

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Thiago Rodrigues de Matos

**Determinação do Tempo de
Concentração em uma microbacia
hidrográfica utilizando traçador salino:
estudo de caso da bacia hidrográfica do
Igarapé Sapucajuba**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Hélio da Silva Almeida.

Belém – Pará – Brasil

2019

THIAGO RODRIGUES DE MATOS

Determinação do Tempo de Concentração em uma microbacia hidrográfica utilizando traçador salino: estudo de caso da bacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Hélio da Silva Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner.

BELÉM/PA
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

R696d Rodrigues de Matos, Thiago
 Determinação do Tempo de Concentração em uma
 microbacia hidrográfica utilizando traçador salino: estudo de
 caso da bacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba / Thiago
 Rodrigues de Matos. — 2019.
 93 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Hélio da Silva Almeida
 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade
 Federal do Pará, Belém, 2019.

 1. tempo de concentração. 2. aplicação de traçador
 salino. 3. características morfométricas. I. Título.

CDD 628

DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA UTILIZANDO TRAÇADOR SALINO

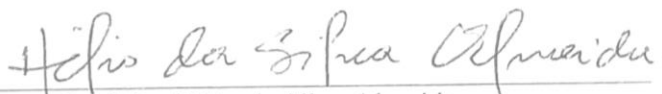
AUTOR:

THIAGO RODRIGUES DE MATOS

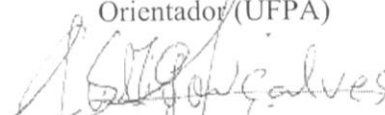
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL.

APROVADO EM: 11 / 10 / 2019.

BANCA EXAMINADORA:



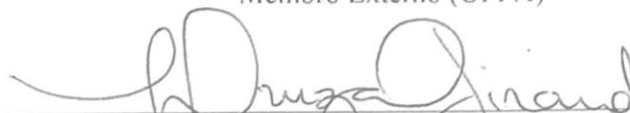
Prof. Dr. Hélio da Silva Almeida
Orientador (UFPA)



Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves
Membro Externo (UFTM)



Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner
Membro Externo (UFPA)



Profa. Dra. Luiza Carla Girard Mendes Teixeira
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a DEUS que sempre me deu forças e me motivou a finalização deste trabalho.

Aos meus pais que sempre me ajudaram e vão estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Ao orientador Prof. Hélio da Silva Almeida e ao coorientador Giovanni Chaves Penner, pela paciência e pelo tempo dedicado à orientação desta pesquisa.

À equipe de estudantes da graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental que ajudaram na realização dos ensaios de campos.

Aos amigos que sempre me motivaram na qualificação profissional.

A todos que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado.

“Maravilhoso é voltar os olhos para trás e constar quantos
obstáculos vencidos, quantos sacrifícios, quantos esforços,
Mas é mais maravilhoso ainda olhar para frente com fé,
sabendo que existe uma Força maior, que nos acompanha dia a dia,
E que não somos o que deveríamos ser, nem o que queríamos ser,
mas graças a Deus, não somos mais o que éramos.”
(Martin Luther King)

RESUMO

Para a determinação do tempo de concentração (t_c) de bacias hidrográficas, foram desenvolvidos diversos métodos práticos, que em sua maioria são empíricos. No entanto, a determinação deste tempo de resposta é difícil, pois muitas vezes estes métodos são utilizados de forma indiscriminada, através de sua aplicação errônea fora do seu campo de validade. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo de determinar o t_c para a microbacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba, a partir de medições em campo, com auxílio de traçador salino (cloreto de sódio – NaCl), e por meio de estimativa utilizando 08 métodos empíricos, que necessitam das características morfométricas da bacia hidrográfica, sendo posteriormente comparados ao valor medido em campo para verificação de quais métodos seriam mais adequados a serem aplicados na bacia. Para determinação do t_c em campo, foram realizados teste iniciais visando a determinação de alguns parâmetros como tempo de ensaio, intervalo de medição instantânea e concentração da solução traçadora. Na estimativa do t_c pelos métodos empíricos, de uma forma em geral, observou-se que estes subestimaram o valor do tempo de concentração, superestimando, assim, a vazão do corpo hídrico, sendo os métodos mais indicados para a estimativa de t_c , os de Vem te Chow, de DNOS e de Kirpich, pois apresentaram erros percentuais de 9,51, 12,13 e 19,92%, respectivamente, em comparação ao tempo de concentração medido em campo.

