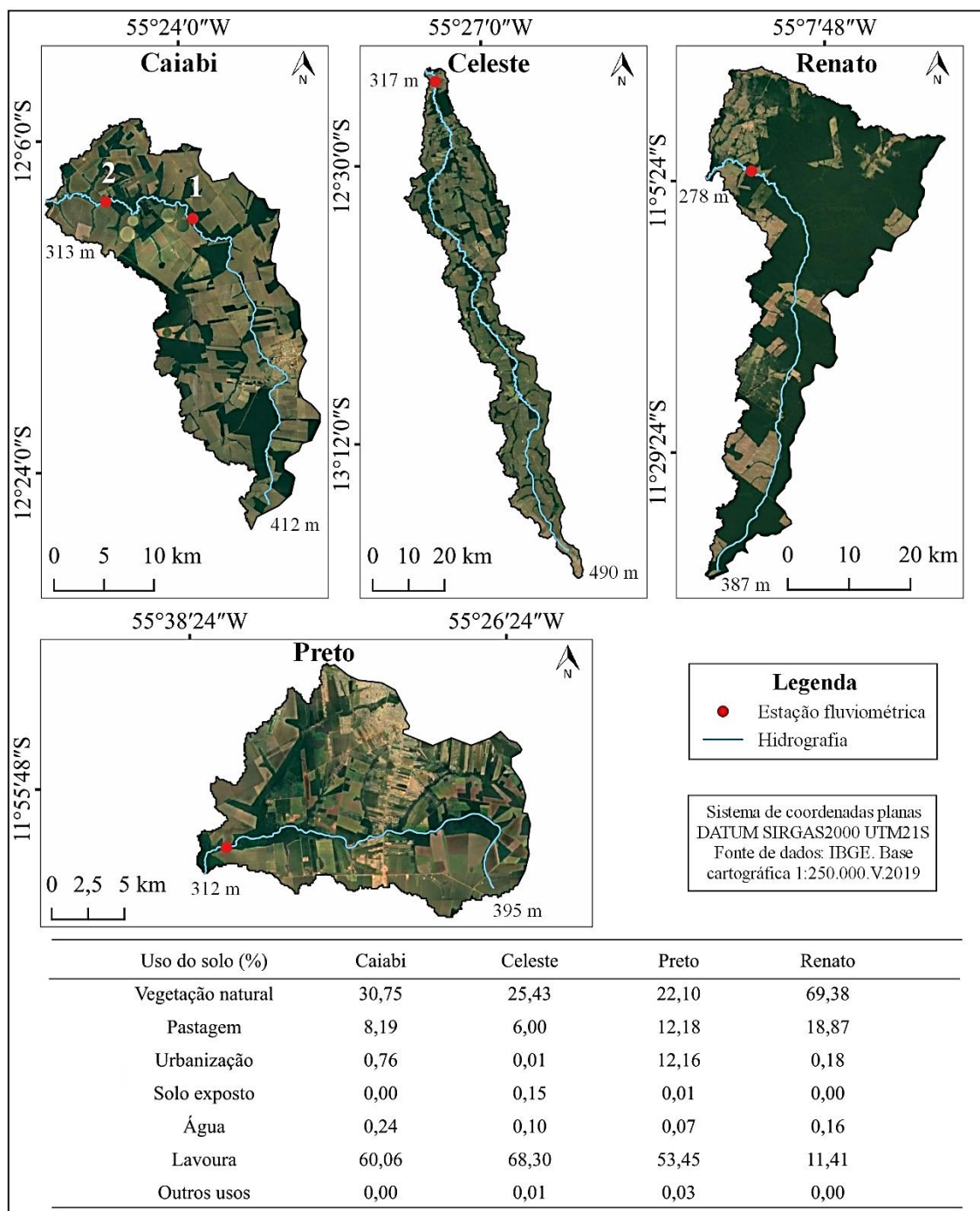


Figura 13. Mapa de localização das estações fluviométricas e principais usos do solo das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.

Fonte: Usos do solo (MAPBIOMAS, 2020).

Medidas de profundidade e vazão líquida pelo método de referência

Cada seção transversal de monitoramento foi demarcada com uma corda graduada fixada entre as margens do canal, e então dividida em subseções, representadas por verticais

fixas, posicionadas longitudinalmente ao longo da seção. A distância entre verticais e o número de verticais foram definidas conforme a largura de cada seção transversal (Tabela 2), enquanto que a posição e número de pontos de leitura, foram determinados a partir da medida de profundidade de cada vertical (Tabela 3), conforme os critérios estabelecidos por Santos et al. (2001). A posição e número de verticais e de pontos de medidas podem variar conforme a estação hídrica do ano, sendo necessário medir a largura e profundidade das seções transversais fluviométricas a cada campanha de campo (Figura 14).

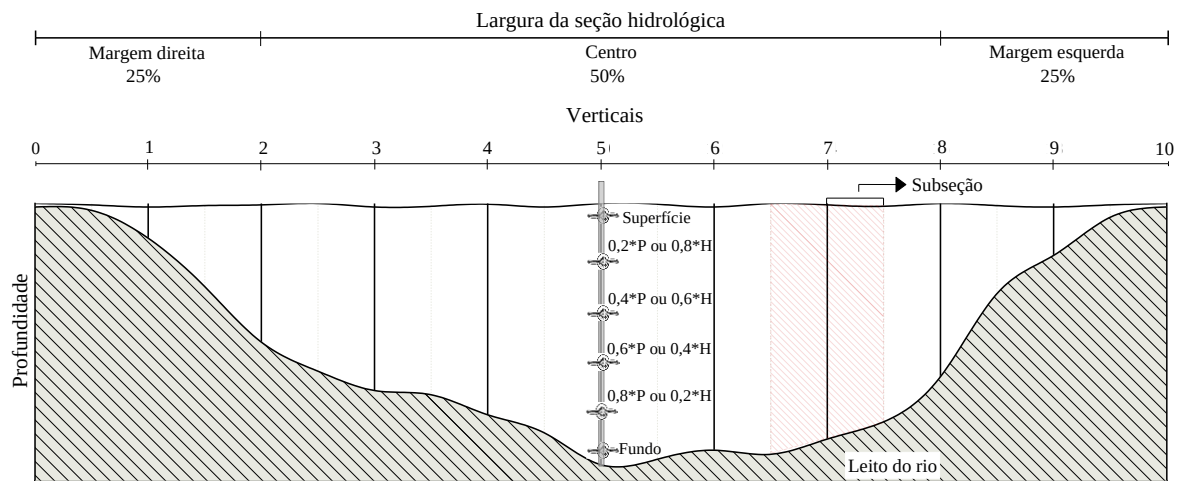


Figura 14. Representação de uma seção transversal hipotética demonstrando a distância entre verticais, o número de verticais, assim como, a posição e número de pontos para as leituras de batimetria e vazão líquida de cada vertical.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2001).

O levantamento batimétrico de referência de cada seção transversal foi realizado a partir da medida direta de profundidade em cada vertical. As seções com profundidade menores que 2,50 m foram medidas a vau, com auxílio de haste metálica graduada com escala numérica de 0,01 m, sendo a referência o leito do rio (obtendo-se H – altura da coluna de água sobre o ponto) (Figura 2). Para as seções com profundidade maiores que 2,50 m foi utilizado um guincho fluviométrico modelo *GFL-25* e um lastro fluviométrico fabricado pela *JCTM Ltda.* modelo *LAS-15* de 15 kg, instalados a uma embarcação. Nesse método, a referência é a superfície da água, e utiliza-se um odômetro analógico, que deve ser zerado com o eixo central do molinete hidrométrico nivelado com a superfície da água, e, na sequência, submerso até o leito do rio para obtenção de P (profundidade) da vertical (Figura 3).

As medidas de velocidade da água para obtenção da vazão líquida foram realizadas pela medição direta com molinete hidrométrico do fabricante *JCTM Ltda*, modelo *MLN-7*, associado a um contador de giros eletrônico, conectados entre si. Nesse caso, a hélice de metal gira no sentido contrário do fluxo sob ação do movimento da água do rio e envia sinais elétricos ao contador de giros, que relaciona o número de rotação por segundo com a velocidade do escoamento.

Durante as medidas, o equipamento foi posicionado com a hélice disposta contra a direção de fluxo da água e realizadas três leituras do número de rotações, pelo tempo de 40 s por leitura, considerando um desvio padrão $\leq 10\%$, em cada posição de cada vertical da seção transversal, da margem esquerda para a margem direita. Para obtenção da velocidade média em cada vertical, as rotações foram convertidas em velocidades por meio da equação linear estabelecida pelo fabricante (Tabela 4). O tempo de 40 s por leitura foi definido como suficiente para as condições médias de fluxo regular em todas as seções avaliadas conforme recomendado por Santos et al. (2001).

A área molhada de influência de cada seção transversal foi calculada por meio do método numérico da meia seção ou subseção (Figura 14), que consiste em calcular as vazões parciais de cada subseção fazendo a multiplicação da velocidade média da vertical pela área do segmento trapezoidal, definido pelo produto da profundidade média pela soma das semi-distâncias às verticais adjacentes (SANTOS et al., 2001). Nesse método as áreas junto às margens são desconsideradas (Equação 1).

$$A_i = \frac{\left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2}\right)}{2} \cdot \frac{(d_i - d_{i-1})}{2} + \frac{\left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2}\right)}{2} \cdot \frac{(d_{i+1} - d_i)}{2} \quad (1)$$

em que: P_{i-1} é a profundidade da vertical anterior a vertical cuja área de influência está sendo calculada (m); P_i é a profundidade da vertical cuja área de influência está sendo calculada (m); P_{i+1} é a profundidade da vertical posterior a vertical cuja área de influência está sendo calculada (m); $d_i - d_{i-1}$ é a distância entre a vertical cuja área de influência está sendo calculada e a vertical anterior (m); $d_{i+1} - d_i$ é a distância entre a vertical cuja área de influência está sendo calculada e a vertical posterior (m).

A vazão líquida total para cada seção transversal foi determinada pelo somatório do produto da velocidade e área molhada de cada subseção (Equação 2).

$$Q_L = \sum q_i = \sum (V_i * A_i) \quad (2)$$

em que: Q_L é a vazão líquida total ($m^3 s^{-1}$); q_i é a vazão de cada subseção ($m^3 s^{-1}$); V_i é a velocidade média da vertical ($m s^{-1}$) e A_i é a área molhada da subseção (m^2).

Medidas de profundidade e vazão líquida pelo método Acústico por Efeito Doppler

Adicionalmente às medidas com o molinete hidrométrico (método de referência), foi realizada por medição indireta, o levantamento batimétrico e as medidas de velocidade da água para obtenção da vazão líquida de cinco seções transversais de monitoramento com o Perfilador de Corrente Acústico Doppler (ADCP modelo *RiverRay* fabricado pela *Teledyne Marine RD Instruments*). Esse equipamento é formado por um transdutor com dois pares de feixes, sensores padrão de temperatura, pressão, inclinação, profundidade acústica e bússola interna, além de uma bateria 12 V e trimarã para seu funcionamento (o GPS não estava acoplado ao ADCP).

O ADCP *RiverRay* é um equipamento robusto que mede a velocidade de propagação de uma onda sonora emitida e refletida pelas partículas em suspensão na água, convertendo essas ondas sonoras em sinais elétricos que são interpretados pelo software de aquisição *WinRiver II*. O transdutor realiza as leituras na orientação vertical, o que o torna mais preciso para o levantamento batimétrico detalhado, emitindo e recebendo sinais sonoros com frequência de 600 kHz variando a uma faixa entre 300 e 3.000 kHz, e estimativa da velocidade da água com alcance de pulso de fundo entre 0,4 e 60 m (GAMARO, 2012; MUELLER et al., 2013).

As configurações básicas de preparação do arquivo, como também os testes do sistema, calibração da bússola, teste de leito móvel, e medidas de profundidade e de vazão líquida foram realizadas no software de aquisição de dados *WinRiver II* e as informações transmitidas via bluetooth do notebook entre o ADCP e o software.

Utilizando esse software, inicialmente, foram executados os protocolos testes de sistema PC20 e PC40. Na sequência foi realizada a calibração da bússola, que consiste em girar lentamente no sentido horário a 360° o ADCP com o transdutor em contato com lâmina d'água, somando um tempo mínimo de 3 min para a volta completa, sendo que nessa etapa deve-se realizar no mínimo 100 avaliações durante um giro completo, repetindo-se o

processo caso necessário. Em função da largura das seções transversais foi realizado o teste de leito móvel estacionário pelo método da subseção média no tempo mínimo de 600 s (~10 min), nesse caso, o equipamento foi posicionado no centro da seção transversal e fixado com duas cordas esticadas entre as margens da seção, buscando evitar o máximo possível a ocorrência de vibrações (MUELLER et al., 2013). O resultado desse teste é analisado na etapa de pós-processamento dos dados (Figura 15).



Figura 15. Calibração da bússola e teste de leito móvel estacionário com o ADCP RiverRay.

O levantamento batimétrico foi realizado concomitantemente com a medida da vazão líquida. O ADCP foi posicionado com a parte frontal do trimarã contra a direção de fluxo da água e na profundidade de perfilagem de 0,10 m. A travessia do ADCP foi guiada por dois operadores posicionados um em cada margem do rio, com auxílio de duas cordas fixadas uma em cada lado do trimarã, em velocidade constante e inferior a velocidade da água. A medição foi iniciada da margem esquerda para a margem direita, percorrendo um transecto contínuo, paralelo e a montante da seção em que se realizou a medição da vazão com o molinete hidrométrico (método de referência) com distância aproximada de 2,5 m entre as seções paralelas (Figura 16).

A primeira leitura inicia com a emissão dos pulsos sonoros “pings” registrando pelo menos 10 feixes com o ADCP parado na margem esquerda e termina com a contagem de mais 10 feixes com o equipamento parado na margem direita. Uma medida com o ADCP corresponde a um par de transecto, ou seja, uma ida e uma volta entre as margens da seção (Figura 17). Entretanto, faixas próximas de cada margem não podem ser medidas devido as restrições de presença de raízes e margens rasas (profundidade < 0,3 m), sendo que, o tamanho dessas faixas próximas às margens variam conforme a largura e profundidade de

cada seção transversal e estação hídrica do ano. Dessa forma, essas faixas são medidas no início da primeira leitura de cada seção e inseridas no *WinRiver II*, para que possam ser consideradas na extrapolação para obtenção da vazão líquida total.



Figura 16. Medida da vazão líquida com molinete hidrométrico e ADCP em seções transversais hidrológicas paralelas.

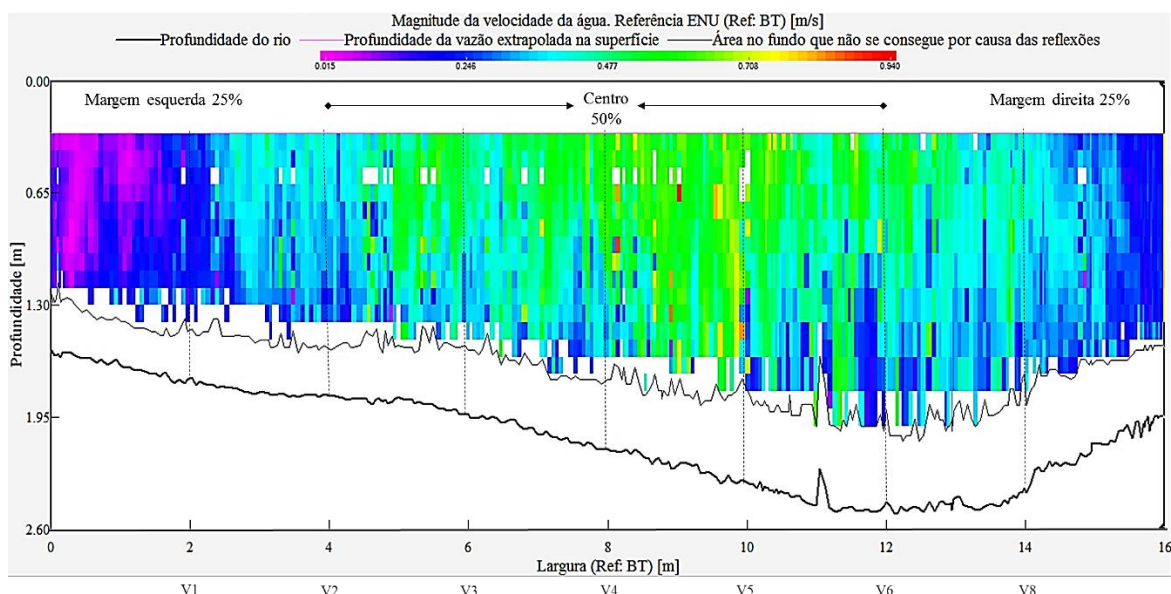


Figura 17. Perfil transversal da velocidade da água de um transecto medido pelo ADCP identificando as margens e o centro da seção transversal.

O controle de qualidade da medida em campo para cada transecto, obedeceu aos critérios pré-estabelecidos pelo *USGS* (Serviço Geológico dos Estados Unidos), que são

observados pelo software *WinRiver II* no momento das medidas em campo. Assim, para que a leitura seja válida deve-se: i) em cada transecto contabilizar 10 verticais a mais no início e final da medida de cada transecto, com o ADCP estático nos limites pré-definidos das margens; ii) a largura da faixa medida deve ser maior que 50% da largura total da seção transversal; iii) compor o tempo mínimo de 720 s somando todos os pares de transecto, ou seja, da medição total; iv) a vazão líquida medida (Q_L) deve ser $\geq 50\%$ que a vazão líquida total (Q_t); v) o percentual de verticais consideradas ruins deve ser $< 25\%$ do total observado; vi) as verticais consideradas de qualidade ruim + verticais com medição perdida devem ser inferiores a 10% do número total de verticais observadas; vii) o “pitch and roll” deve ser inferior a 5° de variação (inclinação do ADCP nos sentidos longitudinal e transversal da embarcação); viii) e, a velocidade da embarcação precisa ser inferior a velocidade da água (Figura 18) (MUELLER et al., 2013). Para as sub-bacias hidrográficas estudadas foram estabelecidos 10 pares de leitura (20 transectos) por seção transversal em cada data de medição.

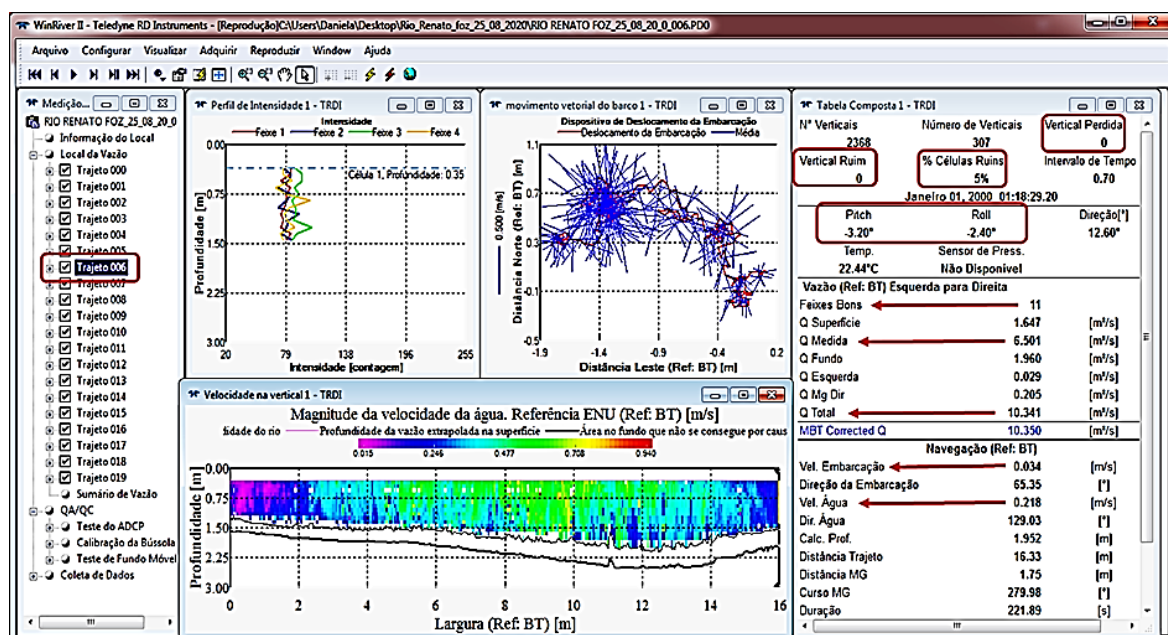


Figura 18. Interface do software *WinRiver II* indicando os critérios pré-estabelecidos pela USGS, que são observados durante as medidas em campo.

Processamento de dados mensurados

O levantamento batimétrico e as medidas de vazão líquida das cinco seções transversais de monitoramento foram analisadas quanto a consistência e integridade das

medidas por ambos os equipamentos. Os dados obtidos em campo pelo molinete hidrométrico foram processados em planilha eletrônica, e, os dados obtidos pelo ADCP foram analisados empregando o software de pós-processamento *QRev 3.43*.

O software *QRev 3.43* revisa e processa os dados gerados pelo *Winriver II* usando algoritmos consistentes, aplicando a denominada avaliação automatizada da qualidade dos dados (ADQA) de parâmetros da vazão líquida medida em campo. Esse software permite automatizar a filtragem e verificação da qualidade dos dados por meio de gráficos e tabelas contendo indicadores de qualidade gerados em sua interface. Dessa forma, no presente estudo optou-se por trabalhar com as configurações padrões de algoritmos de extrapolação no modo automático.

Na ADQA leva-se em consideração vários parâmetros/atributos da vazão líquida medida, como: paridade de transectos, tempo mínimo da medição total (720 s), testes do sistema (PC20 e PC40), calibração da bússola, temperatura e salinidade, teste de leito móvel estacionário, validade dos conjuntos de verticais e de células por transecto, profundidade do transdutor, extrapolação e efeitos das margens sobre a vazão (Figura 19). Os parâmetros de uma medição considerada como “boa”, que passa na ADQA são identificados pela cor verde; em uma medição regular com problema de leitura, mas não crítica pela ADQA são representados pela cor amarela; e em uma medição ruim que não passa pela ADQA, ou seja, que há problemas críticos de leitura que viola as políticas e procedimentos de medição do *USGS*, são indicados pela cor vermelha (Figura 19 e Figura 20).

O software *QRev 3.43* também fornece categorias de classificação dos dados com base nos parâmetros de incertezas aleatórias, de dados inválidos, de vazão de borda, de extrapolação, de teste de leito móvel estacionário, erros sistemáticos, e, sobretudo, com base nas estimativas, todos com incerteza de 95% de nível de confiança. Além disso, permite ao usuário interpretar e classificar manualmente, a categoria de cada medição: excelente (< 2%); bom entre (2 e 5%); regular (entre 5 e 8%); ruim (> 8%) (Figura 19).

No presente estudo, um total de 56 medições (560 pares de transectos) foram analisadas na ADQA e 10 (100 pares de transectos) foram excluídas devido a problemas significativos quanto a insegurança estatística que violavam as políticas do *USGS* (parâmetros em vermelho). Das 10 medições excluídas, 7 foram obtidas na estação seca e 3 na estação chuvosa, sendo que os principais problemas identificados foram: i) erros operacionais como teste do sistema não realizado; ii) ausência da informação da

profundidade do transdutor e consequente erros na extrapolação da vazão líquida; iii) erros de leitura da velocidade da embarcação (*BT Filters*) e da velocidade da água (*WT Filters*); iv) leitura de células ruins e perda de conjunto de verticais (Figura 20).

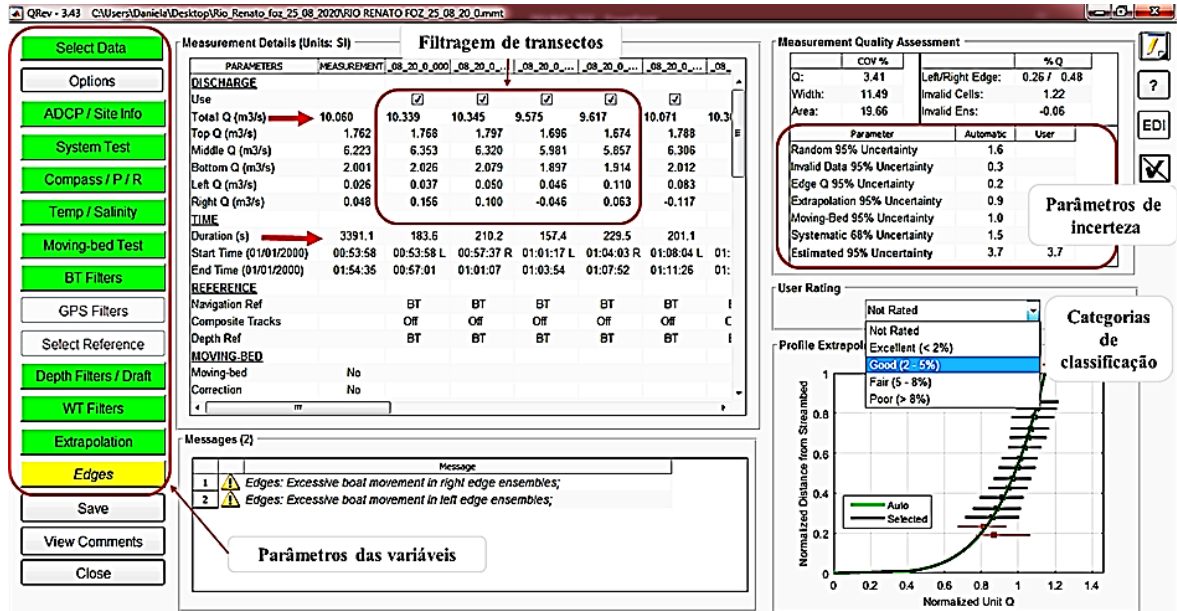


Figura 19. Interface do software QRev 3.43 demonstrando uma medição de qualidade boa, que passou pela ADQA conforme as políticas da USGS.

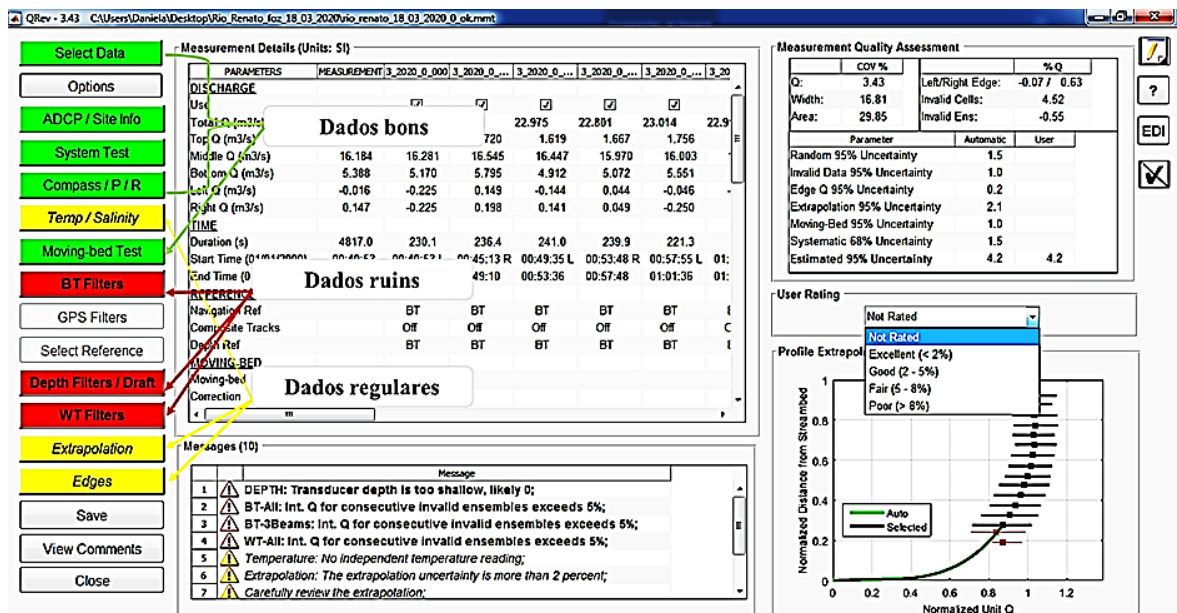


Figura 20. Interface do software QRev 3.43 demonstrando uma medição de qualidade ruim, que não passou pela ADQA conforme as políticas da USGS.

Na avaliação do usuário, foi definida a taxa entre 2 a 5% considerada como de qualidade “boa” para a incerteza dos dados estimada. Por fim, após a avaliação conjunta obtida pela ADQA e a classificação da incerteza estimada, foram estabelecidas 46 medições (460 pares de transectos) para análise e estimativa da vazão líquida e 46 transectos para a profundidade, obtidos tanto com haste metálica/molinete e ADCP. A obtenção das vazões líquidas com o ADCP ocorreu sem o sistema de posicionamento global e sensor de salinidade, contudo, a ausência desses sensores não comprometeu a qualidade e segurança estatística das medidas.

Análise e estimativas para profundidade e vazão líquida

As medidas de profundidade e vazão líquida pelo método de referência e com o ADCP foram realizadas simultaneamente, em intervalos mensais (entre 03/2020 e 10/2021), para as cinco seções transversais de monitoramento. A partir das 46 medições estabelecidas na ADQA para as medições com o ADCP, foram definidas as mesmas datas de medições para a haste metálica/molinete. A análise das vazões obtidas pelo ADCP ocorreu da seguinte forma:

- I. Primeiro foi filtrado no *QRev 3.43* o número mínimo de pares de transectos com duração mínima de 720 s da medição total (tempo mínimo de medição da vazão pelo ADCP *RiverRay* estabelecido pelo *USGS*), em cada data de medição, de cada seção transversal. Na sequência, foi sendo incrementados outros pares de transecto (um por vez) até completar os 10 pares de medição definidos no estudo. A cada par de transecto incrementado, determinava-se os valores médios (anual) e as amplitudes (estação seca e chuvosa) da vazão, coeficiente de variação, incerteza estimada, número de pares e tempo de medida total;
- II. A segunda parte da análise consistiu em estabelecer o número mínimos de pares de transectos de cada seção transversal, a partir da segurança estatística dada pela estimativa de incerteza a 95% de nível de confiança, definida nesse estudo a categoria entre 2 a 5% (classificada como boa). O número mínimo de pares de transectos foi definido pelas medições da estação seca, visto que nesse período de estiagem, há mais limitações das medições, como menores profundidades e larguras das seções transversais, fatores que influenciam na qualidade de medição do ADCP; e,

III. A última etapa resumiu-se em relacionar os valores médios das vazões líquidas obtidos por cada conjunto de pares de transecto de cada seção transversal medidos pelo ADCP com os valores médios medidos pelo molinete hidrométrico, buscando verificar a concordância entre os métodos de medição da vazão líquida para rios com baixa profundidade.

A análise do levantamento batimétrico obtido pelo ADCP ocorreu da seguinte forma:

- I. No *WinRiver II* foi definido um transecto representativo de cada seção transversal com base nas seguintes observações: transecto cujo o valor da vazão fosse próximo ao valor da vazão líquida média da seção; transecto que tivesse o mínimo de células e verticais perdidas; e, transecto ausente de falhas ou ruídos interferindo na medição da profundidade das verticais;
- II. Na sequência foram obtidos os valores de profundidade em verticais pontuais e representativas da batimetria selecionada, sendo a extração dos valores realizada de forma manual com auxílio do cursor (mouse) ao longo do perfil transversal mapeado pelo ADCP. Nessa etapa, o objetivo foi relacionar os valores de profundidades de ambos os métodos nas mesmas verticais (subseções); e,
- III. Adicionalmente, foi levantado o número de verticais por transecto, tempo por transecto, tempo por vertical e o tempo do levantamento batimétrico contínuo do transecto nos picos de máxima e mínima da vazão.

Para a vazão líquida, os dados foram avaliados no agrupamento total, medidas mensais entre 03/2020 e 10/2021 por regressão linear simples ($y = a + bx$), entre molinete hidrométrico e ADCP. Para a comparação da batimetria (haste ou guincho fluviométrico e ADCP) foram considerados agrupamentos de dados como: seção total, margens e centro. As bases de dados das variáveis de profundidade e vazão, em todos os agrupamentos de dados supracitados, foram separadas em 70 e 30%, respectivamente, para calibração dos coeficientes e avaliação do desempenho estatístico dos modelos de estimativas gerados. A separação dos dados ocorreu de forma que todas as sub-bacias hidrográficas e estações hídricas do ano (época chuvosa e seca) estivessem representadas em ambos os agrupamentos de dados (calibração e validação).

Na avaliação do desempenho dos modelos ajustados foram empregados os indicadores estatísticos MBE - erro relativo médio (Equação 3); o RMSE - raiz quadrática

do erro relativo médio (Equação 4); e o dw - índice de concordância de Willmott (Equação 5) conforme Souza et al. (2017). O MBE calcula a média dos desvios médios entre os valores observados e estimados (predição do modelo), o RMSE fornece a diferença quadrática entre os valores observados e estimados e o dw é um coeficiente que indica quanto os valores estimados pelo modelo se afastam da média observada. Ele tem intervalo variando entre 0,0 e 1,0, sendo que dw = 1,0 representa o completo ajustamento entre estimativa e observação, e 0,0 indica o oposto.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (4)$$

$$dw = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

em que: P_i - valores estimados; O_i - valores observados; n - número de observações; $|P_i - \bar{O}|$ - valor absoluto da diferença entre valor estimado e média dos valores observados; $|O_i - \bar{O}|$ - valor absoluto da diferença entre valor observado e média dos valores observados.