Palavras-chave: tempo de concentração, aplicação de traçador salino, características morfométricas.

ABSTRACT

To determine the time of concentration (t_c) of watershed, several practical methods have been developed, which are mostly empirical. However, determining this response time is difficult as these methods are often used indiscriminately through their incorrect application to their validity field. Thus, the present work aimed to determine the time of concentration for the watershed of stream Sapucajuba, from field measurements, with the aid of saline tracer (sodium chloride - NaCl) and by testing 08 empirical methods, which select morphometric characteristics of the watershed, being subsequently compared to the value measured in the field to verify which methods would be more suitable to be applied in the basin. To determine t_c in the field, initial tests were carried out to determine some parameters such as test time, instantaneous measurement interval and concentration of the tracer solution. In general, the underestimated methods or the value of the time of concentration, overestimated, thus, a leakage of the water body, being the most suitable methods for t_c estimates, those of Come the Chow, DNOS and Kirpich, because it found percentage errors of 9.51, 12.13 and 19.92%, respectively, compared to the time of concentration measured in the field.

Keywords: concentration time, saline tracer application, morphometric characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Hidrograma esquemático da vazão de equilíbrio resultante quando a duração da chuva, t_d excede o tempo de equilíbrio t_{eq} da bacia hidrográfica.	24
Figura 2: Alterações hidrológicas consequentes do crescimento urbano.	26
Figura 3: Comparação esquemática entre os hidrogramas de uma bacia rural e uma bacia urbanizada.	27
Figura 4: Representação do comprimento do rio principal e a distância entre sua foz e nascente.	29
Figura 5: Tipos de traçadores.	40
Figura 6: Traçadores na investigação das interações da água de superfície e subterrânea.	44
Figura 7: Localização da bacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba.	49
Figura 8: Margens do Igarapé Sapucajuba com preservação de mata ciliar.	50
Figura 9: Margens do Igarapé Sapucajuba com preservação de mata ciliar.	50
Figura 10: Levantamento topográfico planialtimétrico.	51
Figura 11: Estação Total utilizada.	52
Figura 12: Instrumento e sensor de condutividade elétrica modelo LabQuest® 2. ...	53
Figura 13: Realização dos ensaios.	54
Figura 14: Local para realização de campanha de ensaios de teste, perto do Portão 4 de acesso à UFPA.	57
Figura 15: Preparo de solução traçadora salina.	57
Figura 16: Trechos de realização de ensaios de campo.	59
Figura 17: Ensaios no trecho 1.	60
Figura 18: Ensaios no trecho 2.	61
Figura 19: Ensaios no trecho 3.	62
Figura 20: Gráfico de condutividade elétrica vs tempo, ensaio do dia 03/08/2018.	66
Figura 21: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, campanha do dia 22/08/2018.	67
Figura 22: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, ensaios do dia 09/03/2019, no trecho 1.	68
Figura 23: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 2.	70

Figura 24: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 3.	71
Figura 25: Perfil topográfico do Igarapé Sapucajuba.	74
Figura 26: Mapa topográfico do Igarapé Sapucajuba.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de k correspondentes às características do terreno.....	35
Tabela 2: Classificação dos traçadores segundo Silva <i>et al.</i> (2009).	39
Tabela 3: Resumo dos métodos apresentados para cálculo de tempo de concentração.....	63
Tabela 4: Velocidades médias em m/s para o Cálculo de t_c	64
Tabela 5: Parâmetros e valores de vazão medidos, ensaio do dia 03/08/2018.	65
Tabela 6: Parâmetros e valores de vazão medidos, campanha do dia 22/08/2018. .	66
Tabela 7: Parâmetros e valores de vazão e tempo de concentração medidos, ensaios do dia 09/03/2019, no trecho 1.	69
Tabela 8: Parâmetros e valores de vazão e tempo de concentração medidos, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 2.	70
Tabela 9: Parâmetros e valores de vazão e tempo de concentração medidos, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 3.	72
Tabela 10: Tempo de concentração medido em cambo extrapolado para toda a microbacia hidrográfica.	73
Tabela 11: Estimativa de t_c para os métodos empíricos.....	76
Tabela 12: Teste de sensibilidade para a estimativa de t_c para o Métodos de DNOS.	77
Tabela 13: Verificação das velocidades médias de escoamento na bacia hidrográfica.....	78
Tabela 14: Valores dos erros percentuais de cada método de estimativa de t_c	79
Tabela 15: Métodos mais adequados para a microbacia, por ordem de grandeza. ..	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

A	Área de drenagem da bacia hidrográfica
APA Belém	Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém
C _b	Concentração do igarapé antes de injetar a solução
CFC	Clorofluorcarbono
C _i	Concentração do sal na solução
c(t)	Concentração no tempo
DAER/RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
DBM	Distância de Boa Mistura
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
E _L	Coeficiente de dispersão longitudinal
EUA	Estados Unidos da América
g	Gramma
H	Diferença de cotas do talvegue entre o ponto mais afastado e a seção de referência da bacia
IES	Instituição de Ensino Superior
k	Fator de rugosidade do terreno
Kg	Quilograma
Km ²	Quilômetros quadrados
L	Comprimento do talvegue, em quilômetros
MICD	Método de injeção com curta duração
MII	Método de injeção instantânea
MILD	Método de injeção com longa duração
m/m	Metro por metro
m ³	Metro quadrado
p	Fração de área com mata
PCT Guamá	Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Q	Vazão
S	Declividade da bacia
SACs	sistemas alagados construídos

SIG	Sistemas de Informações Geográficas
t_c	Tempo de concentração
t_{ep}	Tempo de equilíbrio
TR	Tempo de residência experimental
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná
UC	Unidade de Conservação
UV	Ultravioleta
V_i	Volume injetado do traçador salino

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.1.1 Geral	21
1.1.2 Específicos.....	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO E OS SISTEMAS DE DRENAGEM	22
2.1.1 Características morfométricas das bacias hidrográficas que influenciam no tempo de concentração	25
2.1.1.1 Rugosidade da superfície	25
2.1.1.2 Geometria dos canais e planos de escoamento	26
2.1.1.3 Precipitação e teor de humidade do solo	27
2.1.1.4 Declividade.....	28
2.1.1.5 Área de drenagem	28
2.1.1.6 Comprimento do talvegue (Lc)	29
2.1.2 Métodos de determinação de tempo de concentração	29
2.1.2.1 Método de Kirpich	31
2.1.2.2 Método de Giandotti	32
2.1.2.3 Método de Dooge	33
2.1.2.4 Método de <i>Corps of Engineers</i>	33
2.1.2.5 Método do DNOS	34
2.1.2.6 Método de George Ribeiro	35
2.1.2.7 Método de Ven te Chow	36
2.1.2.8 Método de Carter	37
2.2 UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES EM ESTUDOS HIDROLÓGICOS	37
2.2.1 Tipos de traçadores externos	40
2.2.1.1 Traçadores biológicos	40