Resultados

Os rios estudados são canais naturais e perenes e apresentam variações sazonais no volume e velocidade do fluxo de escoamento superficial. As cinco seções transversais hidrológicas apresentaram dinâmica hidráulica semelhantes entre as estações hídricas da região, com picos de máxima entre março e maio (transição chuva-seca) e ponto de mínima entre agosto e outubro (transição seca-chuva) tanto para a vazão líquida quanto para as demais variáveis hidráulicas (Tabela 6 e Tabela 7 e Figura 22).

No geral, entre o método de referência (molinete) e ADCP, os menores valores de vazão líquida foram obtidos com o uso do ADCP, porém com baixa diferença dessa variável entre os métodos utilizados oscilando entre 0,02 e 6,48 m³ s⁻¹ entre as seções transversais. As maiores e menores amplitudes da vazão líquida obtidas entre os métodos foram registradas

nas seções transversais do rio Celeste e ribeirão Preto (Tabela 6 e Tabela 7). Enquanto as profundidades obtidas pelo método de referência (haste metálica ou guincho fluviométrico) foram de 0,17 a 6,34 m entre as seções transversais do ribeirão Preto e rio Celeste, respectivamente, e as obtidas com o ADCP foram 0,65 e 6,20 m entre os rios Caiabi (estação fluviométrica 2) e Celeste (Tabela 6 e Figura 22).

Tabela 6. Características hidráulicas obtidas pelos métodos de referência em seções transversais de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Variáveis		Caiabi 1	Caiabi 2	Preto	Renato	Celeste
Vazão líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	$Q_{L\text{máx}}$	8,91	14,58	6,03	24,11	60,78
	$Q_{L\text{méd}}$	5,43	7,29	4,69	16,46	30,47
	$Q_{L\text{mín}}$	3,63	3,81	3,48	9,18	22,07
Velocidade da água (m s^{-1})	$V_{\text{máx}}$	0,43	0,61	0,23	0,42	0,63
	$V_{\text{méd}}$	0,35	0,41	0,22	0,37	0,47
	$V_{\text{mín}}$	0,33	0,32	0,27	0,29	0,38
Área molhada (m^2)	$A_{\text{máx}}$	20,15	24,47	23,37	54,55	118,61
	$A_{\text{méd}}$	14,41	16,12	19,39	40,33	62,42
	$A_{\text{mín}}$	10,24	11,10	12,25	29,65	53,18
Largura (m)	$L_{\text{máx}}$	9,00	12,50	12,00	19,20	31,30
	$L_{\text{méd}}$	8,41	11,70	11,22	18,63	25,98
	$L_{\text{mín}}$	7,80	10,25	9,50	18,00	24,60
Profundidade (m)	$P_{\text{máx}}$	3,24	3,04	2,41	3,77	6,34
	$P_{\text{méd}}$	1,87	1,35	1,69	2,29	2,25
	$P_{\text{mín}}$	1,02	0,20	0,17	1,18	1,09

em que: máx – valor máximo de uma única medição obtido na estação chuvosa; mín – valor mínimo de uma única medição obtido na estação seca; méd – valor médio de todas as medições ao longo do período. * Período de avaliação entre 03/2020 e 10/2021.

O número mínimo de pares de transectos necessários para obter medições de vazão líquida com tempo superior a 720 s e estimativa de incerteza entre 2 e 5% (medição de boa qualidade) no período (seco) de condições mais limitantes foi de 7 pares (1507 s) para o Caiabi (estação fluviométrica 1), 5 pares (1087, 1563 e 1517 s) para o Caiabi (estação fluviométrica 2), Celeste e Renato, e 9 pares (1581 s) para o Preto, nessas condições o coeficiente de variação médio ficou de 3,50 a 6,18 % entre as seções transversais (Tabela 7). O tempo de medição total para estimativa de incerteza menor que 5% variou em cada seção

transversal, além disso, observou-se uma redução na estimativa de incerteza com o aumento no tempo de medição total (Figura 21).

No perfil batimétrico pelo método de referência foi obtido a profundidade pontual de 8 a 13 verticais conforme a largura da seção transversal (Figura 22), enquanto que pelo ADCP foi obtida a profundidade contínua ao longo de cada seção com média de 180 a 263 verticais por transecto entre as seções transversais (Tabela 7). Durante o período chuvoso, com o aumento no nível d'água e profundidade das seções transversais pode-se obter medições “mais completas” com o ADCP *RiverRay*, resultando em menos extrapolações das margens, leito e superfície.

Tabela 7. Características gerais obtidas pelo método acústico por Efeito Doppler - ADCP *RiverRay* em seções transversais de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Variáveis	Caiabi 1	Caiabi 2	Preto	Renato	Celeste
Vazão líquida máxima ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	8,16	14,74	6,22	23,03	54,30
Coeficiente de variação (%)	5,29	2,44	4,10	2,57	7,68
Estimativa de Incerteza a 95% (%)	4,70	4,30	4,10	4,10	6,60
Número de pares de transecto	6	4	8	4	5
Tempo de medição total (s)	1640	1353	1668	1946	1326
Número de verticais por transecto	188	230	139	392	211
Tempo por transecto (s)	135	165	100	285	127
Tempo por vertical (s)	1,40	1,40	1,40	1,37	1,67
Vazão líquida média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	5,17	7,16	4,63	16,04	27,56
Coeficiente de variação (%)	5,11	3,50	6,18	3,42	4,86
Estimativa de Incerteza a 95% (%)	4,80	4,50	4,80	4,90	5,20
Número de pares de transecto	7	5	9	5	5
Tempo de medição total (s)	1541	1120	1910	1627	1565
Número de verticais por transecto	180	176	152	263	204
Tempo por transecto (s)	127	119	108	190	144
Tempo por vertical (s)	1,42	1,49	1,40	1,39	1,42
Vazão líquida mínima ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	3,44	4,30	2,66	10,00	20,95
Coeficiente de variação (%)	6,78	3,88	6,72	3,55	3,45
Estimativa de Incerteza a 95% (%)	5,10	4,50	4,90	4,40	4,20
Número de pares de transecto	7	5	9	5	5
Tempo de medição total (s)	1507	1087	1581	1563	1517
Número de verticais por transecto	171	178	124	307	218
Tempo por transecto (s)	117	110	90	222	156
Tempo por vertical (s)	1,46	1,61	1,38	1,38	1,40

em que: Os valores de mínima e de máxima representam uma única medição obtida na estação seca e na estação chuvosa, respectivamente, e, os valores médios representam as medições de todo o período avaliado. * Período de avaliação entre 03/2020 e 10/2021.

As seções transversais estudadas apresentaram leito e margens estáveis, de formato semelhante ao triângulo, com fluxo contínuo e unidirecional, porém com flutuações das variáveis hidráulicas ao longo do ano. O nível d'água oscilou em média 0,66, 0,87, 0,98, 1,20 e 1,60 m da profundidade média para as seções do ribeirão Preto e rios Caiabi (estações fluviométricas 2 e 1), Renato e Celeste, nessa ordem. A largura média variou de 8,40 a 26,00 m entre as seções transversais dos rios Caiabi (estação fluviométrica 1) e Celeste com amplitudes de 1,00 a 6,70 m observadas para as mesmas seções entre o período seco e chuvoso da região (Tabela 6 e Figura 22).

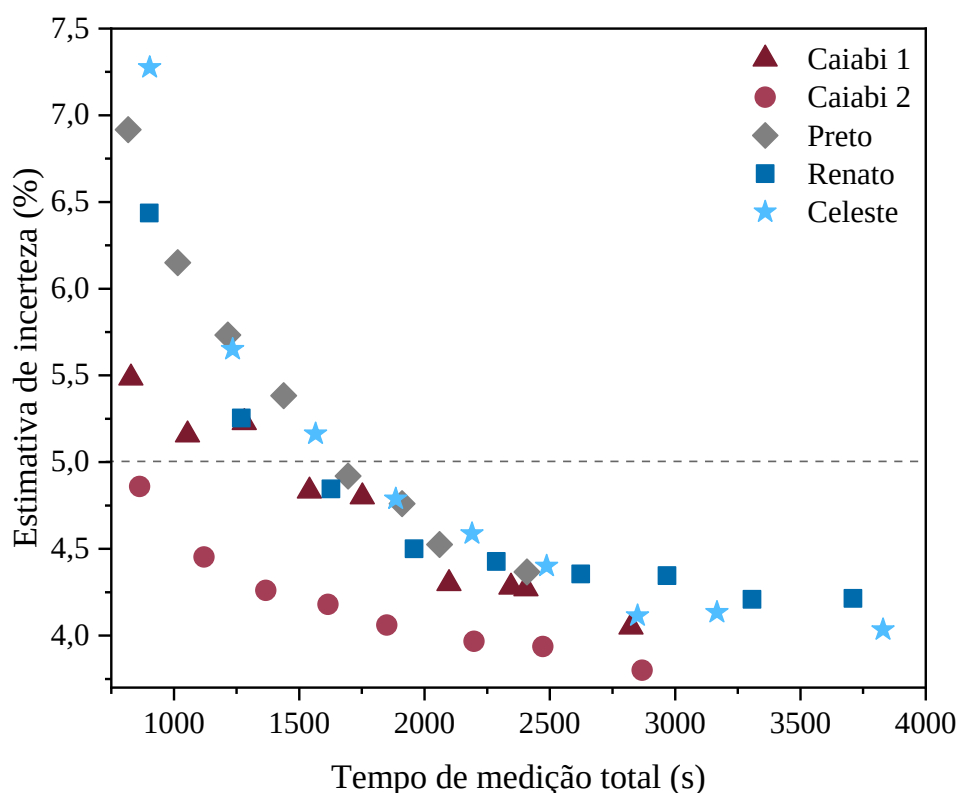


Figura 21. Tempo de medição total para estimativas de incertezas menor que 5% de cinco seções transversais em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

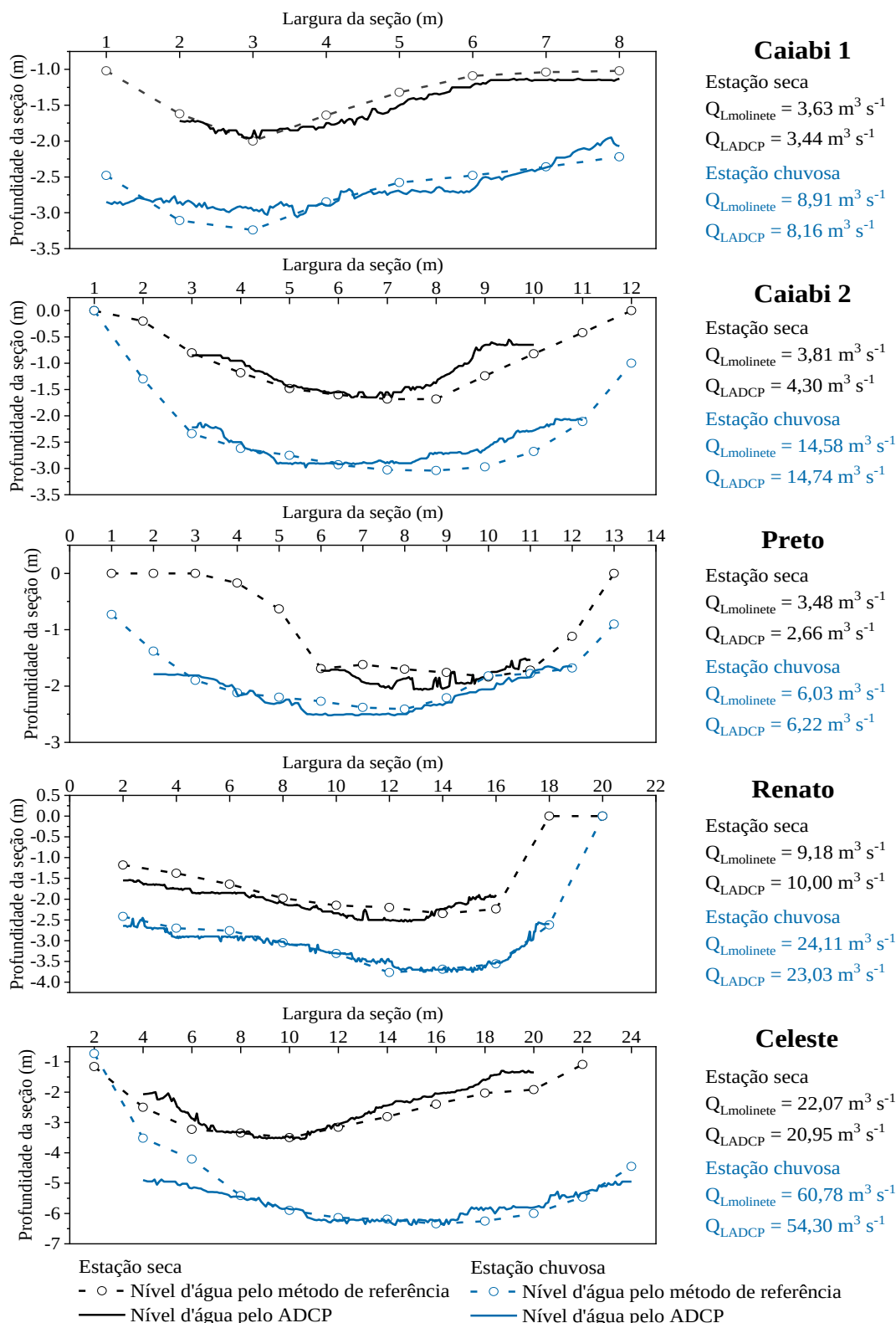


Figura 22. Perfis batimétricos pelo método de referência (linha pontilhada) e pelo ADCP (linha contínua) no período seco e chuvoso, de cinco seções transversais de monitoramento em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

* Os valores da estação seca e chuvosa são representados nessa Figura por uma única medição dos respectivos períodos.

Na relação entre os métodos, a maioria das vazões líquidas medidas pelo ADCP *RiverRay* subestimaram, sobretudo a partir de $15,0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figura 23). A equação de estimativa de vazão líquida entre molinete e ADCP apresentou desempenho estatístico satisfatório com ajuste $d = 0,9977$. O desvio médio foi de apenas $0,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, considerado pequeno para as vazões líquidas obtidas no presente estudo, enquanto o RMSE indicou uma forte aproximação das vazões líquidas medidas por ambos os métodos (Figura 23).

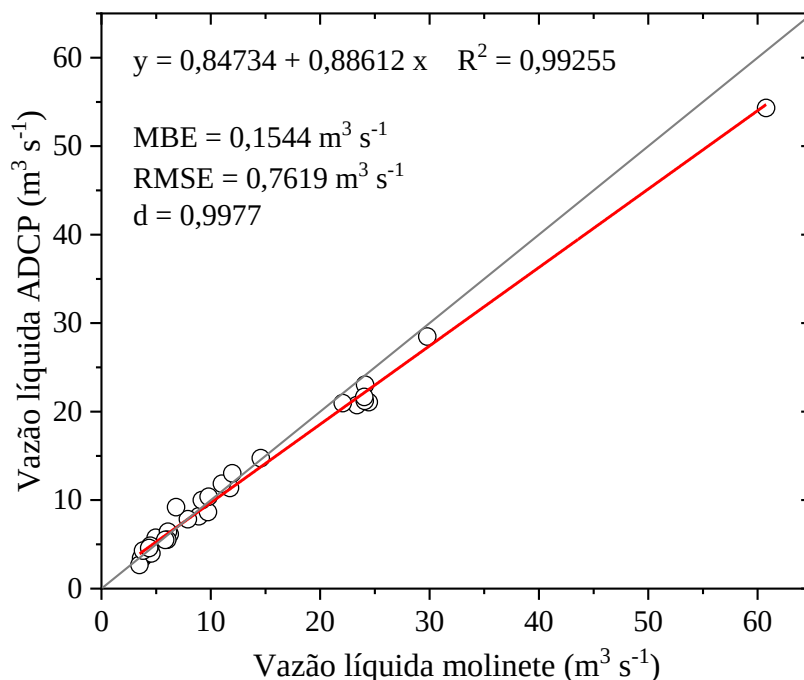


Figura 23. Equação linear de estimativa e seu desempenho estatístico da vazão líquida anual, obtida pelo método de referência em relação ao ADCP, das cinco seções transversais de monitoramento de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

As equações de estimativas das profundidades medidas pelo método de referência e com ADCP *RiverRay* agrupados em seção total, margens e centro das cinco seções transversais mostraram desempenho satisfatório dos indicadores estatísticos (Figura 24). A maioria dos valores de profundidades obtidas pelo ADCPs superestimaram próximo às margens com diferenças de 0,37 a 1,11 m, e subestimaram ao centro da seção com diferenças de 0,34 a 0,91 m, entre os métodos avaliados. Ocorreu maior desvio médio (4,0 cm) e espalhamento (25,0 cm) dos valores de profundidades no agrupamento das margens e menor no centro da seção (Figura 24).

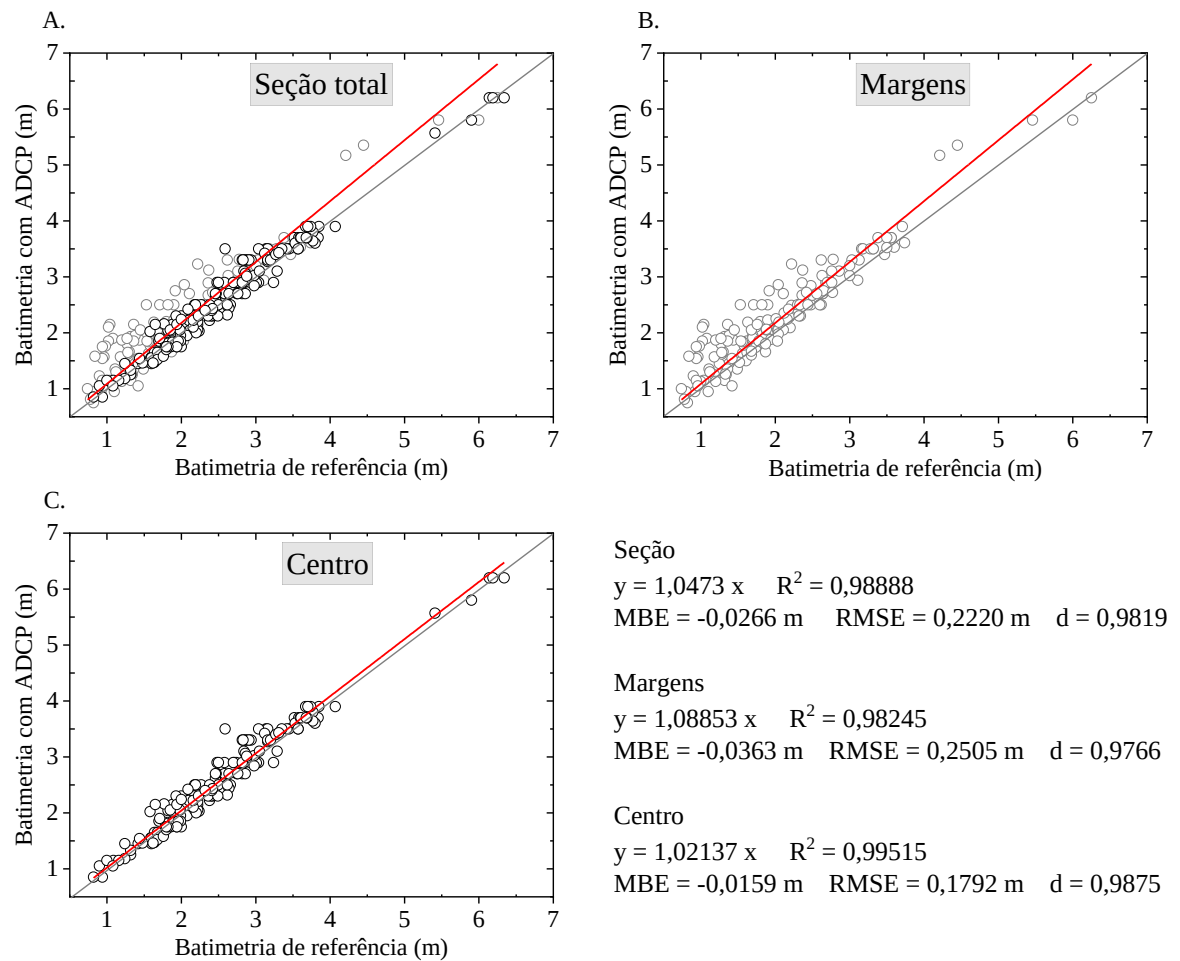


Figura 24. Equações lineares de estimativas e seus desempenhos estatísticos da profundidade medida pelo método de referência em relação a profundidade obtida pelo ADCP em diferentes posições de medidas nas cinco seções transversais das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Discussão

A hidrodinâmica de canais naturais e perenes dependem de vários fatores sejam eles naturais (tipo de solo) ou antrópicos (uso da terra), a sazonalidade hídrica da região em que a bacia hidrográfica está inserida (SOUZA et al., 2017; SOUSA et al, 2020), bem como, suas características fisiográficas, como a área e densidade da rede de drenagem, o formato, a declividade e a sinuosidade do canal que influenciam na geração, volume, velocidade e direção do fluxo de escoamento superficial (SANTOS et al., 2019; CARVALHO et al., 2022) e na produção e transporte de sedimentos (PEIXOTO et al., 2020).

Em todas as seções transversais avaliadas, a cobertura vegetal predominante às margens é vegetação nativa (Figura 13). A densidade da cobertura vegetal (MENDES et al.,

2018) e o tipo e características físico-hídricas do solo controlam a dinâmica da água e dos sedimentos numa bacia hidrográfica (BERIHUN et al., 2022; CARVALHO et al., 2022) influenciados pelas componentes precipitação e evapotranspiração, impactando no armazenamento (infiltração e retenção) de água nos solos das bacias hidrográficas (ALMEIDA et al., 2018).

As sub-bacias hidrográficas estudadas são predominantemente rurais (Figura 13) e o levantamento de disponibilidade hídrica de seus cursos d'água ainda é incipiente, apesar de o rio Caiabi (estação fluviométrica 2) ter registros de vazão líquida pelo molinete hidrométrico entre 5,95 e 16,14 m³ s⁻¹ no período de dezembro/2018 a fevereiro/2020 (SIMIONI et al., 2021), esses valores estão próximos aos observados no presente estudo (Tabela 6).

A medição de vazão líquida em cursos d'água pode ser realizada por diversos métodos e técnicas, cuja a escolha depende das características hidrodinâmicas e morfológicas da seção transversal, da precisão e exatidão desejada, da disponibilidade de equipamento, do tipo e configuração do equipamento e da experiência do operador (GAMARO, 2012; VILANOVA et al., 2013; SIMIONI et al., 2021). O método acústico por Efeito Doppler (ADCP *RiverRay*) mostrou-se confiável para medição de vazão líquida nas diferentes condições hidráulicas das seções transversais avaliadas no presente estudo com relação ao método de referência (molinete).

Para o ADCP *RiverRay* o tempo de medida total, tempo por vertical, o número de pares de transecto e o número de verticais por transecto (Tabela 7) dependeram das características hidráulicas de cada seção hidrológica (Tabela 6), que por sua vez dependem dos períodos seco e chuvoso da região. O tempo mínimo de medição total para obter a vazão líquida em rios da bacia hidrográfica do rio Teles Pires dependeram, principalmente, da largura e velocidade do escoamento, pois ficou evidente no presente estudo que as seções transversais mais largas e com maior velocidade de fluxo do escoamento superficial necessitaram de um menor número de pares de transectos para completar o tempo mínimo de 720 s exigidos pela USGS (Tabela 7), mas com tempo de medição próximos entre as seções transversais dos rios Caiabi (estação fluviométrica 1), Celeste, Renato e ribeirão Preto.

A qualidade estatística das medições de vazão líquida também deve ser considerada para estabelecer o tempo de medição total e o número mínimo de pares de transectos, visto que, dependem da qualidade das variáveis obtidas durante a medição em campo. No presente

estudo foi estabelecido a partir da estimativa de incerteza a 95% de confiança uma faixa entre 2 e 5% de incerteza das medições, que é considerada medição de boa qualidade.

Com o aumento do número de pares de transectos e do tempo de medição total da vazão líquida a partir do tempo pré-estabelecido de 720 s a estimativa de incerteza diminuiu em até 0,5% (Figura 21). Klema et al. (2020) relatam que quanto mais tempo medir um transecto, mais precisa será a estimativa de vazão líquida, isso reforça a maior influência do tempo de medição total na redução da incerteza de medição do que do maior número de transectos medidos.

As maiores diferenças de vazão líquida medida pelos métodos avaliados ocorreram nas seções transversais de vazões mais altas, como Renato e Celeste (Tabela 6Tabela 7). Apesar dessas diferenças, o ADCP *RiverRay* apresentou desempenho estatístico satisfatório para medição de vazões líquidas em rios com distintas faixas de profundidades (0,43 a 6,34 m) e larguras (7,80 a 31,30 m) das seções transversais estudadas (Tabela 6), além de fazer um detalhamento contínuo do comportamento hidráulico dessas seções ao longo do ano.

Quanto ao levantamento batimétrico, o ADCP mediu o menor valor de profundidade (0,65 m) próximo à margem, uma diferença de 0,22 m com relação a profundidade medida pela haste metálica (0,43 m) na mesma vertical da seção transversal. Isso evidencia a limitação do ADCP quando aplicada em seções com profundidades abaixo de 0,40 m, e que nesse caso o equipamento realiza as extrapolações e interpolações das áreas próximas às margens não medidas para estimar profundidade e velocidades dos sólidos em suspensão, e, calcular a vazão líquida total.

No levantamento batimétrico, apesar de encontrar profundidades com maiores desvios médios e espalhamentos próximo às margens, quando analisado o agrupamento em seção total pelos métodos de referência e acústico por Efeito Doppler não afetou negativamente a qualidade da medição, resultando em bom ajuste da equação, e, portanto, o levantamento batimétrico realizado pelo ADCP *RiverRay* considerando toda a seção é viável para medir a vazão líquida (Figura 24).

As diferenças observadas entre os valores medidos de vazão líquida e profundidade da seção transversal pelos diferentes métodos de medição podem estar associadas ao nível de detalhamento da medição entre os equipamentos e ao deslocamento da seção transversal (~2,5 m) para medição com ADCP. Além disso, esse medidor acústico por Efeito Doppler, permite realizar a medição de fundo móvel e as extrapolações das variáveis hidráulicas de

áreas não medidas pelo equipamento que podem ter contribuído para tais diferenças, porém não significativas. Essas questões podem ser melhor exploradas em trabalhos futuros.

O fato de o ADCP ter superestimado as profundidades à medida que se aproximou das margens pode estar associado a frequência do transdutor. Sabe-se que para o método acústico por Efeito Doppler, a precisão de uma medição da vazão líquida depende da frequência do transdutor, do modo de operação e do tipo de processamento acústico (GAMARO, 2012; BOLDT: OBERG, 2016). O ADCP *RiverRay* apresenta uma configuração automática e métodos de medição adaptáveis para otimizar o desempenho ADCP para medir a velocidade da água, nível de turbulência e profundidade, um transdutor *phased-array* de superfície plana com ângulos de feixe maiores, o que o torna mais preciso para o levantamento batimétrico em rios rasos a profundos (0,4 a 60 m), e, software atualizado (MUELLER et al., 2013; BOLDT: OBERG, 2016).

A aplicação do método acústico por Efeito Doppler com o ADCP *RiverRay* é uma alternativa viável para medir vazão líquida de rios naturais com profundidade entre 0,4 e 6,5 m e largura entre 7,80 e 31,50 m, contudo é preciso ter cuidado na aplicação desse equipamento quando não se conhece as características hidrodinâmicas e morfológicas da seção transversal, é aconselhável primeiro buscar conhecer as condições hidráulicas do curso d'água para escolher a configuração de ADCP mais adequada para tais condições. Além disso, o tempo de medição total da vazão líquida também deve ser considerado para obtenção medidas com boa exatidão e precisão.

Trabalhos futuros permitirão comparar métodos e técnicas de medição da vazão líquida em rios naturais com baixa profundidade (até 6,5 m) na região de transição Cerrado-Amazônia, levando em consideração outras características geomorfológicas e fisiográficas da bacia hidrográfica, além de analisar a sazonalidade das vazões durante regime hídrico da região. Avaliar métodos e técnicas de medição que permitem a otimização de recursos humanos e financeiros, além do tempo de trabalho de campo reduzido quando se tem um método alternativo (não substitutivo) e seguro para o levantamento e monitoramento hídrico e sedimentar de corpos hídricos naturais.

O aumento da demanda hídrica para irrigação e dessedentação de animais nessa região de fronteira agrícola brasileira requer o conhecimento sobre a disponibilidade de água para abastecer o setor do agronegócio com a manutenção da segurança ambiental, e por isso não só a necessidade das medidas da vazão líquida *in loco*, mas também a necessidade de

buscar otimizar esse levantamento baseada nas comparações dos métodos de medição, conforme realizado no presente estudo.

Outros estudos relatam a importância de avaliar métodos e técnicas de medição e da vazão líquida e batimetria (GAMARO et al., 2013; FARINA et al., 2015; BOLDT: OBERG, 2016; VÝLETA: VALENT, 2019; BJERKLIE et al., 2020; HUANG, 2020; KLEMA et al., 2020; GENTIL et al., 2021; LAGOIANNIS: DIMITRIOU, 2021;) com o propósito de definir o método mais adequado para medição e/ou estimativa do escoamento superficial, bem como, conhecer a dinâmica e disponibilidade dos recursos hídricos, com objetivo de fornecer ferramentas que subsidiem o manejo de uso terra e conservação dos recursos naturais disponíveis.

Conclusões

Medição com ADCP *RiverRay* apresenta acurácia para obtenção da vazão líquida e profundidade em seções transversais rasas (até 6,5 m) de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires. As comparações com o método de referência (molinete fluviométrico) ainda devem ser avaliadas em outros rios rasos com diferentes características hidráulicas e geomorfológicas, visando otimizar e aumentar a segurança estatística das medidas em campo.

O aumento no tempo de medição total superior a 720 s com o uso do ADCP *RiverRay* influencia na redução da incerteza de estimativa da vazão líquida em seções transversais rasas (até 6,5 m) de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires. A determinação do tempo de medição total e pares de transectos para obter medidas de vazão líquida depende características hidráulicas do curso d'água.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Código de Financiamento – 001 e Processo 88887.144957/2017-00. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio com as bolsas de iniciação científica e bolsa produtividade (Processo 308784/2019-7). À 3ª Comarca de Justiça Cível

de Sinop pelo apoio financeiro ao Projeto CBH Monitora e ao Comitê dos Afluentes da Margem Direita do Alto Teles Pires.

Referências

ALMEIDA, W. S. de; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S. de; MENEZES, R. da S.; SOBRINHO, T. A.; CARVALHO, D. F. de. Efeito do preparo do solo e da cobertura vegetal na infiltração de água no solo. **Soil & Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>

ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PEREIRA, F. A. C.; ROUWS, J. R. C. Produção de sedimentos e infiltração de água no solo sob diferentes características de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 8, p. 572-578, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. Agência Nacional de Águas, Embrapa Milho e Sorgo 2ª ed. Brasília: ANA, 2019. 47p. Disponível em: <file:///C:/Users/Daniela/Downloads/Levantamento-agricultura-irrigada.pdf>.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Serviço Geológico do Brasil. Brasília: ANA, 2021. 118p. Disponível em:< <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/22628>>.

BERIHUN; M. L.; TSUNEKAWA; A.; HAREGEWEYN; N.; TSUBO; M.; FENTA; A. A.; EBABU; K.; SULTAN; D.; YIHUN TADDELE DILE; Y. T. Redução do escoamento e perda de sedimentos sob opções alternativas de uso e gestão da terra baseadas na capacidade da terra em uma bacia sub-úmida da Etiópia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 40, 100998, p.1-16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100998>

BJERKLIE, D. M.; FULTON, J. W.; DINGMAN, S. L.; CANOVA, M. G.; MINEAR, J. T.; MORAMARCO, T. Hidráulica fundamental de seções transversais em rios naturais: análise preliminar de um grande conjunto de dados de medições de fluxo acústico Doppler. **Water Resources Research**, v. 56, e2019WR025986, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR025986>

BOLDT, J. A.; OBERG, K. A. Validação de Medições de Caudal Feita com M9 e Perfis de Corrente Doppler Acústico RiverRay. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, n. 2, 04015054, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001087

CARVALHO, A. C. P.; LORANDI, R.; DI LOLLO, J. A.; COLLARES, E. G.; MOSCHINI, L. E. Resposta hidrológica de sub-bacias hidrográficas da Bacia do Rio Piracicaba - Região Sudeste do Brasil. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 34, e63522, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63522>

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: 2ª Edição revisada – ABRH, 2015. 336p.