2.2.1.2 Traçadores químicos.....	41
2.2.1.3 Traçadores fluorescentes	43
2.2.1.4 Traçadores radioativos	44
2.2.1.5 Traçadores ativáveis	45
2.2.2 Escolha do traçador	46
3. MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1 ÁREA DE ESTUDO	48
3.1.1 Bacia Hidrográfica do Igarapé Sapucajuba	48
3.2 MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM CAMPO	52
3.2.1 Medição de vazão pelo Método de dissolução de sal (NaCl) ou Método Químico de Integração	52
3.2.2 Determinação do tempo de concentração por meio de utilização de traçador	55
3.2.3 Campanha de ensaios de teste.....	56
3.2.4 Campanhas de ensaios de determinação de vazão e tempo de concentração	58
3.3 MÉTODOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1 ENSAIOS DE TESTE.....	65
4.2 DETERMINAÇÃO DE VAZÃO E TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	68
4.2.1 Ensaios do trecho 1 (09/03/2019).....	68
4.2.2 Ensaios do trecho 2 (16/03/2019).....	69
4.2.3 Ensaios do trecho 3 (16/03/2019).....	71
4.2.4 Tempo de concentração de toda a microbacia hidrográfica	72
4.3 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO POR MÉTODOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS.....	73

4.3.1 Levantamento topográfico planialtimétrico.....	73
4.3.2 Tempo de concentração estimado	76
4.3.3 Análise comparativa do t_c calculado com o t_c medido em campo	78
5. CONCLUSÕES	82
6. REFERÊNCIAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

A Hidrologia é uma ciência de fundamental importância para entender as leis e fenômenos interativos que ocorrem entre a água e o meio ambiente, sendo crucial o seu estudo para que o ser humano consiga alcançar o desenvolvimento sustentável, a partir da efetiva gestão dos recursos hídricos, minimizando os impactos negativos que suas atividades causam ao meio ambiente, principalmente pelo processo de urbanização acelerado e desordenado, além de prever fenômenos naturais extremos que possam trazer riscos à vida humana, tais como inundações, seca, etc.

De acordo com Mota (2012), um dos maiores desafios da Hidrologia é entender e descrever os mecanismos de passagem da água proveniente da precipitação (chuva) até o rio, devendo destacar que muitos estudos já foram realizados, dando origem a conceitos para explicar esses mecanismos, a partir de medições e observações em campo.

Entre os estudos realizados na Hidrologia está o do tempo de resposta da bacia hidrográfica a precipitação pluviométrica (relacionado ao processo de geração de vazão no corpo hídrico), sendo que, em geral, qualquer análise hidrológica precisa de pelo menos um parâmetro de tempo de resposta da bacia, e na maioria das vezes esse parâmetro é o tempo de concentração (Mc CUEN *et al.*, 1984; KOBAYAMA *et al.*, 2006; WONG 2009; DE ALMEIDA *et al.*, 2013).

Inicialmente, Mulvaney (1850), em seu estudo, conceituou o tempo de concentração como sendo o tempo necessário para a chuva que cai no ponto mais remoto da bacia chegar ao exutório, ou ainda, até que toda a área da bacia contribua para a vazão no exutório (BRUTSAERT, 2005, apud MOTA, 2012; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; SILVEIRA, 2016; LIMA e DA PAZ, 2016; LOUSADA e CAMACHO, 2018).

Posteriormente, a definição e o conceito de tempo de concentração foram sendo aperfeiçoados, de acordo com o ponto de vista considerado. Atualmente, conclui-se que o ponto mais remoto é determinado hidraulicamente, e não só pela maior distância (MOTA, 2012).

Segundo Silveira (2005), como a última gota a chegar do ponto mais distante corresponde teoricamente a escoamentos de baixa magnitude, o tempo de

concentração definido como a diferença entre o fim da chuva e o fim do escoamento superficial tende a ser maior que o “verdadeiro” tempo de concentração que é influenciado pela propagação hidráulica com carga média maior. Desta forma, apesar do tempo de concentração ser muito estudado e utilizado, sua avaliação é bastante complexa, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos (SAMPAIO *et al.*, 2016).