FARINA, G.; ALVISI, S.; FRANCHINI, M.; CORATO, G.; MORAMARCO, T. Estimativa de batimetria (e vazão) em seções transversais naturais de rios usando uma abordagem de entropia. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 20-29, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.037>

GAMARO, P. E. M. **Medidores acústicos Doppler de vazão**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2012. 164p.

GAMARO, P. E. M.; GOMES, B. M.; MALDONADO, L. H.; RODRIGUES, M. F. de C. Análise das Séries de Vazões Contínuas Obtidas em Tempo Real Através de Diferentes Técnicas com Aparelhos Acústicos Doppler Estáticos no Canal da Piracema da Itaipu Binacional: Canais quase Retangulares e Canais Trapezoidais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 33-42, 2013.

GENTIL, W. B.; RAMALHO, F. L.; BRAGA, C. C.; BARCELOS, A. A.; CABRAL, J. B. P. Diagnóstico Batimétrico do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Caçu-GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p: 1541-1558, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1541-1558>

GU, X.; LIN, C.; WANG, B.; WANG, J.; OUYANG, W. Uma avaliação abrangente dos impactos antropogênicos, contaminação e riscos ecológicos de elementos tóxicos em sedimentos de rios urbanos: um estudo de caso em Qingdao, leste da China. **Environmental Advances**, v. 7, 100143, p. 1-9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100143>

HUANG, H. Estimando o limite de polarização causado por erro de calibração das medições de fluxo de corrente ADCP de barco em movimento. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 146, n. 6, 06020006, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001736

KLEMA, M. R.; PIRZADO, A. G.; VENAYAGAMOORTHY; S. H.; GATES, T. K. Análise de medições de velocidade média do perfilador de corrente Doppler acústico em fluxos rasos. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 74, 101755, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101755>

KOOL, J.; LHERMITTE, S.; HRACHOWITZ, M.; BREGOLI, F.; MCCLAIN, M. E. Dinâmica de inundação sazonal e balanço hídrico do Pantanal de Mara, Tanzânia, com base na classificação de imagem multitemporal Sentinel-2. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 109, 102766, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102766>

LAGOGIANNIS, S.; DIMITRIOU, E. Estimativa de Vazões com o Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e Métodos Hidráulicos em Rios Rasos. **Water**, v. 13, 2808, p. 1-20, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13202808>

LAPOLA, D. M.; SILVA, J. M. C. da; DIEGO R. BRAGA, D. R.; LARISSA CARPIGIANI, L.; OGAWA, F.; TORRES, R. R.; BARBOSA, L. C. F.; OMETTO, J. P. H. B.; JOLY, C. A. Uma avaliação da vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas para as áreas

protegidas do Brasil. **Conservation Biology**, v. 34, n. 2, p. 427-437, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.13405>

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; MINGOTI, R.; VENDRUSCULO, L. G.; ALMEIDA, F. T de; SOUZA, A. P de; OLIVEIRA, R. F. de; PAULINO, J.; ULIANA, E. M. Regime hidrológico, disponibilidade de água e mudança de uso/cobertura da terra impacto no balanço hídrico em uma grande bacia agrícola no Sul Amazônia brasileira. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, 103224, p.1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>

MAPBIOMAS. “Projeto MapBiomias – Mapeamento da superfície de água no Brasil: A dinâmica da superfície de água do território brasileiro (Coleção 1), 2021. Disponível em <<https://mapbiomas.org/superficie-de-agua-no-brasil-reduz-15-desde-o-inicio-dos-anos-90>> (acesso em 2022).

MENDES, N. G. de S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Cobertura florestal e vazões de bacias hidrográficas da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 2, e420204, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000200004>

MUELLER, D. S. extrap: Software para auxiliar na seleção de métodos de extrapolação para medições de vazão ADCP em barcos em movimento. **Computers & Geosciences**, v. 54, p. 211-218, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.02.001>

MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R.; REHMEL, M. S.; OBERG, K. A.; RAINVILLE, F. **Medindo a vazão com perfiladores de corrente Doppler acústico de um barco em movimento** (ver. 2.0, December 2013): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3133/tm3A22>.

PAIVA, R. C. D. de; CHAFFE, P. L. B.; ANACHE, J. A. A.; FONTES, A. S.; ARAÚJO, L. M. N. de; ARAÚJO, A. N. de; BARTIKO, D.; BLENINGERS, T.; AMORIM, P. B. de; BUARQUE, D. C.; CARLOTTO, T.; COLLISCHONN, W.; DETZELS, D. H. M.; FAN, F. M.; FORMIGA-JOHNSON, R. M.; KOBIYAMA, M.; MANNICHS, M.; MARQUES, G.; MICHEL, G. P.; OLIVEIRA, D. Y. de; OLIVEIRA, P. T. S. de; PINHEIRO, A.; RUHOFF, A.; SIQUEIRA, V. A.; TASSI, R.; ZANANDREA, F. Avanços e desafios da ciência de recursos hídricos no Brasil: uma síntese comunitária do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e50, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200136>

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E., NISHIMURA, A. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921-931, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180137>

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LATERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba, Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.

SANTOS, L. L. dos; RIBEIRO, V. de O.; DIODATO, J. O. Morfometria das bacias hidrográficas inseridas na zona urbana de Dourados – MS. **Revista o Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 46, n. 3, p. 75-87, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v46i3.67039>

SEKHARAN, S.; SAMAL, D. R.; PHULERIA, H. C.; CHANDEL, M. K.; GEDAM, S.; KUMAR, R.; SETHI, V.; SUPATE, A. R.; KARMAKAR, S. Monitoramento da poluição do rio em uma bacia industrial em ecossistema urbano: Desafios e estrutura geoespacial proposta. **Environmental Challenges**, v. 7, 100496, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100496>.

SIMIONI, C. F.; ALMEIDA, F. T. de; ZOLIN, C. A.; ULIANA, E. M.; SOUZA, A. P. de; MARQUE, A. Vazão sólida em microbacia da região amazônica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e73, p. 1-26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X64223>

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a07>

SOUZA, A. P. de; SILVA, A. C.; TANAKA, A. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; KLAR, A. E.; GOMES, A. W. A. Radiação global por modelos simplificados para o estado de Mato Grosso, Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 52, n. 4, p. 215-227, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000400001>

SOUZA, N. S.; SOUZA, W. de J.; CARDOSO, J. M. S. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 453-462, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017155279>

SOUSA, M. M. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; RIBEIRO FILHO, J. C.; MOURA, M. M. S. Características pluviométricas determinantes no transporte de sedimentos em microbacia com vegetação raleada no semiárido tropical. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, p. 785-793, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n322rc>

STINGHEN, C. M.; MANNICH, M. Panorama da gestão de bacias críticas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, e13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v19e13>

ULIANA, E. M.; SOUZA, L. G. da S.; SILVA, D. D. da; SOUZA, A. P. de; ALMEIDA, F. T. de; ARAÚJO, H. B. Regionalização de vazões para o médio e alto Rio Teles Pires – MT. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 59, n. 4, p. 333-338, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2240>

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Qualidade de dados fluviométricos obtidos através de perfilamento acústico. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.531-538, 2013.

VÝLETA, R.; VALENT, P. Medições de descarga ADCP no rio Danúbio: pós-processamento e correção de dados. **Slovak Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 1, p. 7-13, 2019. DOI: 10.2478/sjce-2019-0002

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Avaliação da mudança da erosão do solo e suas relações com a mudança de uso/cobertura da terra na China do final da década de 1980 a 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

WENZEL, D. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P de; MENDES, M. A. dos S. A.; SOUZA, L. G. da S. Características fisiográficas de sub-bacias do Médio e Alto Rio Teles Pires, Mato Grosso. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.15, n. 2, p. 123-131, 2017.

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SILVA MATOS, E.; MAGALHÃES, C. A. S.; ALMEIDA, F. de T.; SOUZA, A. P. de; MINGOTI, R. Perdas de solo e água na integração lavoura-floresta e na sucessão soja-milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1223-1230, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900022>

4. CAPÍTULO 2 - DINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM AFLUENTES DO RIO TELES PIRES, NA TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA

Resumo

A ausência de estudos de produção e dinâmica de sedimentos na região de transição dos biomas Cerrado e Amazônia, aliada com a intensa atividade agropecuária e o aumento do interesse de geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas no Sul da Amazônia brasileira, impulsionam a necessidade de se conhecer a dinâmica do transporte de sedimentos em bacias hidrográficas com diferentes usos dos solos. O objetivo do presente estudo foi avaliar e estimar a produção de sedimentos em suspensão (Q_{ss}) e total (Q_{st}) de rios e córregos da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, por diferentes formas de amostragem da vazão sólida em suspensão, coletados pelo método do igual incremento de largura. As coletas de campo foram realizadas em intervalos mensais, compondo 110 coletas para cada amostragem de sedimentos em suspensão entre junho de 2018 e novembro de 2021 buscando representar a sazonalidade hídrica e caracterizar o comportamento hidrossedimentológico nas seções transversais dos rios Caiabi 1 e 2, Celeste, Nandico, Preto, Rosana e Renato 1 e 2. Os valores de Q_{ss} e Q_{st} variaram de 0,31 a 39,35 t d⁻¹ e de 0,32 a 43,70 t d⁻¹, respectivamente. As porcentagens médias da descarga sólida arrastada variaram de 3% a 5%, entre as estações seca e chuvosa, e em todas as seções hidrológicas. Os diferentes métodos de amostragem de Q_{ss} resultaram em Q_{st} semelhante em cada uma das seções de monitoramento, o desempenho estatístico do modelo de regressão linear simples foi satisfatório com índice de concordância de Willmott maior que 0,8234 e 0,9455 para estimativas de Q_{ss} e Q_{st} , respectivamente. A dinâmica de produção e transporte de sedimentos foi influenciada pelo uso e cobertura do solo, área de drenagem e sazonalidade hidrológica da região. Os diferentes métodos de amostragem de Q_{ss} são compatíveis com a obtenção de descargas sólidas suspensas e totais, porém a amostragem vertical padrão é a mais simplificada e pode ser aplicada em um trecho hidrológico com condições hidráulicas uniformes.

Palavras-chave: Hidrossedimentologia; Método por Igual Incremento de Largura; Fronteira agrícola brasileira; sólidos em suspensão; sul da Amazônia.

DYNAMICS OF SEDIMENT TRANSPORT IN TRIBUTORIES OF THE TELES PIRES RIVER, IN THE CERRADO-AMAZON TRANSITION ZONE OF BRAZIL

Abstract

The absence of studies on the production and dynamics of sediments in the transition region of the Cerrado and Amazon biomes, combined with the intense agricultural activity and the increased interest in generating electricity through hydroelectric plants in the south of the Brazilian Amazon, drive the need to to know the dynamics of sediment transport in watersheds with different land uses. The objective of the present study was to evaluate and estimate the production of suspended sediments (Q_{ss}) and

total (Q_{st}) of rivers and streams in the watershed of the Teles Pires river, by different forms of sampling of suspended solid flow, collected by the method of same width increment. Field collections were carried out at monthly intervals, composing 110 collections for each sample of suspended sediments between June 2018 and November 2021, seeking to represent the water seasonality and characterize the hydro-sedimentological behavior in the cross sections of the rivers Caiabi 1 and 2, Celeste, Nandico, Preto, Rosana and Renato 1 and 2. Q_{ss} and Q_{st} values ranged from 0.31 to 39.35 t d⁻¹ and from 0.32 to 43.70 t d⁻¹, respectively. The average percentages of entrained solid discharge ranged from 3% to 5%, between the dry and rainy seasons, and in all hydrological sections. The different Q_{ss} sampling methods resulted in similar Q_{st} in each of the monitoring sections, the statistical performance of the simple linear regression model was satisfactory with a Willmott concordance index greater than 0.8234 and 0.9455 for estimates of Q_{ss} and Q_{st} , respectively. The dynamics of sediment production and transport was influenced by land use and land cover, drainage area and hydrological seasonality in the region. The different Q_{ss} sampling methods are compatible with obtaining suspended and total solid discharges, but standard vertical sampling is the most simplified and can be applied in a hydrological section with uniform hydraulic conditions.

Keywords: Hydro-sedimentology; Equal-Width Increment Method; Brazilian agricultural frontier; suspended solids; south of the Amazon.

Introdução

A sedimentação é um processo natural que ocorre no tempo geológico, pela ação combinada ou isolada dos agentes físicos (água, vento, gelo, topografia, gravidade e cobertura vegetal), químicos e biológicos (microrganismos e ações humanas), fragmentando as rochas em partículas menores de diferentes tamanhos (BORRELLI et al., 2017). Na hidrossedimentologia, o processo inicial da sedimentação fluvial é a erosão do solo, ocasionada principalmente pela força cinética das gotas de água da chuva, que desagregam e transportam as partículas de solo para os cursos d'água (ZHANGA et al., 2019).

Em função do aumento populacional e das ocupações territoriais, as atividades agrícolas, civis, industriais e extrativistas têm se tornado indispensáveis na atualidade. Todavia, a conservação do solo deve ser entendida como fundamental para evitar e controlar a produção excessiva de sedimentos decorrentes da erosão, e, conseqüentemente, seus efeitos negativos sobre o meio ambiente. Vários são os impactos gerados pelos transportes de elevadas concentrações de sedimentos, visto que são indicadores do empobrecimento de solos agricultáveis com a perda de sua camada superficial (ZHANGA et al., 2019), poluição dos corpos hídricos, redução e extinção de espécies aquáticas (ANDRIETTI et al, 2016; WANG et al., 2016), assoreamentos e formação de enchentes, alterações do volume e fluxo d'água,

da morfologia do leito e da margem de bacias hidrográficas (ZHANGA et al., 2019), diminuição da vida útil de obras, de reservatórios, abrasão de turbinas e outros equipamentos (ZIEMBOWICZ et al., 2018).

O processo erosivo pode ser acelerado pelas atividades antrópicas devido a retirada da cobertura vegetal, uso mecanizado intensivo do solo e ausência de práticas conservacionistas, que alteram as características físico-hídricas do solo, tornando-o mais susceptível às perdas por erosão (BERIHUM et al., 2022; HIMANSHU et al., 2019). Nessa abordagem, os efeitos combinados das ações antrópicas com características das chuvas (intensidade, lâmina, duração, frequência e padrão de ocorrência) influenciam na capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento da água no solo (ALMEIDA et al., 2019; SOUSA et al., 2020), podendo resultar em grandes perdas de solo por erosão hídrica e produção de sedimentos nos cursos d'água. Os processos de transporte e deposição dessas partículas são dinâmicos e dependentes de diversos fatores, como a forma, o tamanho e a massa das partículas, além da declividade, morfologia e velocidade de escoamento superficial dos cursos d'água (LEPESQUEUR et al., 2019; PEIXOTO et al., 2021).

O transporte de sedimentos apresenta distribuição horizontal e vertical ao longo do curso d'água, sendo dependente das características hidráulicas (CARVALHO, 2008), do tipo de material e da granulometria dos sedimentos produzidos em cada bacia hidrográfica (LEPESQUEUR et al., 2019). A vazão sólida total produzida e transportada pelos cursos d'água é representada pelas partículas finas em suspensão e por partículas maiores que são arrastadas longitudinalmente ou depositadas no leito do rio; entre ambas, ocorre uma faixa de material saltante nomeada de zona não amostrada, mas que é corrigida em cálculos da vazão sólida total por equações ou por amostragem em campo (CARVALHO, 2008).

A determinação *in loco* da vazão sólida em suspensão é fundamental em função das variações sazonais do transporte de sedimentos. Dentre os métodos de amostragem, o de igual incremento de largura (IIL) é o mais utilizado para amostragem de sedimentos em suspensão, em função da sua simplicidade e maior detalhamento hidrossedimentológico na seção transversal (CARVALHO, 2008). A vazão sólida de arrasto também pode ser determinada a partir de amostras, mas quando ocorrem limitações de equipamentos, recursos humanos e financeira, todas as vazões de sedimentos podem ser estimadas e simuladas por modelos compostos de grandezas físicas e hidráulicas do canal (GUAN et al., 2015;

LEPESQUEUR et al., 2019) e por meio de ferramentas e recursos geotecnológicos (MACEDO et al., 2021; MARINHO et al., 2022).

No Brasil, os estudos e o monitoramento dos processos hidrossedimentológicos estão concentrados nos principais cursos d'água e em grandes bacias hidrográficas, geralmente, realizados e disponibilizados pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), sob coordenação da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). Na Amazônia, esse monitoramento contínuo ocorre com baixa cobertura espacial, sendo escasso para bacias hidrográficas com pequenas áreas de drenagem. Essas limitações ocorrem pela logística, distância e/ou acesso limitado, que dificulta as medidas *in loco*, instalações e manutenção de equipamentos para o monitoramento de rotina (ANA, 2021).

No contexto regional da transição Cerrado-Amazônia, têm-se a bacia hidrográfica do rio Teles Pires, que se localiza em uma das principais regiões da fronteira agrícola brasileira (ZAIATZ et al., 2018; SIMÕES et al., 2020). O rio Teles Pires apresenta elevado potencial para geração de energia proveniente de hidrelétricas, visto que já possui cinco empreendimentos (Usinas Hidrelétricas – UHEs) instalados no seu curso principal. Apesar de ser uma região com boa disponibilidade hídrica superficial, nota-se a existência de potenciais conflitos pelos usos água, principalmente associados à geração de energia, irrigação, diluição de efluentes e outras demandas da urbanização. Nesse cenário, o desenvolvimento e o monitoramento de práticas de gestão e uso/ocupação da terra, nessa bacia hidrográfica, possui elevada importância econômica e ambiental (SIMÕES et al., 2021).

Pouco se conhece sobre a dinâmica hidrossedimentológica do rio Teles Pires, e principalmente de seus afluentes, visto que, os problemas como a perda de solos, insumos e fertilizantes, gerados pelo processo de erosão, carregam sedimentos para os pequenos cursos d'água (tributários), que são transportados para o exutório principal, causando assoreamento dos rios e dos reservatórios, além de outros impactos, e que por fim, não só diminuem a capacidade produtiva de terras agrícolas, como também o volume útil dos reservatórios. Assim, gerar informações para uma região de fronteira agrícola brasileira (transição Cerrado-Amazônia) podem subsidiar a gestão adequada dos recursos hídricos, da conservação e manejo dos solos na região.

Nesse contexto, propôs-se avaliar e estimar a produção de sedimentos em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, por meio de amostragens da vazão sólida em suspensão e total.

Material e métodos

Área de estudo e instalações

A área de estudo corresponde às sub-bacias pertencentes à bacia hidrográfica do rio Teles Pires, localizada entre as latitudes 7° 16' 47" e 14° 55' 17" S e longitudes 53° 49' 46" e 58° 7' 58" W, abrangendo os territórios dos estados de Mato Grosso e Pará, Brasil. A área de drenagem dessa bacia hidrográfica é de cerca de 141.278 km² e extensão da hidrovia principal aproximada de 1.498 km. A bacia hidrográfica do rio Teles Pires está inserida na região polo do agronegócio matogrossense e apresenta cobertura vegetal predominante dos biomas Cerrado (alto Teles Pires) e Amazônia (médio e baixo Teles Pires) (Figura 25).

O clima predominante na região do alto e parte do médio Teles Pires é o Aw (tropical quente e úmido), com sazonalidade climática definida por duas estações hídricas, a chuvosa (outubro a abril) e seca (maio a setembro). A precipitação média anual é de 1.970 mm e as temperaturas médias mensais variam entre 24 e 27 °C (SOUZA et al., 2013). Durante o período de avaliação a região de estudo acumulou chuva média anual de 1915 mm e temperatura do ar média mensal entre 25 e 27 °C (Figura 26), corroborando com o observado por Souza et al. (2013).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, os solos mais recorrentes na região do alto Teles Pires são os Latossolos, Cambissolos e Neossolos e na região do médio Teles Pires são os Argissolos, Latossolos, Neossolos e os Plintossolos (IBGE, 2009; ALVES et al., 2022).

As informações gerais das oito seções transversais de monitoramento, objetos deste estudo, estão apresentadas na Tabela 8. As áreas das sub-bacias hidrográficas Caiabi (estação fluviométrica 1 e 2), Celeste, Nandico, Preto e Rosana apresentam predomínio de atividades agrícolas, com o cultivo da soja, milho, algodão e feijão; nas áreas do ribeirão Preto e córrego Rosana há uma considerável ocupação urbana, enquanto nas áreas do rio Renato (estação fluviométrica 1 e 2) predomina vegetação nativa e pecuária, e uma ascensão expressiva da agricultura (Figura 27).

Localizadas à margem direita da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, cada uma das sub-bacias apresenta seção de monitoramento, por meio da instalação de uma estação fluviométrica (Figura 25 e Figura 27). A definição das oito seções de monitoramento hidrossedimentológico foi realizada buscando seguir os critérios descritos por Santos et al. (2001) como: facilidade de acesso e logística, local livre de ações antrópicas, trecho com velocidades bem distribuídas, leito e margem estáveis, bem definidos e livres de vegetação, rochas e outros obstáculos, trecho retilíneo com margens paralelas, perfil longitudinal regular e livres de remansos e local distante das confluências, local com condições adequadas para instalação, manutenção e operação dos equipamentos.

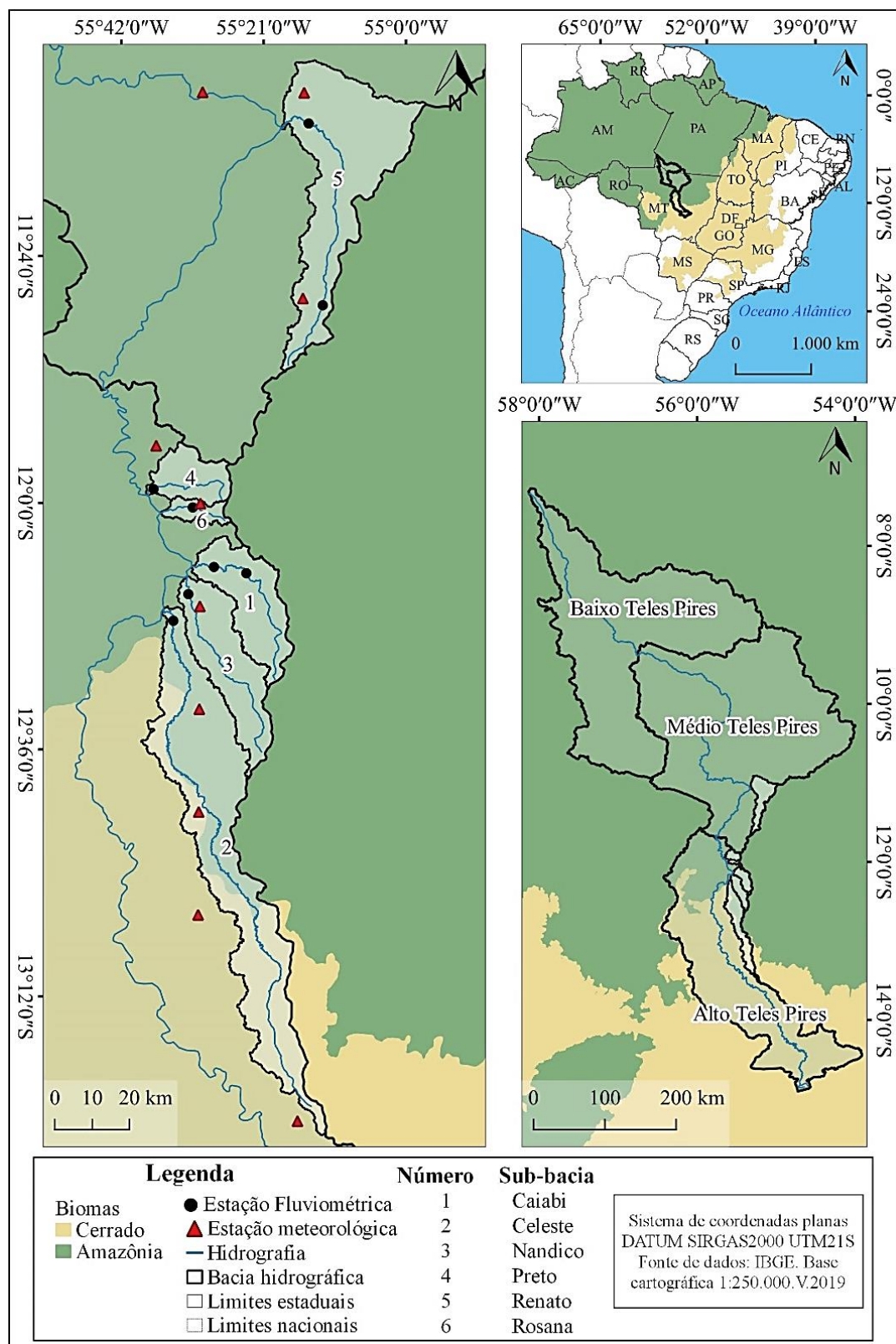


Figura 25. Mapa de localização das oito estações fluviométricas monitoradas nas sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.

Tabela 8. Informações gerais de oito estações fluviométricas monitoradas nas sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Estação Fluviométrica	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Subárea (km ²)	Hidrografia (km)	Período de dados
Caiabi 1	12°10'32" S	55°23'05" W	372	340	40	12/2020 a 11/2021
Caiabi 2	12°09'27" S	55°28'30" W	345	454	53	06/2018 a 11/2021
Celeste	12°17'39" S	55°33'56" W	319	1788	211	07/2020 a 05/2021
Nandico	12°13'38" S	55°31'31" W	334	570	57	07/2020 a 04/2021
Preto	11°58'01" S	55°37'20" W	325	243	25	05/2020 a 05/2021
Renato 1	11°31'18" S	55°12'12" W	345	130	17	06/2019 a 05/2021
Renato 2	11°04'06" S	55°14'59" W	281	1181	80	09/2019 a 05/2021
Rosana	12°00'37" S	55°31'08" W	332	47	11	09/2020 a 05/2021

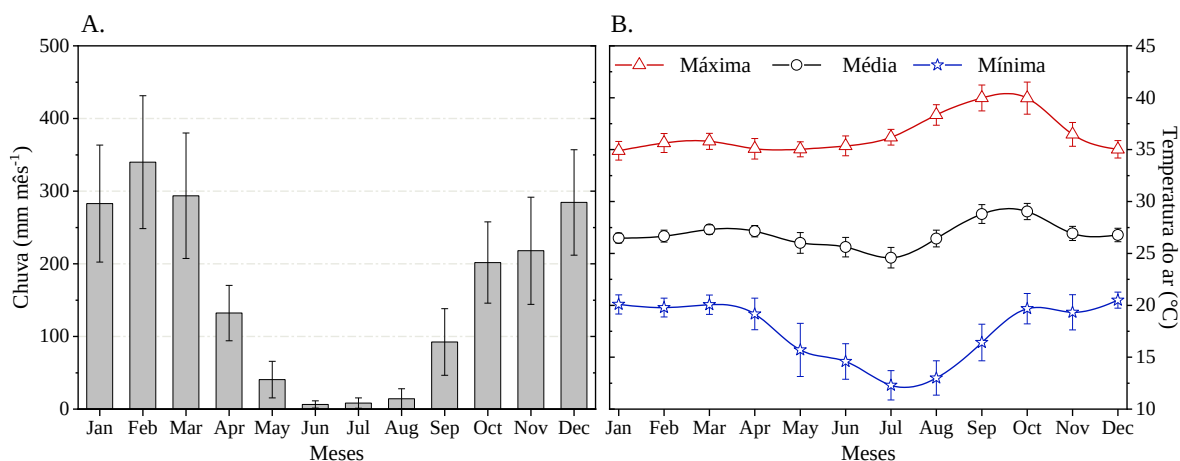


Figura 26. Médias mensais e desvio-padrão da chuva (A) e temperatura do ar (B), da região transição Cerrado-Amazônia da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil. Fonte: Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agritempo, 2020).

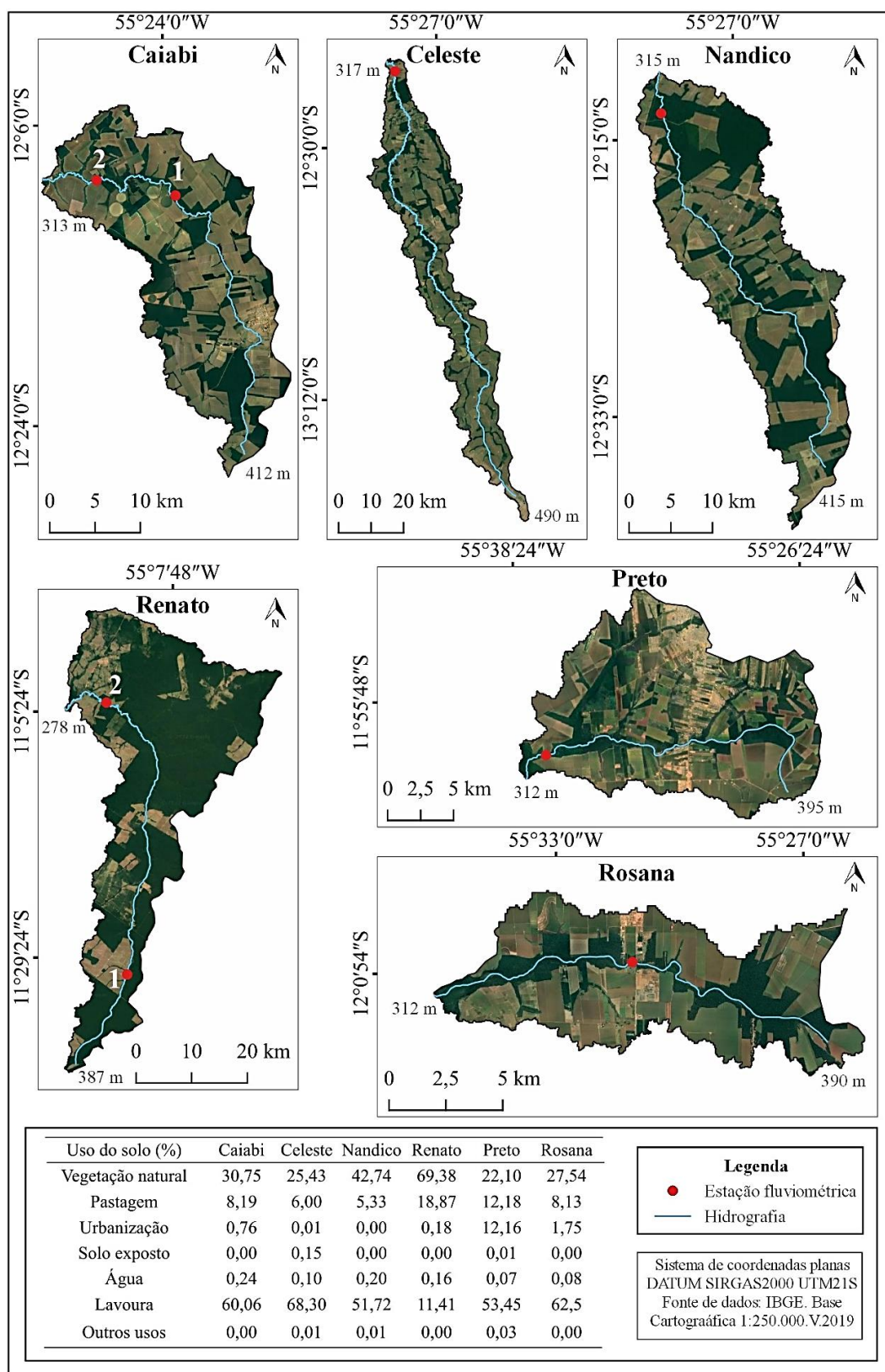


Figura 27. Mapa de localização das oito estações fluviométricas e principais usos do solo das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires na transição Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.

Fonte: Usos do solo (MAPBIOMAS, 2020).

Medidas de vazão líquida

As medidas de vazão líquida das oito seções transversais de monitoramento foram realizadas com molinete hidrométrico modelo *MLN-7* da fabricante *JCTM Ltda.* conectado ao contador de giros eletrônico e posicionado a vau com haste metálica graduada ou com guincho hidrométrico, dependendo da profundidade da seção transversal. A seção transversal de cada sub-bacia mantida fixa, adotando-se as premissas propostas por Santos et al. (2001), que define o número de verticais e pontos por vertical a serem medidos, a partir da largura da seção transversal e da profundidade de cada vertical, nesta ordem, podendo variar conforme a estação hídrica do ano. A vazão líquida total foi determinada pelo somatório do produto da velocidade e área molhada de cada subseção (Equação 2 - Capítulo I), por meio do método da meia seção.

Amostragem de sedimentos

Sedimentos em suspensão

O método de amostragem do igual incremento de largura – IIL (CARVALHO, 2008) foi adotado para a coleta de sedimentos em suspensão nas oitos seções de monitoramento. Nesse caso, as seções transversais foram divididas em segmentos ou subseções ou verticais em igual largura, permitindo a obtenção de amostras de água e sedimentos em suspensão em cada subseção ou vertical (Figura 28). Esse método foi escolhido com base no conhecimento prévio da distribuição de velocidade e vazão líquida de cada seção transversal, além disso, é um método recomendado por simplificar a metodologia em campo e análise dos resultados (CARVALHO, 2008; SIMIONI et al., 2021; PEIXOTO et al., 2021).

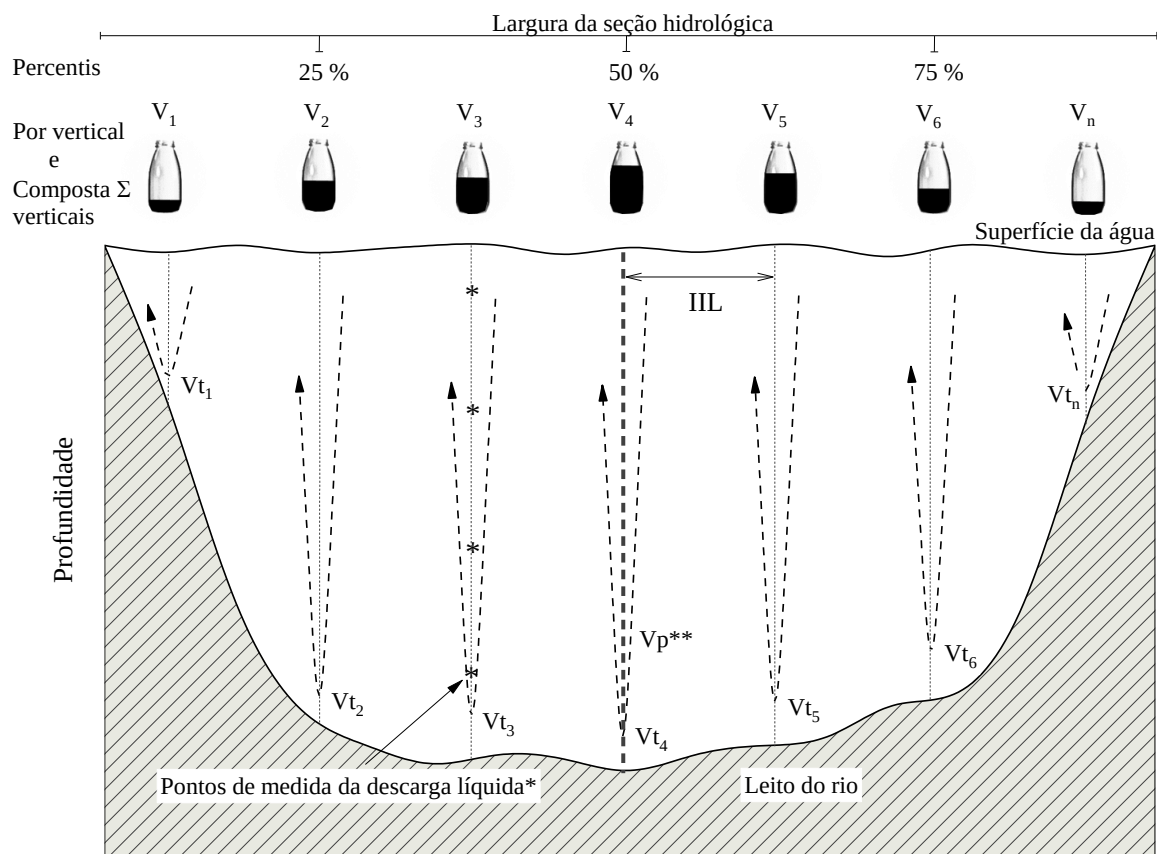


Figura 28. Representação de uma seção transversal hipotética demonstrando a amostragem de sedimentos em suspensão por integração pelo método do igual incremento de largura (IIL).

* Pontos de medição da vazão líquida (com molinete fluviométrico), variando conforme a profundidade de cada vertical da seção transversal; ** Vertical padrão representada pela vertical 4.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

Na aplicação do método IIL empregou-se a medição indireta de sedimentos em suspensão com a amostragem por integração na vertical. Essa amostragem consiste em obter uma amostra de água mais sedimentos em suspensão, ao longo da vertical, com uma velocidade de trânsito uniforme. Os equipamentos utilizados foram os amostradores de sedimentos em suspensão modelos *US DH-48* (Figura 29) e *US D-49* (Figura 30) da fabricante *JCTM Ltda.*, ambos amostradores apresentam bicos de diâmetros 1/8", 3/16" e 1/4" e zona não-amostrada de 0,09 e 0,10 m, respectivamente.



Figura 29. Amostrador de sedimentos em suspensão *US DH-48* amostragem a vau.



Figura 30. Amostrador de sedimentos em suspensão *US D-49* acoplado no guincho fluviométrico.

A escolha do bico dos amostradores dependia da velocidade de trânsito, que era definida pelo tempo de subida e descida do equipamento na amostragem por integração na vertical. Então, foram realizados testes de eficiência de coleta da amostra com os três bicos supracitados, considerando a descida e subida na vertical padrão (vertical com o maior produto da profundidade pela velocidade), utilizando a relação 1: $V_t / V_m = 0,2$ para o bico de 1/8" e a relação 2: $V_t / V_m = 0,4$ para os bicos de 3/16" e 1/4". O bico adequado era aquele que coletava o máximo de mistura água mais sedimentos em suspensão, variando de 3/4 a 4/5 do volume da garrafa de coleta, na vertical padrão.

Para manter a mesma velocidade de trânsito (semelhante a velocidade da água) na amostragem por integração numa seção transversal, o tempo de trânsito e o volume de amostra deve ser diferente em cada vertical (Figura 28). Assim sendo, calculava-se o tempo de trânsito para a vertical padrão, e posteriormente, para as demais verticais (Equações 6 e 7). Durante a amostragem, o bico do equipamento era mantido na horizontal, com a abertura contra o fluxo da água, e evitando contato com o leito do rio/córrego. Esses cuidados evitaram erros no volume de coleta e a contaminação da amostra por sedimento de arrasto.

$$t = \frac{2 * P_v}{V_t} \quad (6)$$

$$t_i = \frac{t * P_i}{P_v} \quad (7)$$

em que: V_t é a velocidade de trânsito ($m\ s^{-1}$); V_m é a velocidade média na seção amostrada ($m\ s^{-1}$); P_v é a profundidade da vertical padrão (m) e P_i é a profundidade da vertical subsequente (m).

Utilizando o mesmo bico do amostrador do teste de eficiência, foram realizadas as seguintes amostragens de sedimentos em suspensão por integração na vertical e que estão representadas na Figura 28:

- Amostragem por vertical (referência): consistiu na coleta de 1,0 L de volume da amostra (água e sedimentos) por vertical da seção transversal, com posterior armazenamento individualizado em frascos plásticos lacrados e identificados com o nome da seção de monitoramento, data, tipo de amostragem, número da vertical e tempo de trânsito.
- Amostragem composta (seção): o mesmo procedimento da amostragem por vertical foi repetido, todavia, as amostras de cada vertical da seção transversal foram reunidas em uma única amostra (composta), com volume aproximado de 10,0 L.
- Amostragem na vertical padrão: coleta de 1,0 L de volume da amostra apenas na vertical padrão.
- Amostragem em três verticais: consistiu na coleta de 1,0 L de volume da amostra em cada vertical posicionadas nos percentis a 25 (1/4); 50 (1/2) e 75 % (3/4) da largura da seção transversal.

O volume de 1,0 L para a amostragem por vertical foi definido como quantidade suficiente para análise individualizada e o volume de 10,0 L para a amostragem composta (Figura 31), foi determinado com base na concentração de sedimento em suspensão esperada para a região, conforme recomendação da Organização Meteorológica Mundial (CARVALHO, 2008).



Figura 31. Armazenamentos das amostras de água com sedimentos em suspensão.

Sedimentos de arrasto

A amostragem de sedimentos de arrasto foi realizada pela medição direta a vacuo com haste utilizando o equipamento portátil modelo *US BLH-84* da versão *Helley Smith* (Figura 32). O equipamento era posicionado verticalmente em determinados pontos do leito na seção transversal por 30 minutos e a abertura era posicionada na direção do fluxo da água. Esse amostrador apresenta eficiência de amostragem próxima de 100 % para areia e pedregulho, pois permite coletar sedimentos de arrasto entre 0,062 e 16,00 mm, através de uma saca de náilon com malha de 0,2 mm (CARVALHO, 2008).

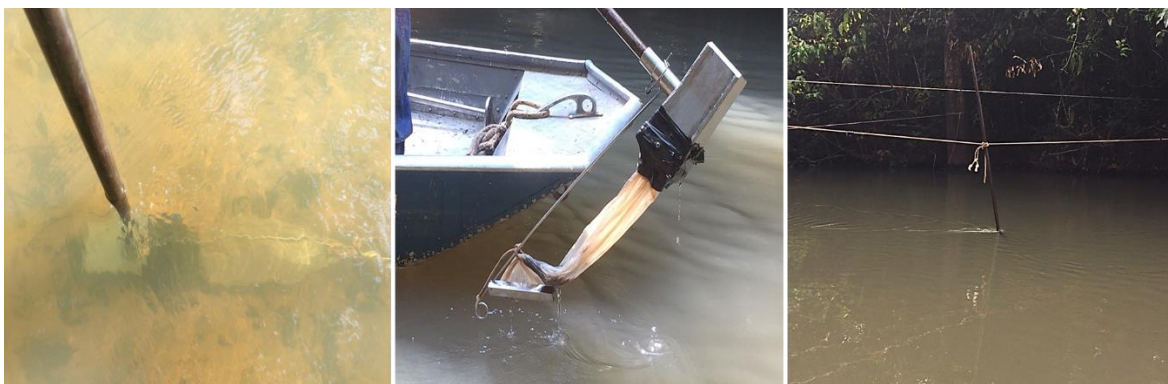


Figura 32. Amostrador de sedimentos de arrasto *US BLH-84* versão *Helley Smith*.

As amostras de sedimentos de arrasto foram coletadas em posição de igual incremento de largura, em no mínimo quatro verticais, escolhidas em posição alternada e distribuídas ao longo da seção transversal de acordo com as características hidrodinâmicas de cada seção de monitoramento, sempre evitando verticais de fluxo estático/água parada. Para evitar a perda de sedimentos, as amostras foram transferidas para frascos de plásticos, lavando a saca com água destilada, sendo os recipientes identificados com o nome da seção de monitoramento, data, tipo de amostragem, número da vertical e tempo de coleta, para posterior processamento das amostras (água e sedimentos de arrasto) em laboratório.

Análise de sedimentos

A concentração média de sedimentos em suspensão por vertical amostrada e por seção transversal (amostra composta) foi obtida pela filtração em sistema de polisulfona à vácuo, com membranas porosas de 0,45 μm e capacidade de 0,5 L por filtragem (Figura 33). Esse método foi escolhido devido à baixa concentração de sedimentos encontrada para os rios e córregos estudados.

Antes da filtração, as membranas foram secadas à 105,0 °C por uma hora e transferidas para dessecador com sílica gel hermeticamente fechado, para pesagem. No início de cada filtragem, as amostras de sedimentos em suspensão eram homogeneizadas e filtradas. As membranas eram secas à 105,0 °C até a obtenção da massa constante, sendo posteriormente mantidas no dessecador para evitar troca de umidade e obter a massa do conjunto membrana com sedimentos secos. A concentração média de sedimentos em suspensão por vertical e por seção foi calculada pela Equação 8.

$$C_{ss} = \frac{m_2 - m_1}{V} * 1000 \quad (8)$$

em que: C_{ss} é a concentração de sedimentos suspensos (mg L^{-1}); m_1 é a massa da membrana limpa e seca (g); m_2 é a massa da membrana com sedimentos seca (g); V é o volume da amostra (L).



Figura 33. Sistema de filtragem de sedimentos em suspensão.

As amostras de água com sedimento de arrasto de cada seção de monitoramento foram reunidas e transferidas para recipientes de metal, com posterior separação do material orgânico antes e após secagem em estufa à 105 °C até obter massa constante ou total evaporação da água. As etapas de secagem e pesagem dos sedimentos em suspensão e de arrasto foram executadas com estufa de circulação de ar forçada e balança digital de precisão 0,0001g, respectivamente (Figura 34).



Figura 34. Separação e secagem de sedimentos de arrasto.

Cálculos de vazão sólida

A vazão sólida total foi calculada pela soma da vazão sólida em suspensão amostrada por vertical com a vazão sólida de arrasto (Equação 9). A vazão sólida de arrasto foi calculada pela Equação 10; a vazão sólida em suspensão foi calculada pela Equação 11.

Foram avaliadas diferentes amostragens de sedimentos em suspensão:

- Amostragem por vertical (Q_{ss}) foi obtida a partir da soma do produto das vazões líquidas e concentrações de sedimentos em suspensão de cada vertical da seção transversal.
- Amostragem composta (Q_{ssc}) foi obtida pelo produto da vazão líquida e concentração de sedimentos em suspensão totais de toda a seção transversal.
- Amostragem na vertical padrão (Q_{ssvp}) foi obtida pelo produto da vazão líquida e concentração de sedimentos em suspensão apenas da vertical padrão.
- Amostragem em três verticais (Q_{ssp}) foi obtida a partir da média do produto das vazões líquidas e concentrações de sedimentos em suspensão de cada vertical correspondentes aos percentis de 25 (1/4); 50 (1/2) e 75 % (3/4) da seção transversal.

$$Q_{st} = Q_{ss} + Q_{sa} \quad (9)$$

$$Q_{sa} = \left[\frac{1440 * m * L}{E_{am} * n * l * t} \right] \quad (10)$$

$$Q_{ss} = 0.0864 * Q * C_{ss} \quad (11)$$

em que: Q_{st} é a vazão sólida total ($t \, d^{-1}$); Q_{ss} é a vazão sólida em suspensão ($t \, d^{-1}$); Q_{sa} é a vazão sólida de arrasto ($t \, d^{-1}$); Q é a vazão líquida total ($m^3 \, s^{-1}$); C_{ss} é a concentração de sedimentos suspensos ($mg \, L^{-1}$), todas de cada seção transversal; m é a massa da amostra total (t); L é a largura da seção transversal (m); E_{am} é a eficiência do amostrador para 30 % da saca = 1; n é o número de verticais amostradas; l é a largura da abertura do amostrador = 0,075 m e t é o tempo de amostragem (min) .

Modelos de estimativas para vazão sólida em suspensão e total

As medidas de vazão líquida e as amostragens de sedimentos em suspensão e de arrasto foram realizadas em intervalos mensais, compondo 110 coletas para cada forma de

amostragem de sedimentos em suspensão entre 2018 e 2021, sendo os períodos de coletas diferentes para cada estação fluviométrica (Tabela 8). Os períodos de dados de cada seção de monitoramento das sub-bacias hidrográficas foram definidos pela análise de consistência e integridade das medidas de vazão líquida, vazão sólida em suspensão e de arrasto para a determinação da vazão sólida total.

As bases de dados foram separadas em 70 e 30 % do total dos dados para calibração dos coeficientes e avaliação do desempenho estatístico dos modelos de estimativas, respectivamente. A separação dos dados ocorreu de forma que todas as sub-bacias hidrográficas e estações hídras do ano (chuvosa e seca) estivessem representadas em ambos os agrupamentos de dados (calibração e validação). A partir dessa separação inicial, realizou-se uma nova subdivisão em função da sazonalidade hídrica da região (estação chuvosa e seca).

Para os agrupamentos anual (total de dados) e estações hídras (seca e chuvosa) foram calibradas regressões lineares simples ($y = a + bx$) para estimativas dos valores médios da vazão de sólidos em suspensão das amostragens de Q_{ssc} , Q_{ssvp} e $Q_{ss\%}$ com base em Q_{ss} . Posteriormente, foram obtidas estimativas de Q_{st} considerando as diferentes formas de amostragens da vazão sólida em suspensão supracitadas.

Na avaliação do desempenho dos modelos ajustados foram empregados os indicadores estatísticos MBE - erro relativo médio (Equação 3 – Capítulo I); o RMSE - raiz quadrática do erro relativo médio (Equação 4 – Capítulo I); e o dw - índice de concordância de Willmott (Equação 5 – Capítulo I) conforme Souza et al. (2017). O MBE calcula a média dos desvios médios entre os valores observados e estimados (predição do modelo), o RMSE fornece a diferença quadrática entre os valores observados e estimados e o dw é um coeficiente que indica quanto os valores estimados pelo modelo se afastam da média observada. Ele tem intervalo variando entre 0,0 e 1,0, sendo que $dw = 1,0$ representa o completo ajustamento entre estimativa e observação, e 0,0 indica o oposto.

Resultados

A cobertura vegetal predominante nas margens das seções transversais monitoradas é de vegetação nativa, contudo, a faixa de cobertura varia de acordo com e a largura do curso d'água e o tipo de vegetação, conforme estabelecido no Código Florestal Brasileiro (Lei

Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012). Observa-se proximidade entre as seções de monitoramento e áreas agrícolas nas sub-bacias dos rios Celeste, Nandico e Caiabi, que estão inseridas no bioma Cerrado; já nas regiões centrais das sub-bacias do ribeirão Preto e do córrego Rosana, apresentam ocupação territorial significativa de áreas urbana e industriais e nas áreas de drenagem da sub-bacia do rio Renato ainda apresentam baixa ocupação do solo pelas atividades antrópicas (Figura 27). Essas condições de ocupação do solo são importantes para a avaliação da sazonalidade de sedimentos transportados nessa região.

Os perfis de cada seção transversal das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires estudadas apresentaram características geométricas e hidráulicas distintas entre as estações seca e chuvosa (Figura 35). A largura e profundidade média de cada seção transversal, variou entre os picos de máxima e mínima das vazões líquidas, sendo observadas as maiores profundidades próximas ao centro de cada seção (exceto no rio Nandico).

As vazões líquidas apresentaram picos de máximas entre fevereiro e abril, e, picos de mínimas entre setembro e outubro, contudo, as variações na concentração de sedimentos em suspensão ao longo do perfil das seções transversais apresentaram comportamentos similares entre as estações seca e chuvosa, exceto Rosana e Caiabi (estação fluviométrica 2) (Figura 35).

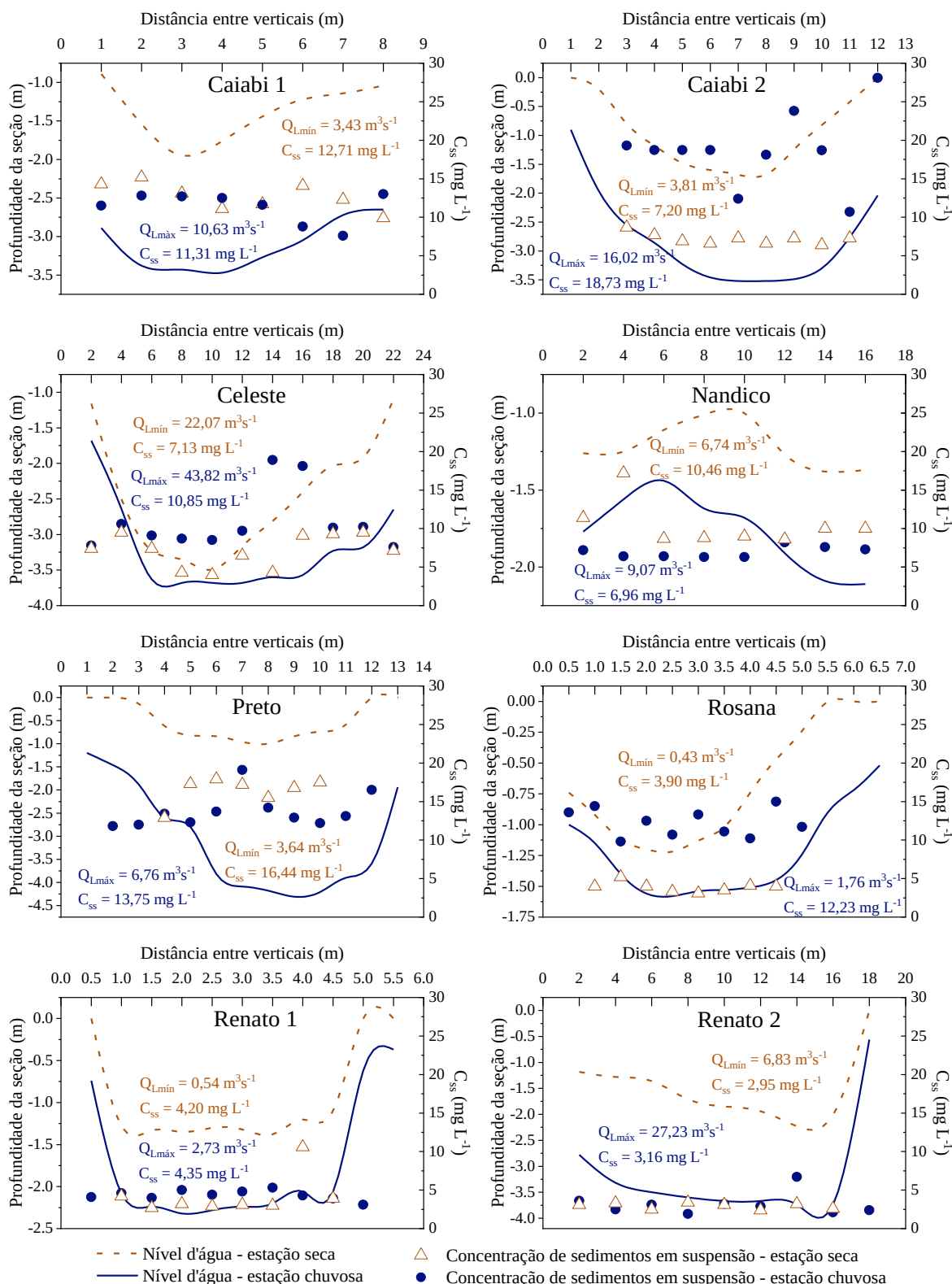


Figura 35. Perfis transversais do nível da água e da concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}), no período seco e chuvoso, de oito seções de monitoramento em sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Observação: $Q_{L\max}$ e $Q_{L\min}$: são valores totais das vazões líquidas máxima e mínima de cada seção transversal.

Independentemente da seção de monitoramento, ocorreram dinâmicas semelhantes entre as vazões líquidas e sólidas, visto que os picos das vazões sólidas em suspensão, de arrasto e total acompanharam os picos das vazões líquidas durante o período avaliado (Tabela 9 e Figura 36). Na estação chuvosa, evidencia-se o aumento do escoamento superficial e da vazão sólida com o incremento da área de drenagem (Tabela 9 e Figura 36). Além disso, nota-se alta vazão sólida total específica para as seções do ribeirão Preto e córrego Rosana quando comparado com as demais seções de monitoramento (Tabela 9).

Tabela 9. Vazões líquidas e sólidas médias em diferentes estações hídricas do ano, para oito estações fluviométricas de sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Estação hídrica	Estação Fluviométrica	$Q_L \pm DP$ ($m^3 s^{-1}$)	C_{ss} ($mg L^{-1}$)	Q_{ss} ($t d^{-1}$)	Q_{sa} ($t d^{-1}$)	Q_{st} ($t d^{-1}$)	Ad (km^2)	Q_{stesp} ($t d^{-1} km^2$)
Anual	Caiabi 1	$5,83 \pm 2,45$	8,38	4,33	0,0948	4,43	340	0,0130
	Caiabi 2	$9,38 \pm 3,48$	7,95	6,18	0,2852	6,46	454	0,0142
	Celeste	$28,92 \pm 7,89$	9,56	24,84	1,8822	26,72	1.788	0,0149
	Nandico	$8,02 \pm 2,96$	8,88	5,90	0,0391	5,94	570	0,0104
	Preto	$5,14 \pm 0,98$	19,92	8,58	0,1978	8,78	243	0,0362
	Renato 1	$1,45 \pm 0,68$	4,35	0,53	0,0040	0,54	130	0,0041
	Renato 2	$16,24 \pm 6,93$	3,17	4,28	0,4885	4,77	1.181	0,0040
	Rosana	$0,96 \pm 0,44$	10,74	0,78	0,0207	0,80	47	0,0171
Seca	Caiabi 1	$3,90 \pm 0,47$	8,40	2,80	0,0650	2,87	340	0,0084
	Caiabi 2	$6,20 \pm 1,21$	8,76	4,55	0,1875	4,74	454	0,0104
	Celeste	$25,20 \pm 3,97$	9,06	20,00	1,0681	21,07	1.788	0,0118
	Nandico	$6,70 \pm 0,66$	9,81	5,97	0,0405	6,01	570	0,0105
	Preto	$4,70 \pm 0,69$	22,47	9,05	0,2406	9,30	243	0,0383
	Renato 1	$0,90 \pm 0,20$	4,19	0,31	0,0036	0,32	130	0,0024
	Renato 2	$10,50 \pm 2,16$	3,40	3,05	0,1527	3,20	1.181	0,0027
	Rosana	$0,70 \pm 0,14$	12,46	0,59	0,0154	0,61	47	0,0130
Chuvosa	Caiabi 1	$7,70 \pm 2,08$	8,37	5,87	0,1245	5,99	340	0,0176
	Caiabi 2	$11,70 \pm 2,57$	7,36	7,36	0,3564	7,72	454	0,0170
	Celeste	$40,00 \pm 5,37$	11,07	39,35	4,3244	43,68	1.788	0,0244
	Nandico	$12,00 \pm 4,14$	6,11	5,71	0,0350	5,75	570	0,0100
	Preto	$6,30 \pm 0,38$	13,10	7,31	0,0838	7,39	243	0,0305
	Renato 1	$1,80 \pm 0,61$	4,45	0,67	0,0043	0,67	130	0,0052
	Renato 2	$22,90 \pm 3,37$	2,89	5,71	0,8802	6,59	1.181	0,0056
	Rosana	$1,40 \pm 0,35$	8,60	1,02	0,0274	1,04	47	0,0223

Em que: Q_L , vazão líquida; DP, desvio padrão; C_{ss} , concentração de sedimentos em suspensão; Q_{ss} , vazão sólida em suspensão; Q_{sa} , vazão sólida de arrasto; Q_{st} , vazão sólida total; Ad, área de drenagem da nascente até a seção de monitoramento; Q_{stesp} , vazão sólida total específica. * Período de avaliação entre 06/2018 e 11/2021.

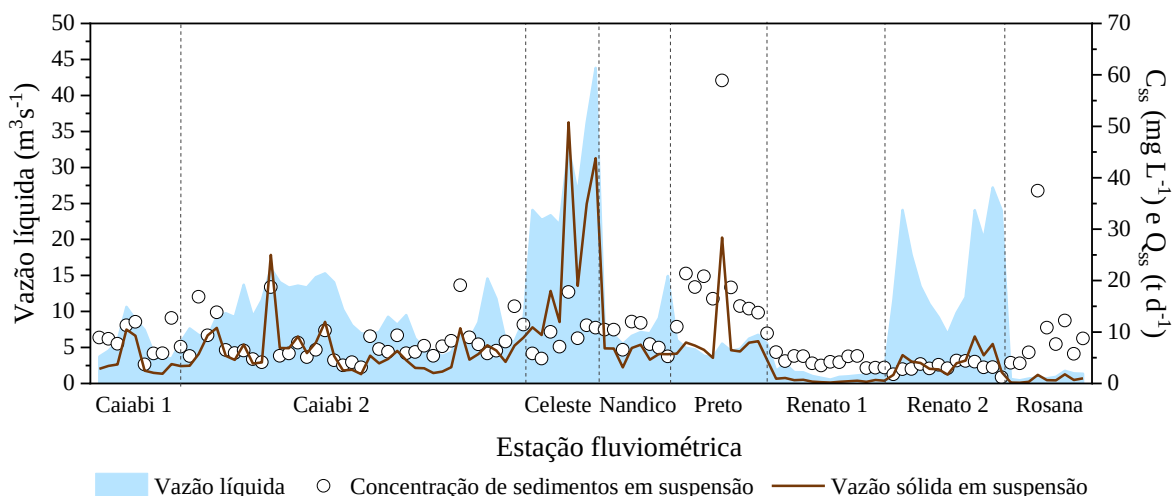


Figura 36. Vazão líquida, concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) e vazão sólida em suspensão (Q_{ss}) medidas entre 06/2018 a 11/2021 nas oito seções transversais de monitoramento das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

As equações de regressão linear ajustadas para vazão sólida em suspensão por diferentes amostragens e sazonalidade hídrica apresentaram comportamento crescente, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,93 (Figura 37). Nesse caso, desconsiderou-se os coeficientes lineares das regressões de estimativas da vazão sólida em suspensão, visto que esses coeficientes gerariam resíduos para valores nulos de Q_{ss} referência.

Os valores de MBE foram menores nas estimativas de Q_{ss} baseadas na vertical padrão, contudo, os espalhamentos (RMSE) foram menores nas estimativas relacionadas com os percentis do perfil da seção transversal. As regressões lineares geraram subestimativas de até $1,88 \text{ t dia}^{-1}$ no período chuvoso, além de favorecerem maiores espalhamentos das estimativas. Os índices de ajustamento Willmott foram superiores a 0,8234, independentemente da estação hídrica (agrupamento de dados) e seção de monitoramento (Figura 37).

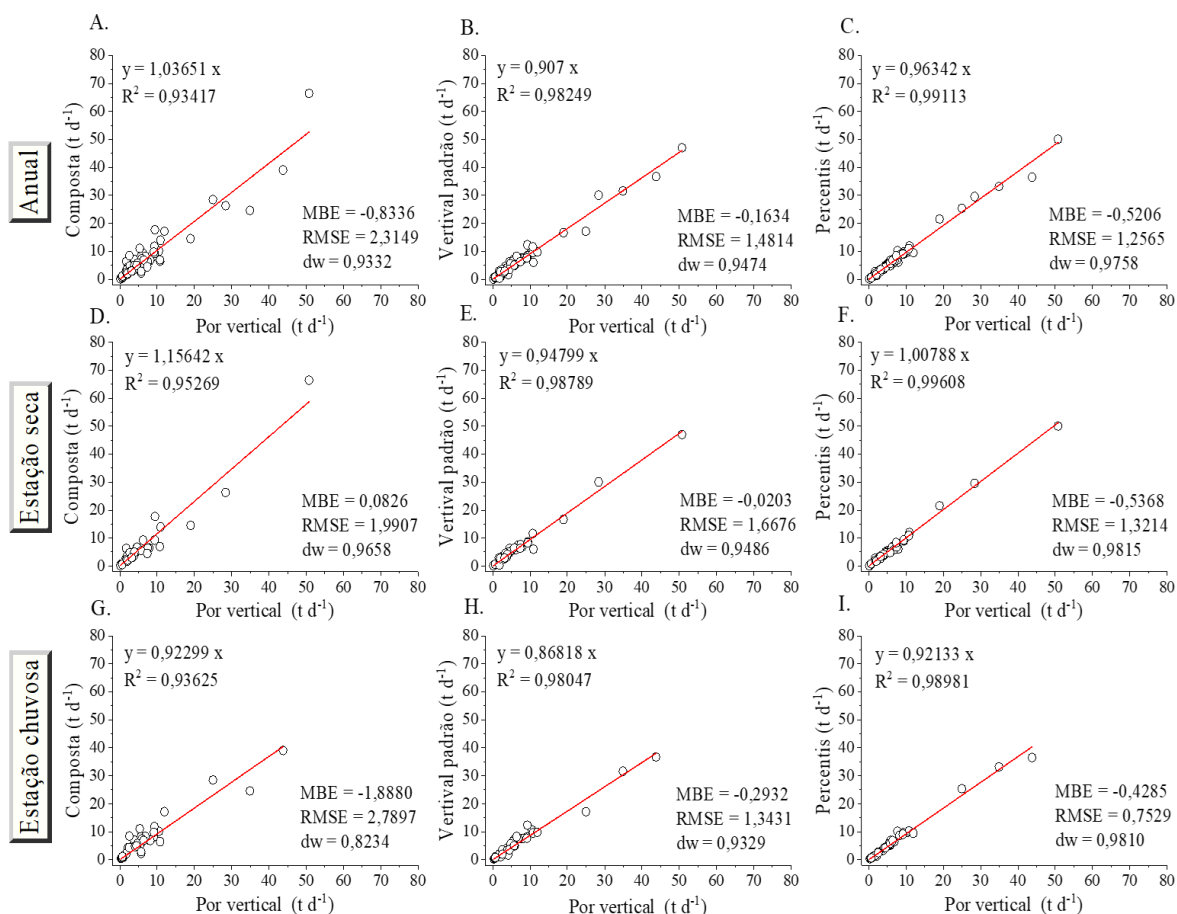


Figura 37. Equações lineares de estimativas e seus desempenhos estatísticos da vazão sólida em suspensão por diferentes amostragens e no agrupamento anual (A-C), na estação seca (D-F) e na estação chuvosa (G-I) das oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Quanto a forma de amostragem de sedimentos em suspensão, os valores estimados mais próximos do observado para Q_{ss} referência foram obtidos com Q_{ssp} , em todos os agrupamentos de dados, exceto para o rio Celeste (Figura 38B-D). Na Figura 38 os valores dos desvios padrões (linhas vermelhas) indicam a variabilidade dos valores médios observados das vazões líquidas e sólidas em suspensão por diferentes amostragens e agrupamentos. Optou-se por apresentar os valores observados (colunas) e estimados (“pontos” pretos) por seção de monitoramento em função da variabilidade das vazões sólidas medidas nas diferentes seções transversais.