O tempo de concentração é utilizado em várias aplicações, dentre as quais se destacam: prevenção e minimização das consequências de desastres naturais e da poluição pontual nos recursos hídricos; definição do intervalo de monitoramento hidrológico; projetos de drenagem urbana e; elaboração de hidrograma de escoamento (SILVEIRA, 2005; MOTA, 2012; DE ALMEIDA *et al.*, 2013).

Várias são as equações, em sua maioria de caráter empírico, que visam possibilitar a determinação do tempo de concentração, baseando-se nas características morfométricas da bacia que devem ser anteriormente conhecidas para determinação desse parâmetro (ESTEVES e MENDIONDO, 2003; SILVEIRA, 2005; DE ALMEIDA *et al.*, 2013). Muitas vezes estas fórmulas são utilizadas de forma indiscriminada, através de sua aplicação errônea fora do seu campo de validade (SAMPAIO *et al.*, 2016). Para os projetos de engenharia, as consequências estão no cálculo das vazões máximas de projeto, podendo sub ou superestimá-las, perdendo assim a eficácia e a eficiência (DE ALMEIDA *et al.*, 2013), aumentando os riscos à saúde da população e à preservação do meio ambiente.

Uma alternativa para se evitar a ocorrência de erros na determinação do tempo de concentração, está a partir de realizações de medições em campo, tendo como resultado equações adequadas para as bacias hidrográficas, de uma determinada região, que apresentem características semelhantes.

De acordo com Sagara (2001), como o processo de urbanização ocupa cada vez mais as bacias de drenagem, torna-se fundamental o levantamento de dados que possibilitem a realização de estudos para prever a ocorrência de eventos hidrológicos. No entanto, muitas das bacias não apresentam um monitoramento voltado ao estudo ambiental e de gestão dos recursos hídricos, sendo importante a obtenção de dados para estes locais (SILVEIRA, 2016).

Em relação ao Brasil, com destaque para a Região Amazônica, há uma carência de estudos hidrológicos em pequenas bacias hidrográficas (MOTA, 2012; SILVEIRA, 2016), principalmente os estudos que necessitam de medições em campo,

utilizando equipamentos de elevada precisão. No entanto, a utilização de metodologias mais simples e eficientes, como os métodos que utilizam traçadores, facilitariam o desenvolvimento de estudos, além de fornecer o valor exato e real do tempo de concentração para uma bacia hidrográfica.

As pequenas (micro) bacias hidrográficas ainda não possuem conceitos definitivos e universais que as classifiquem como tal, sendo que, conforme o caso, os pesquisadores determinam limites de área máxima para as mesmas.

No trabalho de Beck *et al.* (2013), foi considerada pequena bacia hidrográfica aquela que possui menos de 1 km² de área de drenagem.

Na rede de monitoramento hidrológico nacional, apesar de reconhecida a relevância das pequenas bacias hidrográficas para o gerenciamento de recursos hídricos, há poucos postos fluviométricos em bacias com menos de 500 km² (DA SILVEIRA *et al.*, 1998; GOLDENFUM, 2001; MOTA *et al.*, 2016).

Desta forma, a realização de estudos em bacias hidrográficas é fundamental para o entendimento de processos físicos, biológicos e químicos envolvidos na ecologia de bacias situadas em uma determinada região, por apresentarem características semelhantes.

Na determinação do tempo de concentração diretamente, a partir de medições em campo, podem ser utilizados traçadores que, segundo Silva *et al.* (2009) e Bj Rnstad e Maggio (1994), são quaisquer substâncias, ou partículas/entidades (químicas ou biológicas), que podem ser usadas para seguir, quer pontualmente ou de forma contínua, o comportamento de um determinado sistema ou de um componente, tal como volume de água, quer em ambiente aberto (hidrologia de superfície) ou subterrâneo (ambiente poroso ou fissurado).