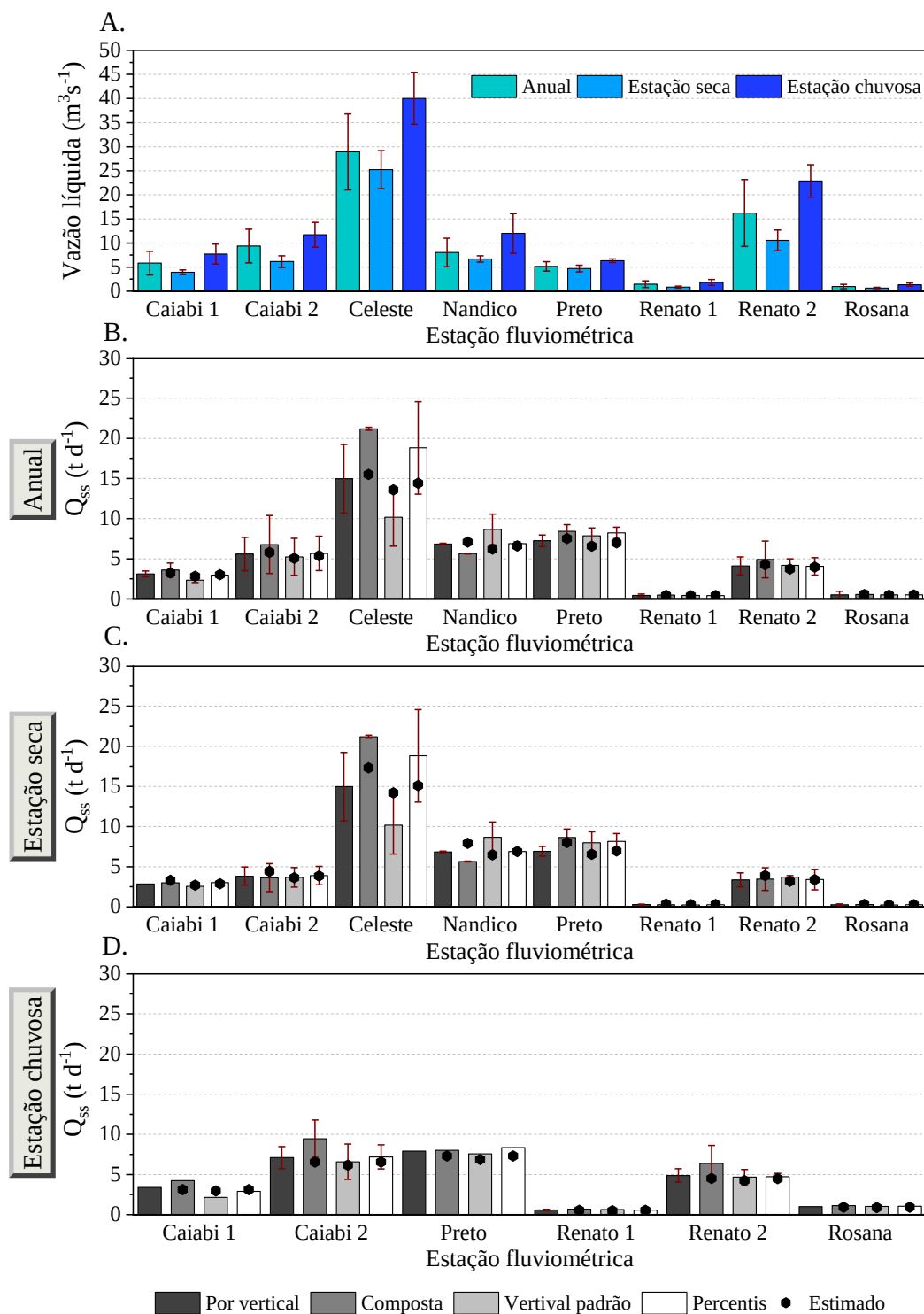


Figura 38. Vazões líquidas (A) e vazões sólidas em suspensão observadas e estimadas por diferentes amostragens nos agrupamentos anual (B), na estação seca (C) e na estação chuvosa (D) das oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

As equações de estimativas da vazão sólida total com as diferentes formas de amostragem da vazão sólida em suspensão, mostram melhorias em todos os indicadores

estatísticos de desempenho (Figura 8). Contudo, estima-se melhor a vazão sólida total quando agrupamos os dados por estação hídrica, a melhor equação ajustada para estimar Q_{st} na estação seca foi pela amostragem da Q_{ssp} com superestimativa mínima de $0,12 \text{ t d}^{-1}$ e na estação chuvosa pela amostragem da Q_{ssc} com subestimativa de $0,16 \text{ t d}^{-1}$ das vazões sólidas totais (Figura 39). Esses erros se tornam desprezíveis quando diluído pelas áreas de drenagem até a seção de monitoramento de cada rio avaliado (Tabela 9).

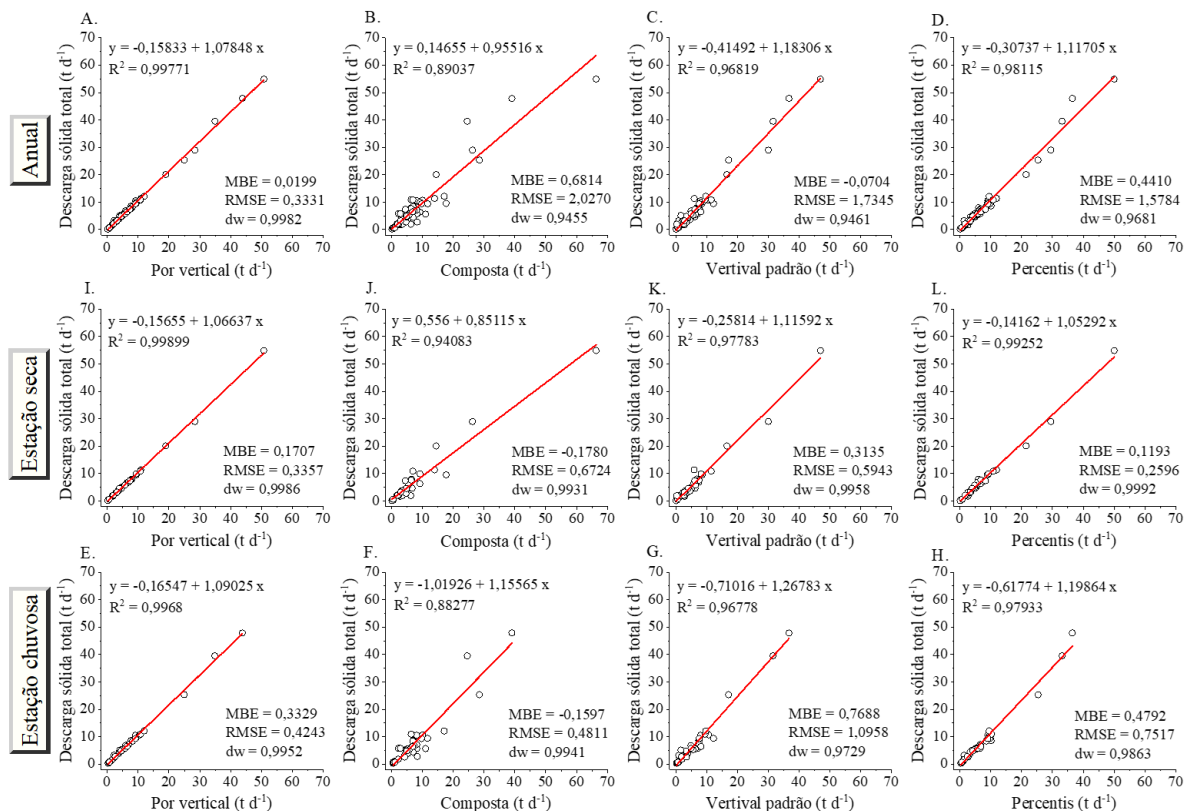


Figura 39. Equações lineares de estimativas e seus desempenhos estatísticos da vazão sólida total em relação a vazão sólida em suspensão por diferentes amostragens e no agrupamento anual (A–D), na estação seca (E–H) e na estação chuvosa (I–L) das oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Observamos distintas contribuições das vazões sólidas de arrasto nas vazões sólidas totais entre as seções transversais dos rios avaliados, variando de 0,67 no Nandico a 9,65 % no Renato 2 na média anual, essas variações ficam mais evidentes entre as estações hídricas. A contribuição de sedimentos de arrasto nas vazões totais aumentou com o aumento da área de drenagem, conforme observado entre as seções de monitoramento dos rios Caiabi e Renato e no período chuvoso para as seções do rio Caiabi, Celeste e Renato 2 (Tabela 10).

Tabela 10. Percentuais médios das vazões sólidas de arrasto sobre as vazões sólidas totais em diferentes estações hídricas do ano, para oito estações fluviométricas das sub-bacias hidrográficas do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Estação hídrica	Estação fluviométrica	$Q_{sa} \pm DP$ (%)
Anual	Caiabi 1	$2,31 \pm 1,50$
	Caiabi 2	$4,93 \pm 4,91$
	Celeste	$5,35 \pm 3,64$
	Nandico	$0,67 \pm 0,35$
	Preto	$2,31 \pm 2,10$
	Renato 1	$0,81 \pm 0,65$
	Renato 2	$9,65 \pm 8,94$
	Rosana	$3,16 \pm 2,72$
Seca	Caiabi 1	$2,22 \pm 1,98$
	Caiabi 2	$3,88 \pm 4,39$
	Celeste	$3,79 \pm 2,41$
	Nandico	$0,69 \pm 0,41$
	Preto	$2,80 \pm 2,16$
	Renato 1	$1,21 \pm 0,73$
	Renato 2	$5,05 \pm 5,15$
	Rosana	$3,71 \pm 3,45$
Chuvosa	Caiabi 1	$2,40 \pm 1,05$
	Caiabi 2	$5,70 \pm 5,22$
	Celeste	$10,05 \pm 2,23$
	Nandico	$0,61 \pm 0,06$
	Preto	$1,01 \pm 1,55$
	Renato 1	$0,56 \pm 0,47$
	Renato 2	$15,01 \pm 9,79$
	Rosana	$2,48 \pm 1,65$

Abreviaturas: DP, desvio padrão; Q_{sa} , vazão sólida de arrasto. * Período de avaliação entre 06/2018 e 11/2021.

Discussão

Os rios estudados são canais naturais e perenes com fluxo de escoamento superficial contínuo ao longo do ano, todavia, sofrem variações no volume de água escoado e na dinâmica de transporte de sedimentos em função das estações hídricas regionais (Figura 35, Figura 36, Figura 37). No período avaliado, observou-se um retardamento entre os períodos de vazão líquida máxima (dezembro a maio) e mínima (junho a novembro), com maiores defasagens com o aumento da área de drenagem. O período chuvoso, que se inicia no terceiro decêndio de setembro, é responsável pela recarga subterrânea e superficial de água nessas bacias hidrográficas, contudo, a velocidade dessa recarga é dependente da demanda hídrica (evapotranspiração) da superfície, do tamanho da área de drenagem, do tipo de solo, da cobertura e das práticas de manejo, da declividade do terreno e da quantidade de água precipitada (ANDRADE et al., 2018; RODRIGUES et al., 2020).

Os perfis transversais das seções de monitoramento apresentaram morfologia de leito e margens distintos e estáveis (Figura 35). O formato da seção transversal é responsável pela sua geometria hidráulica, e, influencia sobretudo, nas direções de fluxo do escoamento superficial. Além disso, a formação geomorfológica pode influenciar na estabilidade do leito e margens de um canal (COSER: GRISON, 2019). Em todas as seções transversais avaliadas, a cobertura vegetal predominante às margens é vegetação nativa (Figura 27), conferindo assim, maior proteção do solo contra impacto direto das gotas das chuvas e erosões marginais (ZHANGA et al., 2019).

Ficou evidente neste estudo que a dinâmica de transporte de sedimentos teve influência expressiva dos usos do solo (Figura 27) e áreas de drenagem (Tabela 9). Bacias hidrográficas com área de drenagem maior podem transportar mais sedimentos que as de área de drenagem menor (MARINHO et al., 2022), contudo isso não é regra. Os rios Celeste e Renato (estação fluviométrica 2) possuem áreas de drenagem semelhantes, mas com vazões sólidas em suspensão, de arrasto e total bem distintas (Tabela 9). Esse fato é explicado pelo predomínio de cobertura vegetal nativa na sub-bacia do rio Renato que proporciona maior conservação do solo, enquanto que os solos da sub-bacia do rio Celeste são predominantemente ocupados por cultivos agrícolas (Figura 27).

Ainda foi notado entre as sub-bacias do rio Renato (estação fluviométrica 1) e córrego Rosana, com áreas de drenagem semelhantes até os pontos de amostragens, que as vazões de sedimentos foram maiores no córrego Rosana, sendo que nesse caso, ocorre maior exposição e ocupação dos solos dessa sub-bacia por área agrícola e urbana, contribuindo para maiores vazões de sedimentos oriundos de estradas rurais e/ou ruas não pavimentadas (Figura 27 e Tabela 9). No ribeirão Preto e no córrego Rosana, que apresentam áreas de drenagem pequenas, foram obtidas concentrações de sedimentos e vazão sólida total por km² equivalentes ou superiores ao observado no rio Celeste, independentemente da estação hídrica (Tabela 9 e Figura 36).

O ribeirão Preto apresentou aumento nas concentrações e vazões de sólidos durante a estação seca (Tabela 9). Esse fato é justificado pela baixa capacidade de diluição dos sedimentos em um menor volume de água no período seco para uma mesma condição de lançamento de efluentes. Enquanto no rio Renato as menores concentrações e distribuição uniforme de sólidos em suspensão observadas ao longo do curso hídrico deve-se a maior conservação do solo dessa sub-bacia ocupada por vegetação nativa (Figura 27 e Figura 36).

O ribeirão Preto ainda apresentou variações relevantes na vazão sólida total específica entre 0,0305 a 0,0383 t d⁻¹ por km² de área da sub-bacia entre as estações chuvosa e seca. Vale ressaltar que, este é um rio com considerável ocupação urbana e, portanto, recebe efluentes de processos industriais e redes de esgoto que contribuem para o aumento das vazões sólidas.

Além da própria produção de sedimentos das bacias hidrográficas, destaca-se que, nesses casos, também podem ocorrer influências dos volumes de água escoada pelos canais responsáveis pela diluição de sólidos em suspensão (MARINHO et al., 2022) e também pela ressuspensão de partículas durante o período chuvoso (PEIXOTO et al., 2020). O rio Celeste apresenta maior capacidade de diluição dos sólidos em suspensão em função da maior vazão líquida, e, por conseguinte, no ribeirão Preto e córrego Rosana, essa diluição pode ser comprometida pelas menores vazões líquidas.

Área agrícolas com ausência de manejo conservacionista são mais susceptíveis às perdas de solo e água, e conseqüentemente, tendem a favorecer o aumento da produção de sedimentos fluviais, principalmente em casos de alterações da estrutura do solo, desagregação ou compactação das camadas superficiais (BERIHUN et al., 2022; HIMANSHU et al., 2019). No caso das sub-bacias hidrográficas do ribeirão Preto e córrego Rosana, houve contribuição significativa de atividades urbano e industrial para o aumento das concentrações de sedimentos em suspensão, com possibilidades futuras de alterações nas condições ambientais e sanitárias dos corpos hídricos, decorrentes da poluição da água. Jumps et al. (2022) e Sekharan et al. (2022) relataram recentemente os problemas relacionados com a poluição antrópica de rios urbanos sob influências de diferentes usos do solo.

Nas oito seções transversais de monitoramento, a concentração e a vazão de sedimentos em suspensão variaram com a sazonalidade hídrica, usos do solo e com a área de drenagem (até o ponto de amostragem de cada seção de monitoramento) (Figura 27 e Figura 36). Comportamento semelhante também foi observado por Simioni et al. (2021) que encontraram Q_{ss} a partir da amostragem por vertical entre 1,55 e 22,82 t d⁻¹ e Q_{st} entre 2,0 e 23,0 t d⁻¹ no rio Caiabi (estação fluviométrica 2) entre 2018 e 2020. Peixoto et al. (2020) relatam grande variabilidade nas vazões de sedimentos com aumento durante o período chuvoso entre as quatro seções de monitoramento instaladas no curso d'água principal da bacia hidrográfica do rio Jordão, em Minas Gerais. Nesse estudo as vazões sólidas em suspensão variam de 17,31 a 64,64 t d⁻¹ e a vazão sólida total de 30,57 a 113,83 t d⁻¹ para

vazões líquidas entre 2,4 e 6,7 m³ s⁻¹, nesta ordem. Nota-se que na bacia hidrográfica do rio Jordão com predomínio de atividades agropecuárias a produção de sedimentos é superior ao observado nas bacias hidrográficas avaliadas no presente estudo (Tabela 9 e Figura 36).

O aumento da vazão de sedimentos durante o período chuvoso pode estar relacionado à existência de extensas áreas de lavouras e pastagens mal manejadas. Estudos avaliando perdas de água e solo em sistemas integrados de produção nessa região, sob chuva natural, têm mostrado que o manejo e uso do solo influenciam nas perdas de solo por erosão hídrica e que ocorrem reduções significativas das perdas de solo e água, quando o componente florestal está integrado com lavouras e/ou pastagens (RIEGER et al., 2016; ZOLIN et al., 2016), ou quando adota-se sistemas de cultivo com plantio direto e/ou cultivo mínimo (ALMEIDA et al., 2016).

A produção de sedimentos no contexto de uma bacia hidrográfica depende das interações entre as intensidades e duração das precipitações pluviais com a densidade da cobertura vegetal (ALMEIDA et al 2019; SOUSA et al., 2020), do tipo de solo e das práticas de manejo (BERIHUN et al., 2022; HIMANSHU et al., 2019; RIEGER et al., 2016; ZOLIN et al., 2016). Por sua vez, o transporte de sedimentos é resultante da declividade do canal e do aumento das velocidades do fluxo com o aumento das vazões líquidas, principalmente no período chuvoso (PEIXOTO et al., 2021; PEIXOTO et al., 2020).

Estudos sobre a dinâmica de transporte de sedimentos em suspensão realizados para o rio Negro no Amazonas (MARINHO et al., 2022) e para o rio Jordão no Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (PEIXOTO et al., 2020) afirmam que as concentrações e vazões de sedimentos são controladas pelo regime hidrológico e usos do solo. É compreensível a influência do fluxo de escoamento superficial na dinâmica de transporte de sedimentos (GUAN et al., 2015), indicando que a capacidade desse transporte pode aumentar com o aumento do fluxo (PEIXOTO et al. 2021).

Vale ressaltar que o presente estudo propôs avaliar se a forma de amostragem de sedimentos em suspensão pode ser simplificada com segurança estatística, permitindo otimizar as atividades de coleta de campo e processamento em laboratório. De fato, as diferentes amostragens como, composta, na vertical padrão e nas três verticais nos percentis a 25, 50 e 75 % da largura da seção transversal, exibiram resultados muito próximos da amostragem por vertical (referência), e o modelo matemático por regressão linear simples

utilizado, estimou com acurácia as vazões sólidas em suspensão e total, no contexto regional da bacia hidrográfica do rio Teles Pires.

A forma de amostragem de sedimentos em suspensão gerou pouca influência nos desvios médios e nos espalhamentos de estimativas de vazões sólidas em suspensão e totais, possibilitando bons ajustes e desempenhos estatísticos para aplicações de regressões lineares simples, independentemente da estação hídrica da região. É importante destacar que já era esperada essa variabilidade nos desvios médios (MBE) sobre as vazões sólidas em suspensão obtidas para as diferentes formas de amostragens (coletas), seções de monitoramento e sazonalidade hídrica, visto que existem diferenças nas características morfológicas e hidráulicas de cada seção transversal, áreas de drenagem e usos do solo de cada sub-bacias hidrográficas estudadas.

Nenhuma equação universal de transporte de sedimentos está disponível e recomendada para ampla utilização, visto que cada modelo empírico tem sua própria faixa de aplicação (GUAN et al., 2015), como é o caso das regressões ajustadas no presente estudo, que consideram os sedimentos em suspensão obtidos por diferentes formas de amostragem e suas influências na produção de sedimentos totais. A aplicação dessas equações em outras bacias hidrográficas fica restrita, pois dependerá das características físicas e hidráulicas e da dinâmica de produção e transporte de sedimentos de cada seção transversal, sendo necessário primeiro conhecer o comportamento hidrossedimentológico da seção para posterior escolha da amostragem e equação.

Estudos agrupando um número maior de bacias hidrográficas pelas áreas de drenagem, usos do solo ou produção e transporte de sedimentos com dinâmicas semelhantes devem ser realizados para possibilitar a calibração/validação de novos modelos de estimativas das vazões sólidas em suspensão e total. Esses estudos serão fundamentais para o planejamento de uso do solo e da água, bem como, para tomadas de decisão e implementação de práticas eficazes de manejo do solo, objetivando diminuir as perdas por erosão (BERIHUN et al., 2022), poluição e assoreamento de corpos hídricos (WANG et al., 2016).

Conclusões

A dinâmica de produção e transporte de sedimentos em rios e córregos da bacia hidrográfica do rio Teles Pires depende da sazonalidade hídrica da região, da área de drenagem e dos usos do solo em cada sub-bacia hidrográfica.

As regressões lineares simples são adequadas para estimar as relações entre vazões sólidas em suspensão e total obtidas por diferentes formas de amostragem.

Os percentuais médios das vazões sólidas de arrasto dos rios e córregos afluentes da bacia hidrográfica do rio Teles Pires variam de 3 a 5 % entre as estações hídricas da região.

As diferentes formas de amostragens de sedimentos em suspensão apresentam compatibilidade para obtenção da vazão sólida em suspensão e total e devem ser consideradas em condições futuras para outras bacias hidrográficas. Contudo, considera-se a amostragem na vertical padrão a mais simplificada por ser a vertical de referência hidrossedimentológica de uma seção transversal.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Código de Financiamento – 001 e Processo 88887.144957/2017-00. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio com as bolsas de iniciação científica e bolsa produtividade (Processo 308784/2019-7). À 3ª Comarca de Justiça Cível de Sinop pelo apoio financeiro ao Projeto CBH Monitora e ao Comitê dos Afluentes da Margem Direita do Alto Teles Pires.

Referências

ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PEREIRA, F. A. C.; ROUWS, J. R. C. Produção de sedimentos e infiltração de água no solo sob diferentes características de chuva simulada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 23, n. 8, p. 572-578, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>.

ALMEIDA, W. S. D.; CARVALHO, D. F. D.; PANACHUKI, E.; VALIM, W. C.; RODRIGUES, S. A.; VARELLA, C. A. A. Erosão hidráulica em diferentes sistemas de preparo e cobertura do solo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1110-1119, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900010>

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).**

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Serviço Geológico do Brasil. Brasília: ANA, 2021. 118p.

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, R. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; FILHO, J. C. R. Respostas hidrológicas de uma bacia hidrográfica a mudanças na vegetação em uma região semiárida tropical. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 1, p. 161-170, 2018.

ANDRIETTI, G.; FREIRE, R.; AMARAL, A. G.; ALMEIDA, F. T. de; BONGIOVANI, M. C.; SCHNEIDER, R. M. Índice de qualidade da água e índices de eutrofização do Rio Caiabi, MT. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 162-175, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1769>

BERIHUN; M. L.; TSUNEKAWA; A.; HAREGEWEYN; N.; TSUBO; M.; FENTA; A. A.; EBABU; K.; SULTAN; D.; YIHUN TADDELE DILE; Y. T. Redução do escoamento e perda de sedimentos sob opções alternativas de uso e gestão da terra baseadas na capacidade da terra em uma bacia sub-úmida da Etiópia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 40, 100998, p.1-16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100998>

BORRELLI; P.; ROBINSON; D. A.; FLEISCHER; L. R.; LUGATO; E.; BALLABIO; C.; ALEWELL; C.; MEUSBURGER; K.; MODUGNO; S.; SCHÜTT; B.; FERRO; V.; BAGARELLO; V.; OOST; K.; VAN; MONTANARELLA; L.; PANAGOS, P. Uma avaliação do impacto global da mudança do uso da terra no século XXI na erosão do solo. **Nature Communications**, v. 8, n. 8, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**, 2^a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.

COSER, E.; GRISON, F. Geometria hidráulica de um trecho de canal fluvial aplicando HEC-RAS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 4, p. 691-706, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1512>.

GUAN, M.; WRIGHT, N. G.; SLEIGH, P. A. Múltiplos efeitos do transporte de sedimentos e processos geomórficos em eventos de inundação: Modelagem e compreensão. **International Journal of Sediment Research**, v. 30, n. 4, p. 371-381, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2014.12.001>

HIMANSHU, S. K.; PANDEYA, A.; YADAV, B.; GUPTA, A. Avaliação das melhores práticas de manejo para controle de perda de sedimentos e nutrientes usando o modelo SWAT. **Soil & Tillage Research**, v. 192, p. 42-58, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.016>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estado do Mato Grosso: pedologia (Mapa exploratório de solos)**, 2009. 1p. Disponível em <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>> (acesso em 2022).

JUMPS, N.; GRAY, A. B.; GUILINGER, J. J.; COWGER, W. C. Impactos dos incêndios florestais na dinâmica persistente de sedimentos suspensos do rio Ventura, Califórnia.

Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 41, 101096, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101096>

LEPESQUEUR, J.; HOSTACHE, R.; MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; MONTARGÈS-PELLETIER, E.; HISSLER, C. Modelagem do transporte de sedimentos em ambientes ribeirinhos: sobre a importância da distribuição granulométrica, densidade de sedimentos e concentrações de sedimentos em suspensão no limite a montante. **Hydrology and Earth System Science**, v. 23, p. 3901-3915, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-3901-2019>

MACEDO, P. S. M.; OLIVEIRA P. T. S.; ANTUNES M. A. H.; DURIGON V. L.; FIDALGO E. C. C.; CARVALHO D. F. Nova abordagem para obtenção do fator C de RUSLE considerando o efeito sazonal das chuvas na cobertura vegetal. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 9, n. 2, p. 207-216, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.12.001>

MAPBIOMAS. “Projeto MapBiomas – Mapeamento da superfície de água no Brasil: A dinâmica da superfície de água do território brasileiro (Coleção 1), 2021. Disponível em <<https://mapbiomas.org/superficie-de-agua-no-brasil-reduz-15-desde-o-inicio-dos-anos-90>> (acesso em 2022).

MARINHO, R. R.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; MARTINEZ, J. M.; HARMEL, T. O Transporte de sedimento suspenso no Rio Negro (Bacia Amazônica) por meio de dados MSI/Sentinel-2. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 1, p. 1174-1190, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2076>

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E. Estudo do transporte de sedimentos no Rio Jordão, localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro-MG. **Acta Scientiarum Technology**, v. 43, e51714, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v43i1.51714>

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E., NISHIMURA, A. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921-931, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180137>

RIEGER, F. A.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SOUZA, A. P. de; MATOS, E. S.; MAGALHÃES, C. A. S.; FARIAS, A. F. Erosão hídrica em um Latossolo sob Sistemas Integrados Lavoura-Floresta em uma Área de Transição entre os Biomas Amazônia e Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150111, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150111>

RODRIGUES, A. L.; VILLA, P. M.; RODRIGUES, A. C.; MATA, R. A.; MARTORANO, L. C. Balanço hídrico de uma microbacia na mata atlântica: implicações para a gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 614-628, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145008421>

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LATERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba, Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.

SEKHARAN, S.; SAMAL, D. R.; PHULERIA, H. C.; CHANDEL, M. K.; GEDAM, S.; KUMAR, R.; SETHI, V.; SUPATE, A. R.; KARMAKAR, S. Monitoramento da poluição do rio em uma bacia industrial em ecossistema urbano: Desafios e estrutura geoespacial proposta. **Environmental Challenges**, v. 7, 100496, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100496>.

SIMIONI, C. F.; ALMEIDA, F. T. de; ZOLIN, C. A.; ULIANA, E. M.; SOUZA, A. P. de; MARQUE, A. Vazão sólida em microbacia da região amazônica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e73, p. 1-26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X64223>

SIMÕES, R.; PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; MACIEL, A.; SANTOS, L.; ANDRADE, P. R.; SÁNCHEZ, A.; FERREIRA, K.; CARVALHO, A. Land use and cover maps for Mato Grosso State in Brazil from 2001 to 2017. **Scientia Data**, v. 7, n. 34, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11440461>

SIMÕES, J. M.; ALMEIDA, F. T. de; ULIANA, E. M.; VENDRUSCULO, L. G. Uso de sensoriamento remoto no monitoramento de sólidos em suspensão no reservatório de uma usina hidrelétrica na zona de transição Cerrado-Amazônia. **Gaia Scientia**, v. 15, n. 3, p. 69-88, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2021v15n3.57559>

SIMÕES, R.; PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; MACIEL, A.; SANTOS, L.; ANDRADE, P. R.; SÁNCHEZ, A.; FERREIRA, K.; CARVALHO, A. Mapas de uso e cobertura da terra para o estado de Mato Grosso no Brasil de 2001 a 2017. **Scientific Data**, v. 7, n. 34, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11440461>

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a07>

SOUZA, A. P. de; SILVA, A. C.; TANAKA, A. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; KLAR, A. E.; GOMES, A. W. A. Radiação global por modelos simplificados para o estado de Mato Grosso, Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 52, n. 4, p. 215-227, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000400001>

SOUSA, M. M. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; RIBEIRO FILHO, J. C.; MOURA, M. M. S. Características pluviométricas determinantes no transporte de sedimentos em microbacia com vegetação raleada no semiárido tropical. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, p. 785-793, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n322rc>

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Avaliação da mudança da erosão do solo e suas relações com a mudança de uso/cobertura da terra na China do final da década de 1980 a 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

ZAIATZ, A. P. S. R.; ZOLIN, C. A.; VENDRUSCULO, L. G.; LOPES, T. R.; PAULINO, J. Mudança de uso e cobertura agrícola da terra no ecótono Cerrado/Amazônia: Um estudo de caso da bacia do alto rio Teles Pires. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 2, p. 168-177, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201701930>

ZHANGA, S.; LIA, Z.; HOUA, X.; YIB, Y. Impactos no escoamento em escala de bacias hidrográficas e na produção de sedimentos resultantes de mudanças sinérgicas no clima e na vegetação. **Catena**, v. 179, p. 129-138, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.007>

ZIEMBOWICZ, M. M.; MARCHESAN, J.; BARATTO, J.; ALBA, A.; SILVA, R. R.; PEREIRA, R. S. Geotecnologias aplicadas na análise dos impactos no uso e cobertura da terra causados pela construção de uma usina hidrelétrica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 40, e17, P. 1-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X29847>

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SILVA MATOS, E.; MAGALHÃES, C. A. S.; ALMEIDA, F. de T.; SOUZA, A. P. de; MINGOTI, R. Perdas de solo e água na integração lavoura-floresta e na sucessão soja-milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1223-1230, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900022>

5. CAPÍTULO 3 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RENATO: MORFOMETRIA, VAZÃO E CURVAS-CHAVE LÍQUIDA E SÓLIDA

Resumo

A redução da disponibilidade hídrica superficial no bioma Amazônia brasileiro está associada as atividades antrópicas e mudanças climáticas, fatos que tem impulsionado os estudos de monitoramento hidrológico. Tais estudos, buscam compreender as respostas hidrológicas frente as mudanças de uso e cobertura da terra visando a adequada gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas amazônicas. Assim, o objetivo do presente estudo foi determinar as características fisiográficas e estabelecer curvas-chave líquida e sólidas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, sob condições de dados restritos. As medidas de cota, vazão líquida (Q_L) e vazões sólidas em suspensão (Q_{ss}) e de arrasto (Q_{sa}) ocorreram mensalmente entre fevereiro de 2019 e novembro de 2022, compondo 28 e 16 (estação fluviométrica 1) e 21 e 16 (estação fluviométrica 2) medições de Q_L , Q_{ss} e Q_{sa} , respectivamente. As características fisiográficas foram determinadas utilizando o software QGIS 3.16.11. A sub-bacia hidrográfica do rio Renato apresentou densidade de drenagem regular = $0,505 \text{ km km}^{-2}$, forma alongada e com baixa probabilidade de ocorrência de enchentes ($k_f = 0,19$; $k_c = 2,17$ e $I_c = 0,21$) e o relevo variou de plano a fortemente ondulado (0 a 30%). Os diferentes modelos de regressão ajustados para Q_L apresentaram desempenho estatístico satisfatório, a seção hidrológica 1 obteve valores médios de $Q_L = 1,52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, índice de concordância de Willmott (dw) = 0,8999, eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) = 0,60 e pequena subestimativa de Q_L , a seção hidrológica 2 obteve valores médios de $Q_L = 18,09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $dw = 0,9599$, $NSE = 0,83$ e pequena superestimativa de Q_L . Independentemente da seção hidrológicas, o desempenho estatístico dos modelos de regressão para as vazões sólidas em suspensão e total (Q_{st}) foram insatisfatório. Conclui-se que a sub-bacia hidrográfica do rio Renato é pouco susceptível aos eventos extremos de enchentes, devido sua forma alongada e densidade de drenagem regular. Os modelos de regressão avaliados ajustaram de forma satisfatória para Q_L e insatisfatória para Q_{ss} e Q_{st} . Portanto, ainda há necessidade de continuar os estudos com monitoramento hidrossedimentológico para construir curvas-chave que estimam de forma acurada as vazões líquida e sólida.

Palavras-chave: Características fisiográficas; Modelos de regressão; Monitoramento hidrossedimentológico; Rio Teles Pires; sul da Amazônia.

Abstract

The reduction in surface water availability in the Brazilian Amazon biome is associated with anthropic activities and climate change, facts that have driven hydrological monitoring studies. Such studies seek to understand the hydrological responses to changes in land use and land cover, aiming at the proper management of water resources in Amazonian river basins. Thus, the objective of the present study was to determine the physiographic characteristics and establish liquid and solid key curves of the Renato river sub-basin, a tributary of the Teles Pires river, under conditions of restricted data. Measurements of quota, liquid flow (Q_L) and solid flows in suspension (Q_{ss}) and drag (Q_{sa}) took place monthly between February 2019 and November 2022, composing 28 and 16 (fluviometric station 1)

and 21 and 16 (station fluviometric 2) measurements of Q_L , Q_{ss} and Q_{sa} , respectively. Physiographic characteristics were determined using the QGIS 3.16.11 software. The Renato River sub-basin had a regular drainage density = 0.505 km km^{-2} , an elongated shape and low probability of flooding ($K_f = 0.19$; $K_c = 2.17$ and $I_c = 0.21$) and the relief varied from flat to strongly undulating (0 to 30%). The different regression models adjusted for Q_L showed satisfactory statistical performance, the hydrological section 1 obtained mean values of $Q_L = 1.52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, Willmott concordance index (dw) = 0.8999, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) = 0.60 and small underestimation of Q_L , hydrological section 2 obtained mean values of $Q_L = 18.09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $dw = 0.9599$, NSE = 0.83 and small overestimate of Q_L . Regardless of the hydrological section, the statistical performance of the regression models for suspended and total solid flows (Q_{st}) were unsatisfactory. It is concluded that the Renato river hydrographic sub-basin is little susceptible to extreme flood events, due to its elongated shape and regular drainage density. The evaluated regression models adjusted satisfactorily for Q_L and unsatisfactorily for Q_{ss} and Q_{st} . Therefore, there is still a need to continue studies with hydrosedimentological monitoring to build key curves that accurately estimate the liquid and solid flows.

Keywords: Physiographic characteristics; Regression models; Hydrosedimentological monitoring; Teles Pires River; southern Amazon.

Introdução

A intensificação dos conflitos pelos usos consuntivos e não consuntivos da água tem gerado impactos nas diferentes cadeias produtivas, na qualidade de vida da sociedade e na manutenção dos ecossistemas naturais. A água é um recurso natural indispensável para atender as múltiplas demandas de abastecimento humano, industrial, dessedentação animal, irrigação agrícola, captação ou lançamento de efluentes, geração de energia, recreação, turismo, navegação, manutenção dos ecossistemas naturais, dentre outros (STINGHEN: MANNICH, 2022). Nesse sentido, a realização de estudos direcionados ao monitoramento hidrológico são importantes para identificar a disponibilidade quantitativa e qualitativa desse recurso natural, e, subsidiar a adequada gestão dos recursos hídricos.

O Brasil possui cerca de 6% da superfície e 12% do volume de água doce do planeta, sendo que desse volume, em torno de 78% são rios e lagos naturais e 22% são reservatórios e represas artificiais (MAPPBIOMAS, 2021). No mapeamento de superfície de água no Brasil, entre 1985 até 2020 realizado pelo MapBiomas, foi registrado uma redução significativa da disponibilidade hídrica superficial em todas as regiões/biomas do país, apesar de alguns ganhos de superfície de água que estão predominantemente associados com a instalação de empreendimentos hidrelétricos.

No estado de Mato Grosso, houve uma redução de superfície de água entre 1990 e 2020 (MAPPBIOMAS, 2021). Essa redução de disponibilidade hídrica superficial está

associada as mudanças de uso e cobertura da terra, sobretudo, na conversão da vegetação natural em áreas agrícolas e urbanas (LOPES et al., 2021; KRAESKI et al., 2022), essas mudanças, por sua vez, influenciam nas componentes hidrológicas, causando redução no volume de água precipitada e na evapotranspiração (SANTOS et al., 2019).

O regime hidrológico de uma região ou das bacias hidrográficas que compõem uma região é dependente das condições climáticas (GROPPO et al., 2019; RODRIGUES et al., 2020), da geomorfologia do solo (WENZEL et al., 2017; SANTOS et al., 2019) e do tipo de cobertura vegetal (SOUZA et al., 2019; PEIXOTO et al., 2020). Dentre essas variáveis, as mudanças de uso e cobertura da terra podem gerar alterações mais rápidas nos processos hidrossedimentológicos, visto que as variações climáticas estão associadas aos eventos extremos e as suas influências nas componentes hidrológicas também são dependentes das características morfométricas da bacia hidrográfica.

Por conseguinte, a ausência de práticas conservacionistas em solos agricultáveis e a supressão da vegetação natural, influenciam na capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento da água da chuva no solo e nas taxas de produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas (SOUZA et al., 2019; PEIXOTO et al., 2020). Além disso, têm-se inúmeros impactos negativos gerados pelo transporte de elevadas concentrações de sedimentos, como a poluição dos corpos hídricos, redução e extinção de espécies aquáticas (ANDRIETTI et al., 2016; WANG et al., 2016), empobrecimento de solos agricultáveis com a perda da camada superficial, assoreamentos e maior suscetibilidade a formação de enchentes e inundações, alterações do volume e fluxo d'água, da morfologia do leito e da margem de bacias hidrográficas (ZHANG et al., 2019), diminuição da vida útil de obras, de reservatórios, abrasão de turbinas e outros equipamentos (ZIEMBOWICZ et al., 2018).

O monitoramento hidrossedimentológico consiste em medir continuamente as componentes do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, com maior destaque para o monitoramento do nível d'água e da turbidez, que permitem determinar o volume de água superficial (vazão líquida) e a produção e transporte de sedimentos (vazão sólida). Essas duas variáveis são dependentes das características das chuvas (intensidade, lâmina, duração, frequência e padrão de ocorrência), cobertura vegetal, solo, clima (ALMEIDA et al., 2019; SOUSA et al., 2020) e das características fisiográficas da bacia hidrográfica (WENZEL et al., 2017; SANTOS et al., 2019). Nesse caso, ressalta-se, que o transporte e a deposição de sedimentos, ainda são dependentes da forma, do tamanho e da massa das partículas, além da

declividade, morfologia e velocidade de escoamento superficial dos cursos d'água (LEPESQUEUR et al., 2019; PEIXOTO et al., 2021).

A medição *in loco* da vazão líquida e amostragem de sedimentos em cursos d'água naturais são fundamentais para a definição de curvas-chave e calibração de modelos hidrológicos, que permitem fazer previsões de eventos de inundações, escassez hídrica, perda de solo e assoreamento de reservatórios. Além disso, podem auxiliar na adoção de medidas mitigadoras para esses problemas como, na implementação de práticas adequadas de gestão da terra (LOPES et al., 2021; BERIHUN et al., 2022), na definição de projetos hidroagrícolas e florestais (ZOLIN et al., 2016), na regularização de vazões em reservatórios (ULIANA et al., 2016) e no controle da produção, transporte e deposição de sedimentos (SIMIONI et al., 2021; MARINHO et al., 2022; SIRQUEIRA et al., 2022).

No contexto regional, levantar informações hidrológicas sobre a disponibilidade hídrica superficial e o transporte de sedimentos em pequenos cursos d'água naturais são importantes, visto que as maiores demandas antrópicas ocorrem em cursos d'água com menor área de drenagem, como é o caso dos rios e córregos da região sul da Amazônia e norte do Mato Grosso. A escassez de informações hidrológicas de afluentes da bacia hidrográfica do rio Teles Pires, tem motivado a realização de estudos sobre a dinâmica hidrológica e monitoramento contínuo de canais perenes e de rede de drenagem com pequeno grau de ramificação, visando subsidiar o planejamento e a gestão adequada da água e do solo nessa região. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi determinar as características fisiográficas e estabelecer as curvas-chave líquida e sólida da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires. Essa sub-bacia hidrográfica apresenta ainda elevado percentual de vegetação natural (matas nativas) quando comparada com outras bacias da região, todavia, recentemente vêm sofrendo alterações no uso da terra pela abertura de novas áreas (desmatamento) e substituição de áreas de pastagens por lavouras.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo corresponde à uma sub-bacia pertencente à bacia hidrográfica do rio Teles Pires, que por sua vez, está localizada entre as latitudes 7° 16' 47" e 14° 55' 17" S e longitudes 53° 49' 46" e 58° 07' 58" W, abrangendo os territórios dos estados de Mato Grosso e Pará, Brasil. A área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Teles Pires é de cerca de

141.278 km² e a extensão da hidrovia principal aproximada de 1.498 km. Essa bacia hidrográfica está inserida na região polo do agronegócio matogrossense e apresenta cobertura vegetal predominante dos biomas Cerrado (alto Teles Pires) e Amazônia (médio e baixo Teles Pires) (Figura 40).

A sub-bacia hidrográfica do rio Renato está localizada à margem direita e na região do médio rio Teles Pires, no sul da Amazônia, entre as latitudes 11° 40' 30" e 10° 55' 17" S e longitudes 55° 17' 46" e 55° 13' 25" W. A área de drenagem dessa sub-bacia é de cerca de 1.336 km² e extensão da hidrovia principal aproximada de 95 km (Figura 40). A área da sub-bacia é coberta com cerca de 69 % de vegetação natural e as principais atividades econômicas estão concentradas no manejo florestal madeireiro e não madeireiro, pecuária extensiva e uma ascensão expressiva da agricultura (Figura 40).

O clima na região é o Aw (tropical quente e úmido), com sazonalidade climática definida por duas estações hídricas, a chuvosa (outubro a abril) e seca (maio a setembro). A precipitação média anual é de 1.970 mm e as temperaturas médias mensais variam entre 24 e 27 °C (SOUZA et al., 2013). Durante o período de avaliação a região de estudo acumulou chuva média anual de 1.915 mm e temperatura do ar média mensal entre 25 e 27 °C (Figura 41), corroborando com o observado por Souza et al. (2013).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, os solos mais recorrentes na sub-bacia hidrográfica do rio Renato são os Plintossolos e os Latossolos (IBGE, 2021). Alves et al. (2022) descrevem que os Latossolos dessa sub-bacia variam do Vermelho a Vermelho-Amarelo, todos distróficos, com textura mais argilosa na região alta (nascente) e textura média em regiões mais baixas (foz). No geral, os Latossolos apresentam características que respondem bem à fertilização para as culturas tropicais. Essa descrição da classificação do solo também corrobora com o estudo de Spera et al. (2019) em solos florestais na região da foz da sub-bacia hidrográfica do rio Renato.

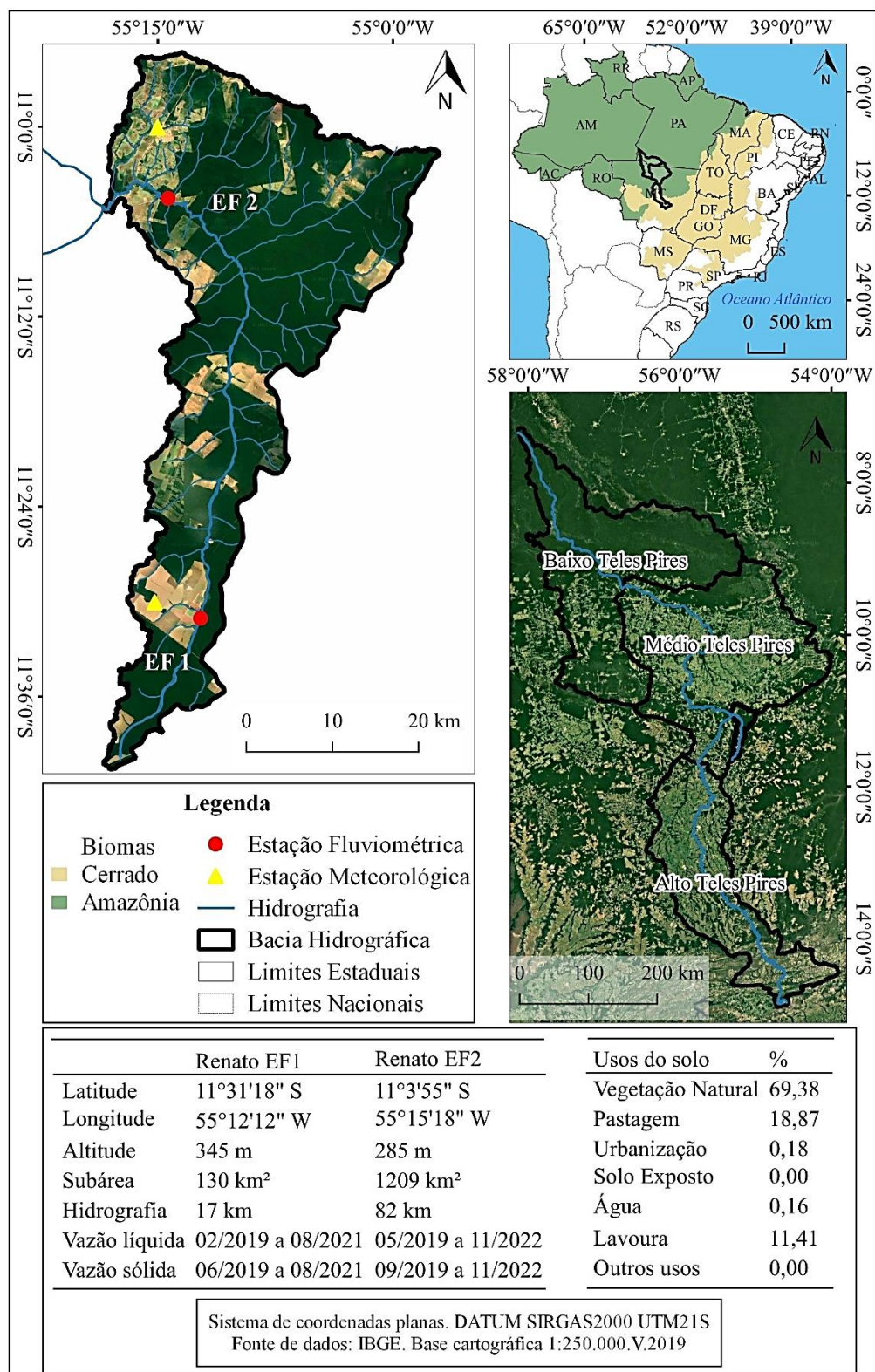


Figura 40. Mapa de localização e principais usos do solo da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, no sul da Amazônia, Mato Grosso, Brasil. Observação: na tabela de informações gerais das estações fluviométricas estão apresentados o período de medidas pontuais (mensal) das vazões líquida e sólida. Fonte: Usos do solo (MAPBIOMAS, 2020).

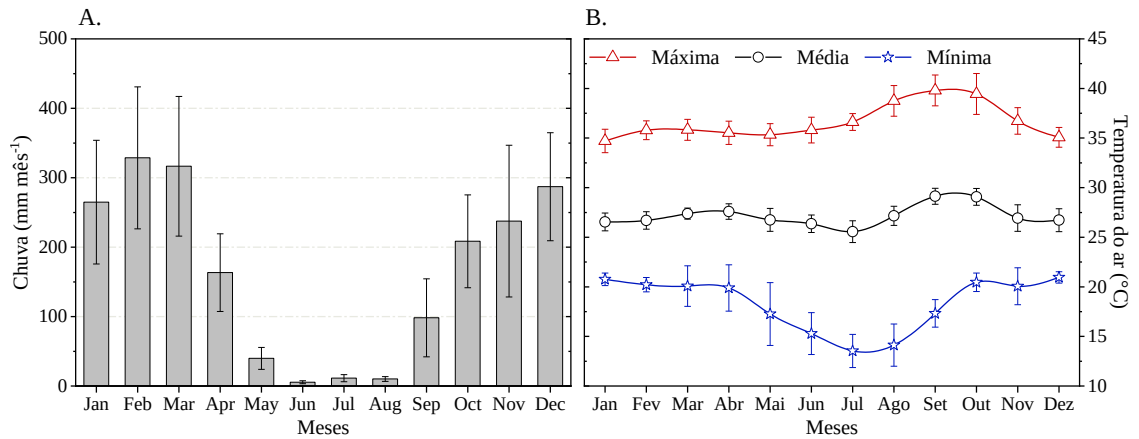


Figura 41. Médias mensais e desvio-padrão da chuva (A) e temperatura do ar (B), na região sul da Amazônia, na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, Mato Grosso, Brasil.
Fonte: Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO, 2022).

Características fisiográficas

Para obtenção das características fisiográficas foi utilizado como base de dados o Modelo Digital de Elevação – MDE baseado em dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 90 x 90 metros. Os dados vetoriais foram obtidos junto a base cartográfica do IBGE (2019) em escala de 1:250.000. O processamento dos dados e a obtenção das variáveis morfométricas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato foram realizados no *software* QGIS 3.16.11.

A área de drenagem (A_d , em km²), perímetro (P , em km), e o comprimento axial (L_{axial} , em km), foram obtidos após a delimitação da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, sendo que, o comprimento do principal curso d'água (L_p , em km) e do seu talvegue ($L_{talvegue}$, em km), o comprimento total da rede de drenagem (L_{total} , em km) e o número de cursos d'água, foram obtidos após extração da rede de drenagem da sub-bacia; e por fim, as amplitudes de altitude (em metros) e de declividade (em %) foram extraídas do MDE da sub-bacia.

A partir da obtenção das variáveis morfométricas supracitadas, foram calculados os indicadores fisiográficos fator de forma (K_f) (Equação 12), coeficiente de compacidade (K_c) (Equação 13), índice de circularidade (I_c) (Equação 14), sinuosidade (S) (Equação 15) e densidade de drenagem (D_d , em km km⁻²) (Equação 16), conforme Wenzel et al. (2017):

$$K_f = \frac{A_d}{L_{axial}^2} \quad (12)$$

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A_d}} \quad (13)$$

$$I_c = \frac{12,57 * A_d}{P^2} \quad (14)$$

$$S = \frac{L_p}{L_{talvegue}} \quad (15)$$

$$D_d = \frac{L_{total}}{A_d} \quad (16)$$

em que: K_f é o fator de forma (adimensional); A_d é a área de drenagem (km^2); L_{axial} é o comprimento axial da bacia (km); K_c é o coeficiente de compactidade (adimensional); P é o perímetro da bacia (km); I_c é o índice de circularidade (adimensional); S é a sinuosidade (adimensional); L_p é o comprimento do principal curso d'água (km), $L_{talvegue}$ é o comprimento do talvegue do principal curso d'água (km), D_d é a densidade de drenagem (km km^{-2}); L_{total} é o comprimento de todos os cursos de água da bacia (km).

Os índices K_f , K_c , I_c e S são adimensionais e variam de acordo com a forma da bacia hidrográfica. O K_f pode ser classificado como: de 1,00 a 0,75; de 0,75 a 0,50; e $\leq 0,5$, que representam alta, mediana e baixa probabilidade (susceptibilidade) a grandes enchentes, respectivamente. O K_c varia da seguinte forma: $1,00 \leq K_c < 1,25$; $1,25 \leq K_c < 1,50$ e $K_c \geq 1,50$, representando alta, mediana e baixa probabilidade a grandes enchentes, respectivamente. Por sua vez, o índice de circularidade apresenta a seguinte variação: $I_c \geq 0,51$ e $I_c < 0,51$, indicando que a bacia é circular ou alongada, respectivamente. A D_d indica que a bacia pode apresentar uma drenagem pobre ($D_d < 0,5 \text{ km km}^{-2}$), regular ($0,5 \leq D_d < 1,5 \text{ km km}^{-2}$), boa ($1,5 \leq D_d < 2,5 \text{ km km}^{-2}$), muito boa ($2,5 \leq D_d < 3,5 \text{ km km}^{-2}$) e excepcionalmente bem drenadas ($D_d \geq 3,5 \text{ km km}^{-2}$) (MELLO, 2013; SANTOS et al., 2019).

Seções fluviométricas de monitoramento

A definição de estações fluviométricas 1 e 2 (seções transversais) da sub-bacia hidrográfica do rio Renato (Figura 42) para o monitoramento hidrológico e sedimentológico

foi realizada buscando seguir os critérios descritos por Santos et al. (2001) como: facilidade de acesso e logística, local livre de ações antrópicas, trecho com velocidades bem distribuídas, leito e margem estáveis, bem definidos e livres de vegetação, rochas e outros obstáculos, trecho retilíneo com margens paralelas, perfil longitudinal regular e livres de remansos e local distante das confluências, local com condições adequadas para instalação, manutenção e operação dos equipamentos.

As estações fluviométricas foram instrumentalizadas com lances de réguas linimétricas com escala numérica de 0,02 m e sensor de nível com sistema de boia e contrapeso. Esse sensor fornece medição da variação do nível d'água de forma contínua, em intervalos de 10 minutos, convertendo pulsos mecânicos em sinais elétricos, que são interpretados por um registrador de dados externo (controlador lógico programável). Esses equipamentos foram instalados às margens de cada seção transversal seguindo as recomendações da ANA (2021).

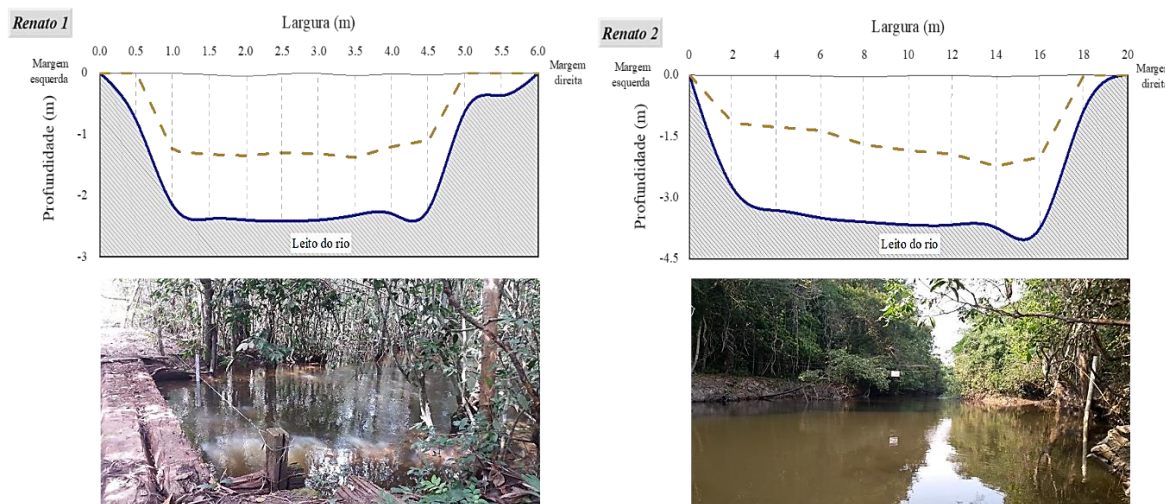


Figura 42. Perfis transversais das seções hidrológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, demonstrando a largura, profundidade, distância entre verticais e o número de verticais de cada seção transversal no período seco (linha tracejada marrom) e chuvoso (linha contínua azul).

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2001).

Medidas de vazão para estabelecimento da curva-chave líquida

As seções transversais de monitoramento foram demarcadas com uma corda graduada fixada entre as margens do canal, e então dividida em subseções, representadas por verticais fixas, posicionadas longitudinalmente ao longo da seção. A distância entre verticais e o

número de verticais foram definidas conforme a largura de cada seção transversal (Tabela 2), enquanto que a posição e número de pontos de leitura, foram determinados a partir da medida de profundidade de cada vertical (Tabela 3), conforme os critérios estabelecidos por Santos et al. (2001). A posição e número de verticais e de pontos de medidas podem variar conforme a estação hídrica do ano, sendo necessário medir a largura e profundidade das seções transversais fluviométricas a cada campanha de campo (Figura 42).

As medições de vazão líquida na seção transversal 1 do rio Renato com profundidade das verticais inferiores a 2,50 m foram realizadas a vau, com auxílio de haste metálica graduada com escala numérica de 0,01 m, sendo a referência o leito do rio (obtendo-se H – altura da coluna de água sobre o ponto) (Figura 2). Na seção transversal 2 do rio Renato com profundidade das verticais maiores que 2,50 m foi utilizado um guincho fluviométrico completo (modelo *GFL-25*) e um lastro fluviométrico (modelo *LAS-15*) da fabricante JCTM Negócios e Tecnologia Ltda., instalados em um barco de alumínio e um motor de 15hpa. Nesse método, a referência é a superfície da água, e utiliza-se um odômetro analógico, que deve ser zerado com o eixo central do molinete hidrométrico nivelado com a superfície da água, e, na sequência, submerso até o leito do rio para obtenção de P (profundidade) da vertical (Figura 3).

As medidas de vazão líquida foram realizadas pela medição direta com molinete hidrométrico da fabricante *JCTM Ltda*, modelo *MLN-7*, associado a um contador de giros eletrônico, conectados entre si. Nesse caso, a hélice de metal gira no sentido contrário do fluxo sob ação do movimento da água do rio e envia sinais elétricos ao contador de giros, que relaciona o número de rotação por segundo com a velocidade do escoamento.

Durante as medidas, o equipamento foi posicionado com a hélice disposta contra a direção de fluxo da água e realizadas três leituras do número de rotações, pelo tempo de 40 s por leitura, considerando um desvio padrão $\leq 10\%$, em cada posição de cada vertical da seção transversal, da margem esquerda para a margem direita. Para obtenção da velocidade média em cada vertical, as rotações foram convertidas em velocidades por meio da equação linear estabelecida pelo fabricante (Tabela 4). O tempo de 40 s por leitura foi definido como suficiente para as condições médias de fluxo regular em todas as seções avaliadas conforme recomendado por Santos et al. (2001).

A área molhada de influência das seções transversais foi calculada por meio do método numérico da meia seção ou subseção (Figura 14), que consiste em calcular as vazões

parciais de cada subseção fazendo a multiplicação da velocidade média da vertical pela área do segmento trapezoidal, definido pelo produto da profundidade média pela soma das semi-distâncias às verticais adjacentes (SANTOS et al., 2001). Nesse método as áreas junto às margens são desconsideradas (Equação 1 – Capítulo I). A vazão líquida total para cada seção transversal foi determinada pelo somatório do produto da velocidade e área molhada de cada subseção (Equação 2 – Capítulo I).

Amostragem de sedimentos para estabelecimento da curva-chave sólida

O método de amostragem do igual incremento de largura – IIL (CARVALHO, 2008) foi adotado para a coleta de sedimentos em suspensão nas duas seções transversais de monitoramento. Nesse caso, as seções transversais foram divididas em segmentos ou subseções ou verticais em igual largura, permitindo a obtenção de amostras de água e sedimentos em suspensão em cada subseção ou vertical (Figura 28). Esse método foi escolhido com base no conhecimento prévio da distribuição de velocidade e vazão líquida de cada seção transversal, e ainda, por ser um método recomendado por simplificar a metodologia em campo e análise dos resultados (CARVALHO, 2008; SIMIONI et al., 2021; PEIXOTO et al., 2021).

Na aplicação do método IIL empregou-se a medição indireta de sedimentos em suspensão com a amostragem por integração na vertical. Essa metodologia consiste em obter uma amostra de água mais sedimentos em suspensão, ao longo da vertical, com uma velocidade de trânsito uniforme. Nesse caso, os equipamentos utilizados foram os amostradores de sedimentos em suspensão modelos *US DH-48* (Figura 29) e *US D-49* (Figura 30) da fabricante *JCTM Ltda.*, ambos amostradores apresentam bicos de diâmetros 1/8”, 3/16” e 1/4” e zona não-amostrada de 0,09 e 0,10 m, respectivamente.

A escolha do bico dos amostradores dependia da velocidade de trânsito, que era definida pelo tempo de subida e descida do equipamento na amostragem por integração na vertical. Então, foram realizados testes de eficiência de coleta da amostra com os três bicos supracitados, considerando a descida e subida na vertical padrão (vertical com o maior produto da profundidade pela velocidade), utilizando a relação 1: $V_t / V_m = 0,2$ para o bico de 1/8” e a relação 2: $V_t / V_m = 0,4$ para os bicos de 3/16” e 1/4”. O bico adequado era aquele que coletava o máximo de mistura água mais sedimentos em suspensão, variando de 3/4 a 4/5 do volume da garrafa de coleta, na vertical padrão.

Para manter a mesma velocidade de trânsito (semelhante a velocidade da água) na amostragem por integração numa seção transversal, o tempo de trânsito e o volume de amostra deve ser diferente em cada vertical (Figura 28). Assim sendo, calculava-se o tempo de trânsito para a vertical padrão, e posteriormente, para as demais verticais (Equações 6 e 7 – Capítulo II). Durante a amostragem, o bico do equipamento era mantido na horizontal, com a abertura contra o fluxo da água, e evitando contato com o leito do rio. Esses cuidados evitaram erros no volume de coleta e a contaminação da amostra por sedimento de arrasto.

Realizou-se a amostragem composta (seção), que consistiu na coleta de cerca de 1 L de volume da amostra (água e sedimentos) por vertical da seção transversal, essas amostras foram reunidas em uma única amostra (composta), com volume aproximado de 10 L (Figura 31). O volume de 10 L foi determinado com base na concentração de sedimento em suspensão esperada para a região, conforme recomendação da Organização Meteorológica Mundial (CARVALHO, 2008).

A amostragem de sedimentos de arrasto foi realizada pela medição direta a vau com haste utilizando o equipamento portátil modelo *US BLH-84* da versão *Helley Smith* (Figura 32). O equipamento era posicionado verticalmente em determinados pontos do leito na seção transversal por 30 minutos e a abertura era posicionada na direção do fluxo da água. Esse amostrador apresenta eficiência de amostragem próxima de 100 % para areia e pedregulho, pois permite coletar sedimentos de arrasto entre 0,062 e 16 mm, através de uma saca de náilon com malha de 0,2 mm (CARVALHO, 2008).

As amostras de sedimentos de arrasto foram coletadas em posição de igual incremento de largura, em no mínimo quatro verticais, escolhidas em posição alternada e distribuídas ao longo de cada seção transversal de acordo com as características hidrodinâmicas, sempre evitando verticais de fluxo estático/água parada. Para evitar a perda de sedimentos, as amostras foram transferidas para frascos de plásticos, lavando a saca com água destilada, sendo os recipientes identificados com o nome da seção de monitoramento, data, tipo de amostragem, número da vertical e tempo de coleta, para posterior processamento das amostras (água e sedimentos de arrasto) em laboratório.

A concentração média de sedimentos em suspensão por seção transversal (amostra composta) foi obtida pela filtração em sistema de polisulfona à vácuo, com membranas porosas de 0,45 μm e capacidade de 0,5 L por filtragem (Figura 33). Esse método foi

escolhido devido à baixa concentração de sedimentos encontrada para os rios e córregos estudados.

Antes da filtração, as membranas foram seca à 105 °C por cerca de uma hora e transferidas para dessecador com sílica gel hermeticamente fechado, para pesagem. No início de cada filtragem, as amostras de sedimentos em suspensão eram homogeneizadas e filtradas. As membranas eram secas à 105 °C até a obtenção da massa constante, sendo posteriormente mantidas no dessecador para evitar troca de umidade e obter a massa do conjunto membrana com sedimentos secos. A concentração média de sedimentos em suspensão por seção foi calculada pela Equação 8 – Capítulo II.

As amostras de água com sedimento de arrasto de cada seção de monitoramento foram reunidas e transferidas para recipientes de metal, com posterior separação do material orgânico antes e após secagem em estufa à 105 °C até obter massa constante ou total evaporação da água. As etapas de secagem e pesagem dos sedimentos em suspensão e de arrasto foram executadas com estufa de circulação de ar forçada e balança digital de precisão 0,0001g, respectivamente (Figura 34).

A vazão sólida total foi calculada pela soma da vazão sólida em suspensão amostrada por seção transversal com a vazão sólida de arrasto (Equação 9 – Capítulo II). A vazão sólida de arrasto foi calculada pela Equação 10 – Capítulo II; a vazão sólida em suspensão foi calculada pela Equação 11 – Capítulo II.

Curvas-chave líquidas e sólidas

No total computou-se 28 (estação fluviométrica 1) e 21 (estação fluviométrica 2) medições de vazão líquida e nível d'água e 16 amostragens de vazões sólidas em suspensão e de arrasto para cada estação fluviométrica em escala mensal entre 2019 e 2022. As curvas-chave líquida e sólida foram ajustadas para cada seção transversal testando diferentes modelos matemáticos de regressão (linear, polinomial, potencial e exponencial) (Tabela 11). Para ajuste da curva-chave líquida foi relacionado as medidas instantâneas da vazão líquida com as leituras de nível d'água obtidas pelas réguas linimétricas, enquanto para ajustar as curvas-chave sólidas foram relacionadas as vazões sólidas em suspensão e total com a vazão líquida, de cada seção hidrológica.

Tabela 11. Modelos de regressão utilizados para ajustar as curvas-chave de vazões líquida e sólida para as seções hidrológicas 1 e 2 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluentes do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Regressão	Equação
Linear	$y = a + b * x$
Polinomial	$y = a + b * x + c * x^2$
Potencial I	$y = a * x^b$
Potencial II	$y = a + b * x^c$
Potencial III	$y = a * (x - b)^c$
Potencial IV	$y = (a + b * x)^{(-1/c)}$
Potencial V	$y = y_o + a * x - x_o ^b$
Potencial VI	$y = a * x - x_o ^b$
Potencial VII	$y = a * (1 + x)^b$
Exponencial I	$y = a * (1 - \exp^{(-b*x)})$
Exponencial II	$y = a * (1 - b^x)$
Exponencial III	$y = \exp^{(a+b*x)}$
Exponencial IV	$y = \exp^{(a+b*x+c*x^2)}$
Exponencial V	$y = y_o + a * \exp^{(x-x_o)/b}$

Observação: As equações destacadas em cor vermelha foram consideradas como referência para comparativo com os demais modelos de regressão.

Na avaliação do desempenho dos modelos ajustados foram empregados os indicadores estatísticos MBE - erro relativo médio (Equação 3 – Capítulo I); o RMSE - raiz quadrática do erro relativo médio (Equação 4 – Capítulo I); e o dw - índice de concordância de Willmott (Equação 5 – Capítulo I) conforme Souza et al. (2017); o NSE - eficiência de Nash-Sutcliffe (Equação 17) conforme Lopes et al. (2021) e Berihun et al. (2022) e o teste t de Student de comparação de duas amostras pareadas (Equação 18).

O MBE calcula a média dos desvios médios entre os valores observados e estimados (predição do modelo), o RMSE fornece a diferença quadrática entre os valores observados e estimados e o dw é um coeficiente que indica quanto os valores estimados pelo modelo se afastam da média observada. Ele tem intervalo variando entre 0 e 1, sendo que dw = 1 representa o completo ajustamento entre estimativa e observação, e 0 indica o oposto. O NSE é um coeficiente estatístico normalizado que determina a relação da magnitude da variância residual quando comparada com a variação dos dados medidos, seu valor pode variar de $-\infty$ a 1, onde 1 indica ajuste perfeito do modelo, $NSE > 0,75$ indica desempenho muito bom, $0,65 < NS \leq 0,75$ indica bom desempenho, $0,50 < NS \leq 0,65$ indica desempenho satisfatório, e $NS \leq 0,50$ desempenho insatisfatório (MORIASI et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

$$t = \frac{\bar{O}_i - \bar{P}_i}{\sqrt{\left(\frac{SD_{O_i}^2}{n}\right) + \left(\frac{SD_{P_i}^2}{n}\right)}} \quad (18)$$

em que: n - número de observações; P_i - valores estimados; O_i - valores observados; $\bar{P}_i$ - média dos valores estimados; $\bar{O}_i$ - média dos valores observados; SD - desvio padrão.

Resultados

A área de drenagem do rio Renato é considerada como uma sub-bacia hidrográfica do rio Teles Pires, de ordem 4 (IBGE, 2021). A sub-bacia do rio Renato apresenta densidade de drenagem regular, com forma alongada e com baixa probabilidade de ocorrência de inundações/enchentes. O relevo é plano a fortemente ondulado, sendo que a declividade do curso d'água principal entre a nascente e o exutório é de 0,12% (Tabela 12).

Tabela 12. Características fisiográficas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluyente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Características fisiográficas	
Área de drenagem (km ²)	1.336,48
Perímetro (km)	283,38
Comprimento axial (km)	83,6
Comprimento do curso d'água principal (km)	94,6
Comprimento do talvegue do curso d'água principal (km)	63,49
Comprimento total dos cursos d'água (km)	674,37
Fator de forma - K_f	0,19
Coeficiente de compacidade - K_c	2,17
Índice de circularidade - I_c	0,21
Sinuosidade - S	1,49
Densidade de drenagem (km km ⁻²)	0,505
Amplitude da Altitude (m)	273 a 524
Amplitude da Declividade (%)	0 a 30
Declividade do curso d'água principal até a seção 1 (%)	0,04
Declividade do curso d'água principal até a seção 2 (%)	0,11
Ordem da sub-bacia	4
Número total de cursos d'água	138

As seções transversais do rio Renato apresentaram leito e margens estáveis, de formato trapezoidal, com fluxo contínuo e unidirecional e com flutuações sazonais das

variáveis hidráulicas (Tabela 13). O número de verticais oscilou entre 8 a 11 (seção transversal 1) e 8 a 9 (seção transversal 2) entre o período seco e chuvoso, respectivamente, conforme a largura de cada seção e a distância entre verticais (SANTOS et al., 2001). A seção hidrológica 2 do rio Renato apresentou proporcionalmente cerca de 12 vezes mais do volume de água escoado pelo canal principal e da vazão sólida em suspensão quando comparado com a seção hidrológica 1, sendo que nesse caso, ressalta-se que a seção 2 apresenta área de drenagem 9,3 vezes superior à seção 1 (Tabela 13).

Tabela 13. Características hidráulicas das seções hidrológicas 1 e 2 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Variáveis		Renato 1	Renato 2
Largura (m)	$L_{\text{máx}}$	6,00	22,00
	$L_{\text{méd}}$	4,87	18,91
	$L_{\text{mín}}$	4,20	17,80
Profundidade (m)	$P_{\text{máx}}$	2,40	3,74
	$P_{\text{méd}}$	1,41	2,15
	$P_{\text{mín}}$	1,10	1,18
Velocidade da água (m s ⁻¹)	$V_{\text{máx}}$	0,26	0,47
	$V_{\text{méd}}$	0,18	0,36
	$V_{\text{mín}}$	0,10	0,24
Área molhada (m ²)	$A_{\text{máx}}$	9,73	55,77
	$A_{\text{méd}}$	6,92	40,90
	$A_{\text{mín}}$	5,04	26,53
Vazão líquida (m ³ s ⁻¹)	$Q_{L\text{máx}}$	2,76	32,31
	$Q_{L\text{méd}}$	1,52	18,07
	$Q_{L\text{mín}}$	0,54	6,65
Concentração de sedimentos em suspensão (mg L ⁻¹)	$C_{\text{ssmáx}}$	7,13	8,96
	$C_{\text{ssméd}}$	4,60	4,38
	$C_{\text{ssmín}}$	2,32	2,09
Vazão sólida em suspensão (t d ⁻¹)	$Q_{\text{ssmáx}}$	1,3327	10,5361
	$Q_{\text{ssméd}}$	0,5560	6,1187
	$Q_{\text{ssmín}}$	0,1584	2,5170
Vazão sólida de arrasto (t d ⁻¹)	$Q_{\text{samáx}}$	0,0174	0,3574
	$Q_{\text{saméd}}$	0,0036	0,4140
	$Q_{\text{samín}}$	0,0045	0,0306
Vazão sólida total (t d ⁻¹)	$Q_{\text{stmáx}}$	1,3501	10,8935
	$Q_{\text{stméd}}$	0,5597	6,5327
	$Q_{\text{stmín}}$	0,1629	2,5476

em que: máx – valor máximo de uma única medição obtido na estação chuvosa; mín – valor mínimo de uma única medição obtido na estação seca; méd – valor médio de todas as medições ao longo do período. * Período de avaliação entre 05/2019 e 11/2022.

Para a seção hidrológica 1 do rio Renato, independentemente do modelo de regressão avaliado (linear, polinomial, potencial e exponencial), os indicadores de desempenho estatístico apresentaram desempenho satisfatório para a curvas-chave líquida ajustadas, com pequena subestimativa e desvios médios reduzidos, resultando em valores estimados próximos aos observados em campo (Tabela 14). Dessa forma, o modelo potencial, que tradicionalmente é utilizado para a definição de curvas-chave líquida de rios, não diferiu estatisticamente das demais variações do modelo potencial e das demais regressões não potenciais (Tabela 14 e Figura 43).

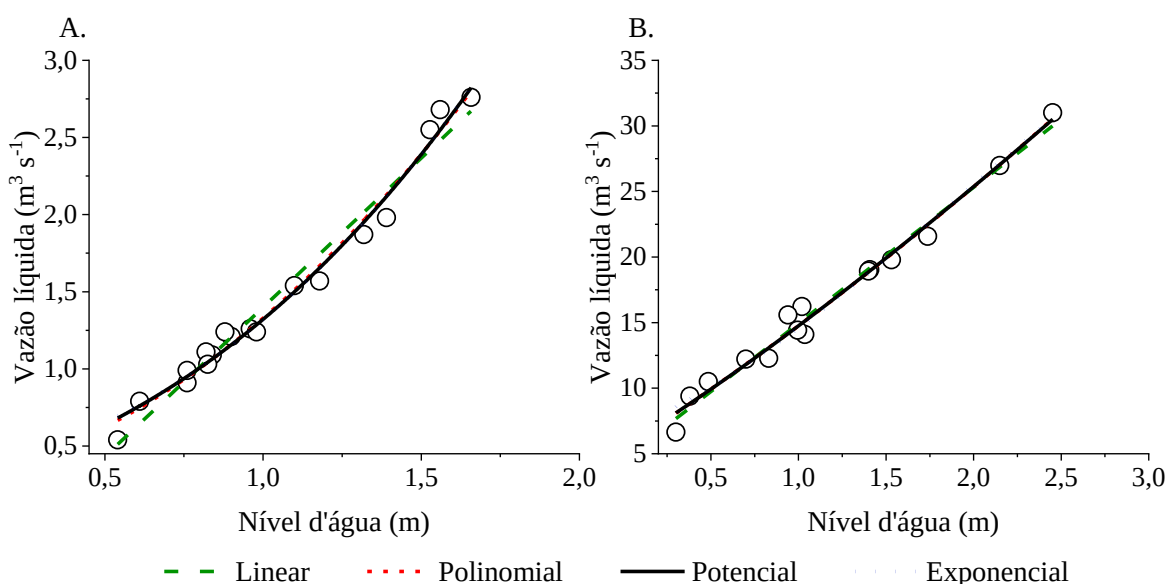


Figura 43. Curvas-chave de vazão líquida ajustadas para as seções hidrológicas 1 (A) e 2 (B) da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

* Período de avaliação entre 05/2019 e 11/2022.

Já para as curvas-chave sólidas, os modelos de regressão avaliados apresentaram desempenhos estatísticos insatisfatórios, com NSE negativos, índices de concordância (dw) baixos, superestimativas dos desvios médios próximos aos valores mínimos de descarga sólida amostrados durante o período avaliado (Tabela 14). Esses resultados podem ser justificados pelo baixo número de amostragem de sedimentos e pela influência de outros fatores na dinâmica hidrossedimentológica dessas seções transversais, como alteração temporal e espacial do uso da terra, distribuição temporal e espacial de chuvas intensas e dentre outros.

Para a vazão líquida o MBE indicou subestimativa média de $0,1257 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, o índice de ajustamento de Willmott foi superior a 0,8984 e o NSE variou de 0,59 a 0,61 entre os

modelos de regressão. Para as vazões sólidas em suspensão e total o MBE indicou superestimativa média de 0,1610 t d⁻¹ e grande espalhamento, o dw foi em média 0,6296 para Q_{ss} e 0,6239 para Q_{st}, a eficiência de Nash-Sutcliffe resultou em valores negativos, indicando desempenho insatisfatório dos modelos testados, em contrapartida, não houve diferença significativa pelo teste t entre os valores observados e estimados pelas equações (Tabela 14).

Tabela 14. Coeficientes de modelos matemáticos de regressão utilizados para ajustar as curvas-chave de vazões líquida e sólidas da seção hidrológica 1 da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil.

Modelo	a	b	c	y ₀	x ₀	R ²	MBE	RMSE	dw	NSE	t
Vazão líquida											
Linear	-0,53492	1,93429				0,9724	-0,1126	0,3587	0,8984	0,59	0,4176
Polinomial	0,27267	0,344	0,71251			0,9842	-0,1244	0,3505	0,9003	0,61	0,4702
Potencial I	1,36031	1,38958				0,9806	-0,1199	0,3565	0,8995	0,59	0,4461
Potencial II	0,37184	0,95397	1,85182			0,9839	-0,1245	0,3504	0,9003	0,61	0,4711
Potencial III	0,07355	-1,46205	3,20581			0,9847	-0,1273	0,3495	0,9002	0,61	0,4835
Potencial IV	0,647755	0,44304	-0,31193			0,9847	-0,1274	0,3495	0,9002	0,61	0,4836
Potencial V	0,01544	3,80079		-0,20175	-2,34871	0,9849	-0,1278	0,3502	0,9001	0,61	0,4846
Potencial VI	0,07355	3,20581			-1,46205	0,9847	-0,1273	0,3495	0,9002	0,61	0,4763
Potencial VII	0,21312	2,63852				0,9846	-0,1259	0,3503	0,9003	0,61	0,4763
Exponencial I	-1,5686	-0,61728				0,9844	-0,1256	0,3531	0,9000	0,60	0,4717
Exponencial II	-1,5686	1,85388				0,9844	-0,1256	0,3531	0,9000	0,60	0,4716
Exponencial III	-0,95166	1,21239				0,9826	-0,1351	0,3469	0,8988	0,61	0,5222
Exponencial IV	-1,21854	1,69189	-0,19888			0,9844	-0,1278	0,3491	0,9001	0,61	0,4864
Exponencial V	0,94852	1,21307		-0,75875	0,0454	0,9852	-0,1281	0,3497	0,9002	0,61	0,4863
	Média geral					0,9833	-0,1257	0,3512	0,8999	0,60	0,4748
	Desvio padrão geral					0,0034	0,0050	0,0032	0,006	0,01	0,0231
Vazão sólida em suspensão											
Linear	-0,1335	0,53934				0,9714	0,1595	0,3289	0,6338	-1,48	-0,8557
Polinomial	-0,11866	0,5182	0,0064			0,9715	0,1600	0,3301	0,6320	-1,49	-0,8571
Potencial	0,5126	1,04024			0,20199	0,9716	0,1600	0,3307	0,6314	-1,50	-0,8559
Exponencial	-2,55485	1,93163	-0,32589			0,9740	0,1608	0,3458	0,6214	-1,74	-0,8310
	Média geral					0,9721	0,1601	0,3339	0,6296	-1,55	-0,8499
	Desvio padrão geral					0,0013	0,0006	0,0080	0,0056	0,12	0,0126
Vazão sólida total											
Linear	-0,13751	0,54554				0,9725	0,1620	0,3339	0,6273	-1,57	-0,8628
Polinomial	-0,11	0,50635	0,01186			0,9727	0,1630	0,3361	0,6240	-1,60	-0,8654
Potencial	0,50272	1,0642			0,17936	0,9728	0,1629	0,3368	0,6236	-1,61	-0,8634
Exponencial	-2,52918	1,90578	-0,31814			0,9750	0,1589	0,3453	0,6206	-1,75	-0,8226
	Média geral					0,9732	0,1617	0,3380	0,6239	-1,63	-0,8536
	Desvio padrão geral					0,0012	0,0019	0,0050	0,0027	0,08	0,0207

em que: a, b, c, y₀ e x₀ – são coeficientes ajustados pelos modelos de regressão; R² – coeficiente de correlação; MBE - erro relativo médio; RMSE - raiz quadrática do erro relativo médio; dw - índice de concordância de Willmott; NSE - eficiência de Nash-Sutcliffe; t - teste t de Student. Observação: as equações destacadas em cor vermelha foram consideradas como referência para comparativo com os demais modelos de regressão e também empregadas para obtenção dos modelos para as vazões sólidas.

Linear	1,27477	0,21022		0,9479	-2,3057	3,2929	0,5154	-0,96	2,4659	
Polinomial	1,94755	0,12554	0,00216	0,9535	-2,3798	3,3675	0,5036	-1,05	2,5593	
Potencial	0,00106	2,1381		-33,6914	0,9535	-2,3999	3,3815	0,5029	-1,06	2,5838
Exponencial	0,74642	0,05166	-0,00029	0,9531	-2,3960	3,3846	0,5006	-1,07	2,5812	
Média geral				0,9520	-2,3703	3,3566	0,5056	-1,03	2,5476	
Desvio padrão geral				0,0027	0,0440	0,0431	0,0066	0,052	0,0555	
Vazão sólida total										
Linear	1,08427	0,238		0,9297	-2,5431	3,4159	0,5492	-0,92	2,5536	
Polinomial	2,04131	0,11755	0,00307	0,9382	-2,6492	3,5268	0,5321	-1,05	2,6813	
Potencial	0,000473	2,34215		-34,992	0,9384	-2,6436	3,5205	0,5332	-1,04	2,6747
Exponencial	0,77582	0,05133	-0,00022	0,9383	-2,9060	3,7089	0,5194	-1,27	3,0226	
Média geral				0,9362	-2,6855	3,5430	0,5335	-1,07	2,7330	
Desvio padrão geral				0,0043	0,1549	0,1217	0,0122	0,14	0,2018	

em que: a, b, c, y_0 e x_0 – são coeficientes ajustados pelos modelos de regressão; R^2 – coeficiente de correlação; MBE - erro relativo médio; RMSE - raiz quadrática do erro relativo médio; dw - índice de concordância de Willmott; NSE - eficiência de Nash-Sutcliffe; t - teste t de Student. Observação: as equações destacadas em cor vermelha foram consideradas como referência para comparativo com os demais modelos de regressão e também empregadas para obtenção dos modelos para as vazões sólidas.

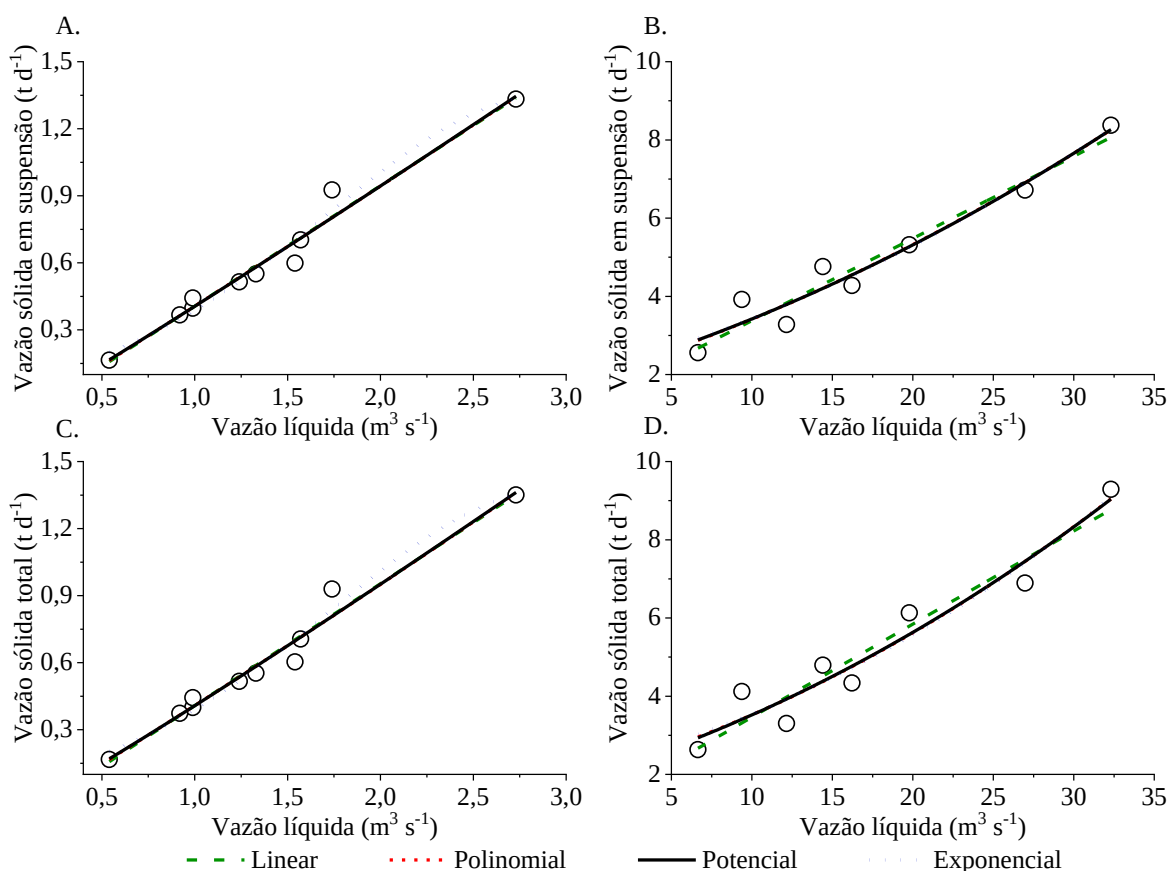


Figura 44. Curvas-chave de vazões sólida em suspensão e total ajustadas para as seções hidrológicas 1 (A e C) e 2 (B e D) da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, afluente do rio Teles Pires, Mato Grosso, Brasil. * Período de avaliação entre 05/2019 e 11/2022.

As seções hidrológicas do rio Renato apresentaram variações sazonais na vazão e velocidade do fluxo de escoamento superficial (Tabela 13 e Figura 45 e Figura 46), com picos de máxima na seção 1 ($4,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e seção 2 ($38,54 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e na transição chuva-seca com ponto de mínima na seção 1 ($0,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e seção 2 ($8,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) entre agosto e outubro (transição seca-chuva) (Figura 45 e Figura 46). Ocorreram dinâmicas semelhantes entre as vazões líquida e sólida, visto que os picos das vazões sólidas em suspensão e total acompanharam os picos das vazões líquidas durante o período avaliado. Na estação chuvosa, evidencia-se o aumento do escoamento superficial e das vazões sólidas com o incremento da área de drenagem.

Os sedimentos de arrasto apresentaram pequena variação durante o período avaliado para a seção hidrológica 1 (Tabela 13 e Figura 45), diferentemente do observado na seção hidrológica 2, na qual foi observada maior produção de sedimentos de arrasto, com variações de $0,0273$ a $1,3835 \text{ t d}^{-1}$ entre as estações seca e chuvosa da região (Tabela 13 e Figura 46).

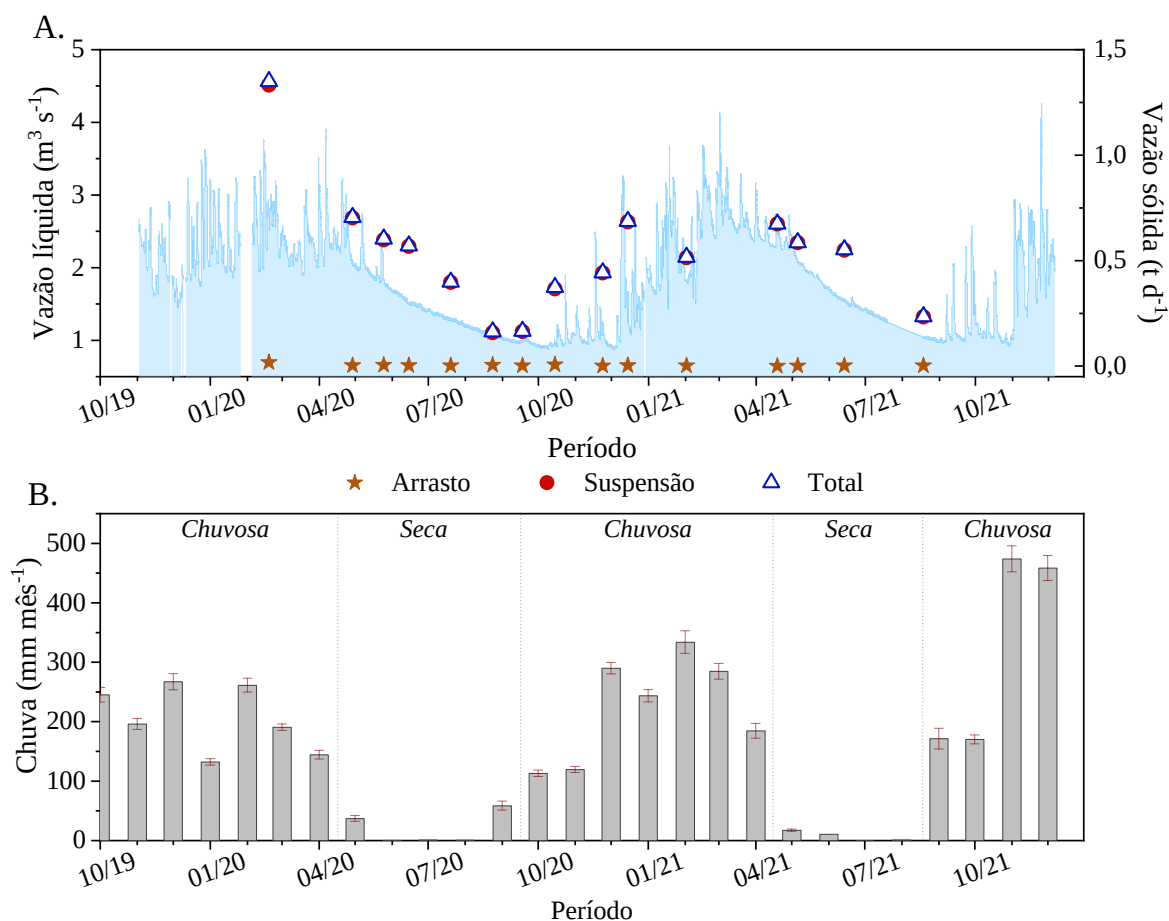


Figura 45. Vazão líquida (A) calculada pelo ajuste da curva-chave $y = a * |x - x_0|^b$ entre 2019 e 2021, vazão sólida em suspensão, de arrasto e total (A) amostradas mensalmente entre

2020 e 2021 e chuva (B) na seção hidrológica 1, na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, Mato Grosso, Brasil.

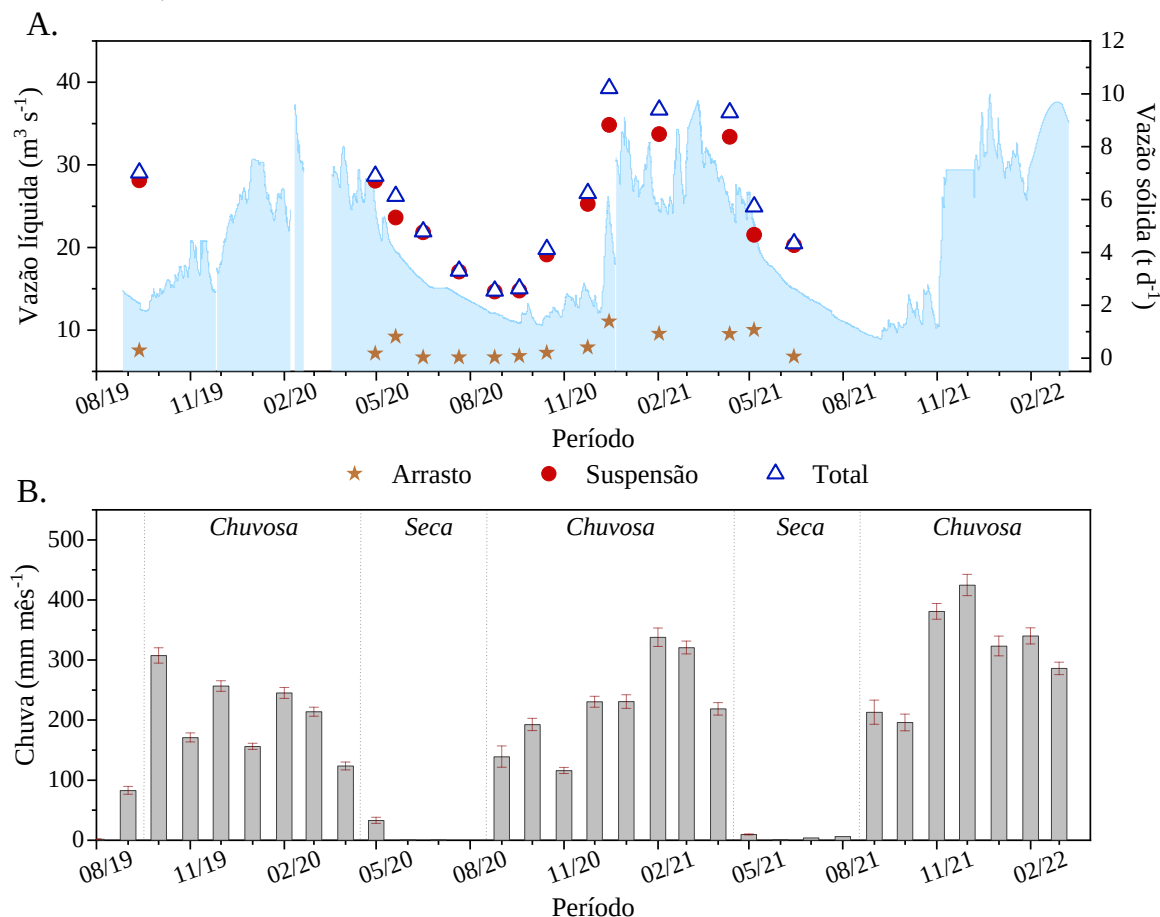


Figura 46. Vazão líquida (A) calculada pelo ajuste da curva-chave $y = a * |x - x_0|^b$ entre 2019 e 2022, vazão sólida em suspensão, de arrasto e total (A) amostradas mensalmente entre 2020 e 2021 e chuva (B) na seção hidrológica 2, na sub-bacia hidrográfica do rio Renato, Mato Grosso, Brasil.

Discussão

O rio Renato é um curso d'água natural e perene, com fluxo de escoamento superficial contínuo ao longo do ano, baixas variações no volume de água escoado e no transporte de sedimentos entre as estações hídricas regional. No período avaliado, observou-se um retardamento entre os períodos de vazão líquida máxima (dezembro a maio) e mínima (junho a novembro), com maiores defasagens com o aumento da área de drenagem (Figura 45Figura 46). O período chuvoso, que se inicia no terceiro decêndio de setembro, é responsável pela recarga subterrânea e superficial de água nessa bacia hidrográfica, contudo, a velocidade dessa recarga é dependente da demanda hídrica (evapotranspiração) da superfície, da quantidade de água precipitada (ANDRADE et al., 2018; RODRIGUES et al.,

2020), do tamanho da área de drenagem, do formato, da declividade, da densidade de drenagem (WENZEL et al., 2017; SANTOS et al., 2019), do tipo de solo, da cobertura e das práticas de manejo da bacia hidrográfica (SOUZA et al., 2019; PEIXOTO et al., 2020).

A sub-bacia hidrográfica do rio Renato é pouco susceptível à inundação/enchente durante o período chuvoso devido ao seu formato alongado e densidade de drenagem regular (Tabela 12), que permitem um maior tempo de concentração e boa capacidade de escoamento superficial ao longo do curso d'água principal até o exutório da bacia. O dreno principal é mais sinuoso à medida que se aproxima da foz, isso ocorre porque a sinuosidade do canal depende da topografia/relevo do solo da bacia e na região próximo ao exutório do rio Renato o relevo é mais ondulado.

O relevo varia de plano (0 %) com maior ocorrência na região da nascente e média da sub-bacia a fortemente ondulado (30 %) em alguns pontos na região próximo à foz do rio Renato, nesses locais com maior declividade a vegetação nativa ainda está conservada. A declividade da bacia hidrográfica influencia na velocidade de escoamento da água sobre o solo e afeta a capacidade de armazenamento (WENZEL et al., 2017; SANTOS et al., 2019), além disso, influencia no transporte de sedimentos das regiões mais altas para locais mais planos da bacia hidrográfica (PEIXOTO et al., 2020), e por isso é importante em estudos relacionados à erosão. Quanto maior a declividade da bacia associada à ausência de cobertura vegetal, ao tipo de solo, à intensidade de chuvas, entre outros fatores, menor será a capacidade de armazenamento superficial, o que amplia a susceptibilidade a enchentes, sujeitando a bacia à degradação (PEIXOTO et al., 2020; SOUZA et al., 2019).

Os modelos de regressão ajustados para a construção das curvas-chave líquida das seções hidrológicas do rio Renato apresentaram desempenho estatístico satisfatório (Tabela 14Tabela 15). Isso significa que, independentemente do modelo de regressão, para essas seções hidrológicas com baixas variações do nível d'água ao longo do ano, as estimativas da vazão líquida pelos tipos de modelos avaliados apresentarão bons ajustes. As possíveis diferenças entre os modelos se tornam marcantes à medida que se aumenta a variação de nível d'água entre vazões mínimas e máximas, podendo assim permitir que algumas das variações propostas pelos modelos sejam mais representativas do que o modelo potencial tradicional (Potencial VI – Tabela 11).

Essa condição supracitada pode ser melhor compreendida em seções fluviométricas com grande variação de nível, como no caso da bacia hidrográfica do rio Braco (Acre), na

qual Tamwing et al. (2022) avaliando seções fluviométricas com variações de nível superior a 20 metros entre vazões máximas e mínimas, encontraram curvas-chave líquidas expressas por equações do tipo potencial e polinomial com bons ajustes para um período de 20 anos. Nesse caso, ressalta-se que a formação de séries históricas de dados de vazão líquida e sólida permitem maior segurança estatística na curvas-chave ajustadas, contudo, os tipos de modelos de regressão mais representativos dependerão do comportamento hidráulico de cada seção avaliada.

A dinâmica da água e dos sedimentos em bacias hidrográficas pode ser compreendidos pelas características morfométrica (WENZEL et al., 2017; COSER: GRISON, 2019; SANTOS et al., 2019), vegetativas (MENDES et al., 2018; ANDRADE et al., 2018; SOUZA et al., 2019), edáficas (ALMEIDA et al., 2019; BERIHUN et al., 2022) e climáticas (SOUSA et al., 2020; LOPES et al., 2021).

A produção de sedimentos em bacias hidrográficas de acordo com a classificação descrita por Fonseca et al. (2022) varia de muito baixa ($<0,0027 \text{ t d}^{-1} \text{ km}^{-2}$) a extremamente alta ($>0,0548 \text{ t d}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Assim, a produção de sedimentos no rio Renato é considerada baixa, independentemente da estação hídrica do ano, sobretudo em função da elevada presença da vegetação natural, que está em torno de 69,0 % (Figura 40).

As vazões líquidas e sólidas das seções hidrológicas avaliadas no presente estudo variam pouco, visto que, são pequenas em áreas de drenagem. À medida que a área de drenagem aumenta, também ocorrem incrementos nas variações das características hidrológicas, e isso pode influenciar nos ajustes das curvas-chave, tornando-se necessário, avaliar outros modelos matemáticos que melhor representem a dinâmica hidrológica do curso d'água, além disso, é importante a verificação *in loco* das relações entre as vazões e o nível da água, posteriores ao estabelecimento dos coeficientes dos modelos ajustados.

Para as duas seções hidrológicas do rio Renato, as curvas-chave sólidas ajustadas pelos diferentes modelos de regressão apresentaram desempenho estatístico insatisfatório com $\text{NSE} < 0,50$, com grandes superestimativas e espalhamentos, apesar de alta correlação (R^2) entre vazões sólidas e líquidas (Tabela 14 Tabela 15). Isso se deve ao baixo número de amostragens de sedimentos para ambas seções hidrológicas do rio Renato. Dessa forma, ressaltamos a importância de continuar o monitoramento hidrossedimentológico, com foco principalmente na amostragem de sedimentos em suspensão, visto que os sedimentos de

arraso apresentam pequena variação ao longo do ano, independentemente da seção fluviométrica.

Estimativas das vazões sólidas com base na vazão líquida, para séries curtas de dados, tem apresentado bons ajustes e desempenhos estatísticos, como nos casos observados por Peixoto et al. (2020) para o rio Jordão (na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba – MG) com o modelo potencial (1 ano de dados), Simioni et al. (2021) para o rio Caiabi (em Vera – MT) com o modelo exponencial (2 anos de dados) e Sirqueira et al. (2022) para o rio Caiabi (seção fluviométrica com área de drenagem menor) com o modelo polinomial (1 ano de dados). O presente estudo, com pouco mais de um ano de dados, não apresentou ajustes com desempenho estatístico satisfatório para estimativas da vazão sólida em suspensão e total baseadas na vazão líquida, independentemente do modelo de regressão.

Conclusões

A sub-bacia hidrográfica do rio Renato apresenta formato alongado, relevo plano a fortemente ondulado, densidade de drenagem regular e o curso d'água principal é mais sinuoso à medida que se aproxima do exutório, com baixa susceptibilidade a enchentes.

Os modelos de regressão linear, polinomial, potencial e exponencial foram adequados para ajustar as curvas-chave líquida das seções hidrológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Renato, podendo ser ajustados para outras seções fluviométricas, que apresentem pequenas variações de nível entre vazões máximas e mínimas.

Para a sub-bacia hidrográfica do rio Renato, os modelos de regressão linear, polinomial, potencial e exponencial não apresentaram boas estimativas da vazão sólida em suspensão e total com restrição de dados, sendo necessário, a continuidade do monitoramento hidrossedimentológico para novos ajustes das curvas-chave sólidas, com amostragens principalmente dos sedimentos em suspensão, visto que os sedimentos de arrasto apresentam pequena variação ao longo do ano.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Código de Financiamento – 001 e Processo 88887.144957/2017-00. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio com as bolsas de iniciação

científica e bolsa produtividade (Processo 308784/2019-7). À 3ª Comarca de Justiça Cível de Sinop pelo apoio financeiro ao Projeto CBH Monitora e ao Comitê dos Afluentes da Margem Direita do Alto Teles Pires.

Referências

AGRITEMPO. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico: Estação Meteorológica. 2022. Disponível online: <https://www.agritempo.gov.br/>

[agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=MT](https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=MT) (acesso em 20 de outubro de 2022).

ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PEREIRA, F. A. C.; ROUWS, J. R. C. Produção de sedimentos e infiltração de água no solo sob diferentes características de chuva simulada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 23, n. 8, p. 572-578, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>.

ALVES, M. A. B.; BORELLA, D. R.; LUZ, C. C. da S.; CASTAGNA, D.; SILVA, W. C. da; SILVA, A. F. da; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de. Classes de solos nas bacias hidrográficas dos rios Caiabi e Renato, afluentes do rio Teles Pires, no sul da Amazônia. *Nativa*, v. 10, n. 3, p. 431-448, 2022. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i3.14192>

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Serviço Geológico do Brasil. Brasília: ANA, 2021. 118p.

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, R. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; FILHO, J. C. R. Respostas hidrológicas de uma bacia hidrográfica a mudanças na vegetação em uma região semiárida tropical. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 31, n. 1, p. 161-170, 2018.

ANDRIETTI, G.; FREIRE, R.; AMARAL, A. G.; ALMEIDA, F. T. de; BONGIOVANI, M. C.; SCHNEIDER, R. M. Índice de qualidade da água e índices de eutrofização do Rio Caiabi, MT. *Ambiente & Água*, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 162-175, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1769>

BERIHUN; M. L.; TSUNEKAWA; A.; HAREGEWEYN; N.; TSUBO; M.; FENTA; A. A.; EBABU; K.; SULTAN; D.; YIHUN TADDELE DILE; Y. T. Redução do escoamento e perda de sedimentos sob opções alternativas de uso e gestão da terra baseadas na capacidade da terra em uma bacia sub-úmida da Etiópia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 40, 100998, p.1-16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100998>

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**, 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.

COSER, E.; GRISON, F. Geometria hidráulica de um trecho de canal fluvial aplicando HEC-RAS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 4, p. 691-706, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1512>.

FONSECA, C. A. B. da; AL-ANSARI, N.; SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G.; ZEROUALI, B.; OLIVEIRA, D. B. de; ELBELTAGI, A. Investigando as relações entre os processos de escoamento superficial e erosão e o uso e cobertura da terra usando sensoriamento remoto com vários conjuntos de dados em grade. **International Journal of Geo-Information**, v.11, 272, p. 1-27, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi11050272>

GROPPO, J. D.; SALEMI, L. F.; MORAES, J. M.; TREVISAN, R.; MARTINELLI, L. A. Processos hidrológicos em uma sub-bacia do Parque Estadual da Serra do Mar, núcleo Santa Virgínia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 595-606, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831323>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estado do Mato Grosso: pedologia (Mapa exploratório de solos)**, 2009. 1p. Disponível em <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>> (acesso em 2022).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bases cartográficas contínuas [database]**, 2017. Disponível em <<https://downloads.ibge.gov.br/index.htm>> (acesso em 2022).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil**, 2021. 160p. Disponível em <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101854>> (acesso em 2022).

LEPESQUEUR, J.; HOSTACHE, R.; MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; MONTARGÈS-PELLETIER, E.; HISSLER, C. Modelagem do transporte de sedimentos em ambientes ribeirinhos: sobre a importância da distribuição granulométrica, densidade de sedimentos e concentrações de sedimentos em suspensão no limite a montante. **Hydrology and Earth System Science**, v. 23, p. 3901-3915, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-3901-2019>

KOOL, J.; LHERMITTE, S.; HRACHOWITZ, M.; BREGOLI, F.; MCCLAIN, M. E. Dinâmica de inundação sazonal e balanço hídrico do Pantanal de Mara, Tanzânia, com base na classificação de imagem multitemporal Sentinel-2. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 109, 102766, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102766>

KRAESKI, A.; ALMEIDA, F. T. de; CAARVALHO, T. M. de; SOUZA, A. P. de. Identificação de conflitos de uso da terra em Área de Preservação Permanente no Brasil sub-bacia Amazônica. **Sociedade e Natureza**, v. 35, e65951, p. 1-16, 2022. DOI: 10.14393/SN-v35-2023-65724

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; MINGOTI, R.; VENDRUSCULO, L. G.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; OLIVEIRA, R. F. de; PAULINO, J.; ULIANA, E. M. Regime hidrológico, disponibilidade de água e mudança de uso/cobertura da terra impacto no balanço hídrico em uma grande bacia agrícola no Sul Amazônia brasileira. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, 103224, p.1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>

MAPBIOMAS. “Projeto MapBiomas – **Mapeamento da superfície de água no Brasil: A** dinâmica da superfície de água do território brasileiro (Coleção 1), 2021. Disponível em < <https://mapbiomas.org/o-projeto> > (acesso em 2022).

MARINHO, R. R.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; MARTINEZ, J. M.; HARMEL, T. O Transporte de sedimento suspenso no Rio Negro (Bacia Amazônica) por meio de dados MSI/Sentinel-2. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, p. 1174-1190, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2076>

MELLO, C. R. de. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Editora UFLA, 2013. 455p.

MENDES, N. G. de S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Cobertura florestal e vazões de bacias hidrográficas da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 2, e420204, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000200004>

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., LIEW, VAN, W, M., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E. Estudo do transporte de sedimentos no Rio Jordão, localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro-MG. **Acta Scientiarum Technology**, v. 43, e51714, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v43i1.51714>

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E., NISHIMURA, A. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921-931, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180137>

RODRIGUES, A. L.; VILLA, P. M.; RODRIGUES, A. C.; MATA, R. A.; MARTORANO, L. C. Balanço hídrico de uma microbacia na mata atlântica: implicações para a gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 614-628, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145008421>

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LATERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba, Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.

SANTOS, L. L. dos; RIBEIRO, V. de O.; DIODATO, J. O. Morfometria das bacias hidrográficas inseridas na zona urbana de Dourados – MS. **Revista o Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 46, n. 3, p. 75-87, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v46i3.67039>

SIMIONI, C. F.; ALMEIDA, F. T. de; ZOLIN, C. A.; ULIANA, E. M.; SOUZA, A. P. de; MARQUE, A. Vazão sólida em microbacia da região amazônica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e73, p. 1-26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X64223>

SIRQUEIRA, E. S.; ALMEIDA, F. T. de; ARAÚJO, H. B.; ZOLIN, C. A.; CARVALHO, G. A.; PAULISTA, R. S. D.; SILVA, A. F. da; BORELLA, D. R. Vazão líquida, sedimentos em suspensão e turbidez na microbacia do rio Caiabi, no ecotóno Cerrado-Amazônia. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 525-532, 2022. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i4.13961>

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a07>

SOUZA, A. P. de; SILVA, A. C.; TANAKA, A. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; KLAR, A. E.; GOMES, A. W. A. Radiação global por modelos simplificados para o estado de Mato Grosso, Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 52, n. 4, p. 215-227, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000400001>

SOUZA, N. S.; SOUZA, W. de J.; CARDOSO, J. M. S. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 453-462, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017155279>

SOUSA, M. M. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; RIBEIRO FILHO, J. C.; MOURA, M. M. S. Características pluviométricas determinantes no transporte de sedimentos em microbacia com vegetação raleada no semiárido tropical. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, p. 785-793, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n322rc>

SOUZA, V. A. S.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MOREIRA, D. M.; RUDKE, A. P.; SÁ, M. R. T. Dinâmica do desmatamento na Amazônia e seus impactos na hidrologia: bacia do Rio Machadinho – Rondônia / Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1004-1018, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509835333>

SPERA, S. T.; MAGALHÃES, C. A. de S.; BALDONI, A. B.; CALDERANO, S. B. Caracterização pedológica de locais de estudo de populações naturais de castanheira-do-brasil no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 7, n. 2, p. 145-161, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i2.6502>

STINGHEN, C. M.; MANNICH, M. Panorama da gestão de bacias críticas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, e13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v19e13>

TAMWING, D. S.; MONTEFUSCO, C.; IRURETA, O. O. A.; MESQUITA, A. A.; SERRANO, R. O. P.; MOREIRA, J. G. V. Relação cota-vazão e ajuste da curva-chave: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Acre, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.1, p.129-140, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.001.0011>

ULIANA, E. M.; SOUZA, L. G. da S.; SILVA, D. D. da; SOUZA, A. P. de; ALMEIDA, F. T. de; ARAÚJO, H. B. Regionalização de vazões para o médio e alto Rio Teles Pires – MT.

Revista de Ciências Agrárias, v. 59, n. 4, p. 333-338, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2240>

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Avaliação da mudança da erosão do solo e suas relações com a mudança de uso/cobertura da terra na China do final da década de 1980 a 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

WENZEL, D. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P de; MENDES, M. A. dos S. A.; SOUZA, L. G. da S. Características fisiográficas de sub-bacias do Médio e Alto Rio Teles Pires, Mato Grosso. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.15, n. 2, p. 123-131, 2017.

ZHANGA, S.; LIA, Z.; HOUA, X.; YIB, Y. Impactos no escoamento em escala de bacias hidrográficas e na produção de sedimentos resultantes de mudanças sinérgicas no clima e na vegetação. **Catena**, v. 179, p. 129-138, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.007>

ZIEMBOWICZ, M. M.; MARCHESAN, J.; BARATTO, J.; ALBA, A.; SILVA, R. R.; PEREIRA, R. S. Geotecnologias aplicadas na análise dos impactos no uso e cobertura da terra causados pela construção de uma usina hidrelétrica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 40, e17, P. 1-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X29847>

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SILVA MATOS, E.; MAGALHÃES, C. A. S.; ALMEIDA, F. de T.; SOUZA, A. P. de; MINGOTI, R. Perdas de solo e água na integração lavoura-floresta e na sucessão soja-milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1223-1230, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900022>

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vazões líquidas e sólidas das sub-bacias hidrográficas estudadas, afluentes do rio Teles Pires, apresentaram comportamentos semelhantes na sazonalidade hídrica e com variações significativas na disponibilidade hídrica superficial e na produção e transporte de sedimentos, em função da área de drenagem e dos usos do solo.

As vazões líquidas nas seções hidrológicas das sub-bacias hidrográficas Caiabi, Celeste, Preto e Renato podem ser medidas tanto com o molinete hidrométrico quanto com o ADCP *RiverRay*, pois apresentaram medidas de vazão líquida e profundidade semelhantes e compatíveis. Contudo, esses dois métodos devem ser avaliados em outros

rios/córregos/igarapés pequenos da região Amazônica, com diferentes características hidráulicas e geomorfológicas.

As vazões sólidas em suspensão das sub-bacias hidrográficas Caiabi, Celeste, Nandico, Preto, Renato e Rosana podem ser obtidas por diferentes formas de amostragens, uma vez que, as metodologias avaliadas apresentaram precisão e acurácia na obtenção das vazões sólidas totais. Entretanto, essas amostragens de sedimentos em suspensão (por vertical, composta, na vertical padrão e em três verticais situadas a 25, 50 e 75% da largura da seção) devem ser avaliadas em outras condições hidráulicas de rios naturais.

Os rios e córregos afluentes do rio Teles Pires avaliados no presente estudo, apresentam escassez de informações hidrológicas e sedimentológicas. Nesse sentido, deve ser mantido o monitoramento hidrossedimentológico para a calibração/validação das curvas-chave e de modelos de predição das estimativas das vazões líquidas e sólidas e também para gerar informações que subsidiem a adequada gestão e planejamento do uso da água e do solo na região, objetivando diminuir a erosão hídrica, poluição e assoreamento em rios/córregos pequenos rurais e urbanos.

7. REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO GERAL E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

ABDUL RAZAD, A. R.; SIDEK, L. M.; BASRI, H.; ALEXANDER, J. L.; JUNG, K.; SINNAKAUDAN, S. K. Previsão de Influxo de Sedimentos de Reservatório usando Integração Modelo Precipitação-Esgoto e Vazão-Sedimento. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 4.35, p. 917-923, 2018.

ALMEIDA, W. S. de; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S. de; MENEZES, R. da S.; SOBRINHO, T. A.; CARVALHO, D. F. de. Efeito do preparo do solo e da cobertura vegetal na infiltração de água no solo. **Soil & Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>

ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; PEREIRA, F. A. C.; ROUWS, J. R. C. Produção de sedimentos e infiltração de água no solo sob diferentes características de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 8, p. 572-578, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p572-578>.

ALMEIDA, R. A.; PEREIRA, S. B.; PINTO, D. B. F.; ROSA, D. R. Q. Aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT na bacia do rio Mucuri. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 5, p. 631-644, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n5p631-644/2020>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Medição de vazão líquida em grandes rios: manual técnico**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2014. 88p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Serviço Geológico do Brasil. Brasília: ANA, 2021. 118p.

ANDRADE, M. P. de; RIBEIRO, C. B. de M. Impacto das alterações do uso e cobertura do solo na vazão da bacia do rio Paraíba do Sul utilizando o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e12, P. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034>

ANDRADE, E. M.; RODRIGUES, R. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; FILHO, J. C. R. Respostas hidrológicas de uma bacia hidrográfica a mudanças na vegetação em uma região semiárida tropical. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 1, p. 161-170, 2018.

ANDRIETTI, G.; FREIRE, R.; AMARAL, A. G.; ALMEIDA, F. T. de; BONGIOVANI, M. C.; SCHNEIDER, R. M. Índice de qualidade da água e índices de eutrofização do Rio Caiabi, MT. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 1, p. 162-175, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1769>

BERIHUN; M. L.; TSUNEKAWA; A.; HAREGEWEYN; N.; TSUBO; M.; FENTA; A. A.; EBABU; K.; SULTAN; D.; YIHUN TADDELE DILE; Y. T. Redução do escoamento e perda de sedimentos sob opções alternativas de uso e gestão da terra baseadas na capacidade da terra em uma bacia sub-úmida da Etiópia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 40, 100998, p.1-16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100998>

BORRELLI; P.; ROBINSON; D. A.; FLEISCHER; L. R.; LUGATO; E.; BALLABIO; C.; ALEWELL; C.; MEUSBURGER; K.; MODUGNO; S.; SCHÜTT; B.; FERRO; V.; BAGARELLO; V.; OOST; K.; VAN; MONTANARELLA; L.; PANAGOS, P. Uma avaliação do impacto global da mudança do uso da terra no século XXI na erosão do solo. **Nature Communications**, v. 8, n. 8, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>

BUENO, M. L.; NEVES, D. R.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; LEHN, C. R.; RATTER, J. A. Um estudo em uma área de transição entre floresta tropical sazonalmente seca e Cerradão mesotrófico, em Mato Grosso do Sul, Sudoeste do Brasil. **Edinburgh Journal of Botany**, Edinburgh, v. 70, n. 3, p. 469-486, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960428613000164>

CARVALHO, A. C. P.; LORANDI, R.; DI LOLLO, J. A.; COLLARES, E. G.; MOSCHINI, L. E. Resposta hidrológica de sub-bacias hidrográficas da Bacia do Rio Piracicaba - Região

Sudeste do Brasil. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 34, e63522, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63522>

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**, 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.

CARVALHO, T. M de. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 1, n. 1, p. 73-85, 2008.

CASAVECCHIA, B. H.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; ZOLIN, C. A.; ULIANA, E. M.; MARQUES, A. Modelo chuva-vazão nas restrições da Amazônia. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 40, e76, p. 1-9, 2018. DOI:10.5902/2179460X33742

CHEN, X.Y.; CHAU, K.W. Análise de incerteza no duplo feedforward híbrido Modelo de Rede Neural para Estimativa de Carga de Sedimentos com método LUBE. **Water Resources Management**, v. 33, p. 3563-3577, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02318-4>

CHEN, Z.; PAN, S.; ZHOU, F.; BAN, Y.; LI, M.; LI, D. Um método para corrigir a vazão de medições ADCP montadas em barco. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 80, 101954, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101954>

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: 2ª Edição revisada – ABRH, 2015. 336p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2021/2022**. Brasília - DF, 2022. 88p. Disponível em <file:///C:/Users/Daniela/Downloads/E-book_Boletim-de-Safras-12o-levantamento.pdf> (acesso em 2022).

COSER, E.; GRISON, F. Geometria hidráulica de um trecho de canal fluvial aplicando HEC-RAS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 4, p. 691-706, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1512>.

DORNELES, J. I.; ALMEIDA, F. T de.; ZOLIN, C. A.; SOUZA, A P. de; SCHNEIDER, R. M. Avaliação de diferentes cenários na produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica amazônica. **Gaia Scientia**, v. 13, n. 4, p. 42-55, 2019. DOI:10.22478/ufpb.1981-1268.2019v13n4.44250

ENDOH, T.; TSUTSUMI, E.; HONG, C. S.; BAEK, G. N.; CHANG, M. H.; YANG, Y. J.; MATSUNO, T.; LEE, J. H. Estimativa da velocidade e direção de propagação e deslocamento vertical de ondas internas não lineares de segundo modo de medições ADCP. **Continental Shelf Research**, v. 233, 104644, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104644>

EPE - Empresa de pesquisa energética. **Avaliação Ambiental Integrada da Bacia Hidrográfica do Rio Teles Pires**, 2009. 67p. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/>> (acesso em 2022).

GAMARO, P. E. M. **Medidores acústicos Doppler de vazão**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2012. 164p.

GAMARO, P. E. M.; GOMES, B. M.; MALDONADO, L. H.; RODRIGUES, M. F. de C. Análise das Séries de Vazões Contínuas Obtidas em Tempo Real Através de Diferentes Técnicas com Aparelhos Acústicos Doppler Estáticos no Canal da Piracema da Itaipu Binacional: Canais quase Retangulares e Canais Trapezoidais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 33-42, 2013.

GIROLAMO, A. M. de; LO PORTO, G. P. A. Variabilidade temporal do transporte de sedimentos em suspensão e curvas de classificação em uma bacia hidrográfica do Mediterrâneo: O Celone (SE Itália). **Catena**, v. 128, p. 135-143, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.020>

GROPPO, J. D.; SALEMI, L. F.; MORAES, J. M.; TREVISAN, R.; MARTINELLI, L. A. Processos hidrológicos em uma sub-bacia do Parque Estadual da Serra do Mar, núcleo Santa Virgínia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 595-606, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831323>

GUAN, M.; WRIGHT, N. G.; SLEIGH, P. A. Múltiplos efeitos do transporte de sedimentos e processos geomórficos em eventos de inundação: Modelagem e compreensão. **International Journal of Sediment Research**, v. 30, n. 4, p. 371-381, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2014.12.001>

HIMANSHU, S. K.; PANDEYA, A.; YADAV, B.; GUPTA, A. Avaliação das melhores práticas de manejo para controle de perda de sedimentos e nutrientes usando o modelo SWAT. **Soil & Tillage Research**, v. 192, p. 42-58, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.016>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estado do Mato Grosso: pedologia (Mapa exploratório de solos)**, 2009. 1p. Disponível em <<https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>> (acesso em 2022).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bacias e divisões hidrográficas do Brasil**, 2021. 160p. Disponível em <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101854>> (acesso em 2022).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: população estimada**, 2021. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mt.html> (acesso em 2022).

JOHANSSON, R.; LUEBEHUSEN, E.; MORRIS, B.; SHANNON, H.; MEYER, S. Monitoramento dos impactos do clima e dos extremos climáticos na produção agrícola global. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 65-71, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2015.11.003>

KOOL, J.; LHERMITTE, S.; HRACHOWITZ, M.; BREGOLI, F.; MCCLAIN, M. E. Dinâmica de inundação sazonal e balanço hídrico do Pantanal de Mara, Tanzânia, com base na classificação de imagem multitemporal Sentinel-2. **International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation**, v. 109, 102766, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102766>

LEPESQUEUR, J.; HOSTACHE, R.; MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; MONTARGÈS-PELLETIER, E.; HISSLER, C. Modelagem do transporte de sedimentos em ambientes ribeirinhos: sobre a importância da distribuição granulométrica, densidade de sedimentos e concentrações de sedimentos em suspensão no limite a montante. **Hydrology and Earth System Science**, v. 23, p. 3901-3915, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-3901-2019>

LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; MINGOTI, R.; VENDRUSCULO, L. G.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; OLIVEIRA, R. F. de; PAULINO, J.; ULIANA, E. M. Regime hidrológico, disponibilidade de água e mudança de uso/cobertura da terra impacto no balanço hídrico em uma grande bacia agrícola no Sul Amazônia brasileira. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, 103224, p.1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103224>

MACEDO, P. S. M.; OLIVEIRA P. T. S.; ANTUNES M. A. H.; DURIGON V. L.; FIDALGO E. C. C.; CARVALHO D. F. Nova abordagem para obtenção do fator C de RUSLE considerando o efeito sazonal das chuvas na cobertura vegetal. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 9, n. 2, p. 207-216, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.12.001>

MALDONADO, L. H.; WENDLAND, E. C.; PORTO, R. de M. Avaliação de métodos de baixo custo para medição de vazão em Córregos. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 2, p. 402-412, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1293>

MAPBIOMAS. “Projeto MapBiomias – Mapeamento da superfície de água no Brasil: A dinâmica da superfície de água do território brasileiro (Coleção 1), 2021. Disponível em <<https://mapbiomas.org/superficie-de-agua-no-brasil-reduz-15-desde-o-inicio-dos-anos-90>> (acesso em 2022).

MARINHO, R. R.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; MARTINEZ, J. M.; HARMEL, T. O Transporte de sedimento suspenso no Rio Negro (Bacia Amazônica) por meio de dados MSI/Sentinel-2. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 1, p. 1174-1190, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2076>

MARQUES, E. Q; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MARIMON, B. S.; MATRICARDI, E. A.; MEWS, H. A.; COLLI, G. R. Redefinindo a transição Cerrado-Amazônia: implicações para conservação. **Biodiversity and conservation**, v. 29, n. 5, p. 1501-1517, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01720-z>

MELLO, C. R. de. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Editora UFLA, 2013. 455p.

MENDES, N. G. de S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Cobertura florestal e vazões de bacias hidrográficas da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 2, e420204, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000200004>

MENEZES, D.; MARCUZZO, F. F. N.; PEDROLLO, M. C. R. Estimativa da produção de sedimentos usando a curva de transporte de sedimentos. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e17, p. 1-31, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X37263>

MUELLER, D. S. *extrap*: Software para auxiliar na seleção de métodos de extrapolação para medições de vazão ADCP em barcos em movimento. **Computers & Geosciences**, v. 54, p. 211-218, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.02.001>

MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R.; REHMEL, M. S.; OBERG, K. A.; RAINVILLE, F. **Medindo a vazão com perfiladores de corrente Doppler acústico de um barco em movimento** (ver. 2.0, December 2013): U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. A22, 2013. 95p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3133/tm3A22>.

MUELLER, D. S. **QRev-Software para computação e garantia de qualidade de medições de fluxo de fluxo de barco em movimento do perfilador de corrente Doppler acústico**. Manual técnico para a versão 2.8: Relatório de Arquivo Aberto do US Geological Survey, 2016. 79p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20161068>

MUSTE, M.; YU, K.; SPASOJEVIC, M. Aspectos práticos do uso de dados ADCP para quantificação da média características do fluxo do rio; Parte I: medições de embarcações em movimento. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 15, p. 1-16, 2004. DOI: [doi:10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2003.09.001)

OLIVEIRA, B. de; MARIMON JUNIOR, B. H.; MEWS, H. A.; VALADÃO, M. B. X.; MARIMON, B. S. Desvendando as funções do ecossistema na transição Amazônia-Cerrado: evidências de ciclagem hiperdinâmica de nutrientes. **Plant Ecology**, v. 218, n. 2, p. 225-239, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-016-0681-y>

PASSAIA, O. A.; SIQUEIRA, V. A.; BRÊDA, J. P. L. F.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D. de P. O impacto de grandes reservatórios nas vazões simuladas de rios brasileiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e17, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190084>

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E. Estudo do transporte de sedimentos no Rio Jordão, localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro-MG. **Acta Scientiarum Technology**, v. 43, e51714, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v43i1.51714>

PEIXOTO, R. A. O.; PEREIRA, C. E.; SALLA, M. R.; ALAMY FILHO, J. E., NISHIMURA, A. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921-931, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180137>

PINHEIRO, A. G.; SOUZA, T. E. M. dos S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. de A.; Guerra, S. M. S. Características e potencial erosivo das chuvas para as zonas fisiográficas do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 12, p. 849-853, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p849-853>

RD INSTRUMENTS. **Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation - A Practical Primer**. RD Instruments, San Diego, CA, 1996. 62p.

RIEGER, F. A.; ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SOUZA, A. P. de; MATOS, E. S.; MAGALHÃES, C. A. S.; FARIAS, A. F. Erosão hídrica em um Latossolo sob Sistemas Integrados Lavoura-Floresta em uma Área de Transição entre os Biomas Amazônia e Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150111, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150111>

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LATERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba, Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 2001. 372p.

SANTOS, L. L. dos; RIBEIRO, V. de O.; DIODATO, J. O. Morfometria das bacias hidrográficas inseridas na zona urbana de Dourados – MS. **Revista o Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 46, n. 3, p. 75-87, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v46i3.67039>

SERRA, T.; SOLER, M.; BARCELONA, A.; COLOMER, J. Transporte de sedimentos suspensos e deposição em sedimentos reabastecidos inundações artificiais em rios mediterrâneos. **Journal of Hydrology**, v. 609, 127756, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127756>

SIMÕES, R.; PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; MACIEL, A.; SANTOS, L.; ANDRADE, P. R.; SÁNCHEZ, A.; FERREIRA, K.; CARVALHO, A. Mapas de uso e cobertura da terra para o estado de Mato Grosso no Brasil de 2001 a 2017. **Scientific Data**, v. 7, n. 34, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11440461>

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. Doi: <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a07>

SOUZA, M. M. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; RIBEIRO FILHO, J. C.; MOURA, M. M. S. Características pluviométricas determinantes no transporte de sedimentos em microbacia com vegetação raleada no semiárido tropical. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, p. 785-793, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n322rc>

SOUZA, N. S.; SOUZA, W. de J.; CARDOSO, J. M. S. Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 453-462, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017155279>

SOUZA, V. A. S.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MOREIRA, D. M.; RUDKE, A. P.; SÁ, M. R. T. Dinâmica do desmatamento na Amazônia e seus impactos na hidrologia: bacia do Rio Machadinho – Rondônia / Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1004-1018, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509835333>

SIMIONI, C. F.; ALMEIDA, F. T. de; ZOLIN, C. A.; ULIANA, E. M.; SOUZA, A. P. de; MARQUE, A. Vazão sólida em microbacia da região amazônica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e73, p. 1-26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X64223>

STINGHEN, C. M.; MANNICH, M. Panorama da gestão de bacias críticas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, e13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21168/reg.v19e13>

ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; CRUZ, I. F. da; LISBOA, L.; SOUSA JÚNIOR, M. F. Aplicação dos modelos hidrológicos SAC-SMA e IPH II na bacia do rio Teles Pires, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 24, e15, P. 1-13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180082>

WANG, X.; ZHAO, X.; ZHANG, Z.; YI, L.; ZUO, L.; WEN, Q.; LIU, F.; XU, J.; HU, S.; LIU, B. Avaliação da mudança da erosão do solo e suas relações com a mudança de uso/cobertura da terra na China do final da década de 1980 a 2010. **Catena**, v. 137, p. 256-268, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.004>

WENZEL, D. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de; SOUZA, A. P. de; MENDES, M. A. dos S. A.; SOUZA, L. G. da S. Características fisiográficas de sub-bacias do Médio e Alto Rio Teles Pires, Mato Grosso. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.15, n. 2, p. 123-131, 2017.

ZAIATZ, A. P. S. R.; ZOLIN, C. A.; VENDRUSCULO, L. G.; LOPES, T. R.; PAULINO, J. Mudança de uso e cobertura agrícola da terra no ecótono Cerrado/Amazônia: Um estudo de caso da bacia do alto rio Teles Pires. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 2, p. 168-177, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201701930>

ZHANGA, S.; LIA, Z.; HOUA, X.; YIB, Y. Impactos no escoamento em escala de bacias hidrográficas e na produção de sedimentos resultantes de mudanças sinérgicas no clima e na vegetação. **Catena**, v. 179, p. 129-138, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.007>

ZIEMBOWICZ, M. M.; MARCHESAN, J.; BARATTO, J.; ALBA, A.; SILVA, R. R.; PEREIRA, R. S. Geotecnologias aplicadas na análise dos impactos no uso e cobertura da terra causados pela construção de uma usina hidrelétrica. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 40, e17, P. 1-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X29847>

ZOLIN, C. A.; MATOS, E. da S.; MAGALHÃES, C. A. de S.; PAULINO, J.; LAL, R.; SPERA, S. T.; BEHLINGE, M. feito da integração lavoura-pecuária-floresta em fase inicial sobre as perdas de solo, água e nutrientes no ecótono Cerrado-Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 51, p. 102-112, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202000391>

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; SILVA MATOS, E.; MAGALHÃES, C. A. S.; ALMEIDA, F. de T.; SOUZA, A. P. de; MINGOTI, R. Perdas de solo e água na integração lavoura-floresta e na sucessão soja-milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1223-1230, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900022>