Dentre os tipos de traçadores, estão os conservativos, que não alteram suas características quando em contato com outras substâncias, devendo-se destacar o Cloreto de Sódio (NaCl), que é de fácil aquisição, baixo custo e de fácil detecção (podendo ser utilizado um condutivímetro comum), não são tóxicos, nas concentrações utilizadas, e não apresentam riscos de poluição ambiental ou à saúde (MATOS, *et al.*, 2015; PASSOS *et al.*, 2015).

Diante ao exposto, o presente trabalho visa a determinação do tempo de concentração real da microbacia do Igarapé Sapucajuba, situada na Cidade Universitária Prof. José da Silveira Netto, da Universidade Federal do Pará (UFPA

Campus Belém), a partir da utilização de substância traçadora salina (Cloreto de Sódio), além de apresentar o(s) método(s) existente(s) de estimativa do tempo de concentração que mais se adequa(am) a bacia estudada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Determinar o tempo de concentração para a microbacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba.

1.1.2 Específicos

- Realizar a caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica;
- Realizar testes para ajustes dos ensaios de campo determinando a massa de sal e volume de solução salina, tempo de ensaio e intervalo de medição;
- Conduzir campanhas de medição de vazão e tempo de concentração com uso de traçador salino;
- Calcular a estimativa do tempo de concentração, a partir dos métodos mais utilizados;
- Comparar o valor do tempo de concentração determinado em campo com os valores do tempo de concentração estimados a partir dos métodos empíricos e semi empíricos;
- Apresentar os melhores método a ser utilizados para bacias hidrográficas com características semelhantes a microbacia hidrográfica estudada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO E OS SISTEMAS DE DRENAGEM

Os processos do ciclo hidrológico são compostos por subprocessos, sendo a vazão um dos processos hidrológicos mais importantes que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Para sua melhor compreensão, a vazão no rio pode ser separada em porções de acordo com o percurso que descreve para chegar ao rio (KULANDAISWAMY e SEETHARAMAN, 1969; KAYANE, 1980; SAGARA, 2001; MOTA, 2012). Assim, os componentes da vazão são classificados como:

- Escoamento superficial: água que escoar sobre a superfície da bacia hidrográfica até um canal de drenagem (é computada a precipitação que cai diretamente sobre o rio);
- Escoamento subsuperficial: água que infiltra no solo, e escoar lateralmente pelo solo até o rio;
- Escoamento subterrâneo (ou de base): água do aquífero ou lençol freático que escoar para o rio.

Vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de entender e descrever os mecanismos de fluxo da água proveniente da precipitação até o rio. Dentre esses estudos, pode-se destacar o estudo de Mulvaney (1850), na tentativa de relacionar o efeito de uma chuva sobre uma bacia hidrográfica (verificou-se a necessidade de estudar a resposta de uma bacia hidrográfica a um evento pluviométrico), descrevendo um método muito similar ao conhecido como método racional, apresentando como um de seus resultados, a conceituação de tempo de concentração (t_c) (KOBIYAMA *et al.*, 2006; MOTA, 2012). Segundo Singh (1976), acredita-se que neste trabalho se encontra a primeira apresentação clara sobre o conceito de tempo de concentração.

Em geral, qualquer análise hidrológica precisa de pelo menos um parâmetro de tempo de resposta da bacia hidrográfica a precipitação pluviométrica (relacionado ao processo de geração de vazão no corpo hídrico), sendo na maioria das vezes utilizado o tempo de concentração (Mc CUEN *et al.*, 1984; KOBIYAMA *et al.*, 2006; WONG 2009; DE ALMEIDA *et al.*, 2013). Dentre as suas aplicações se destacam: a implementação de sistemas de alerta contra inundações; definição do intervalo de monitoramento hidrológico; projetos de drenagem urbana; e elaboração

de hidrograma de escoamento (SILVEIRA, 2005; MOTA, 2012; DE ALMEIDA *et al.*, 2013).

Segundo Kobiyama *et al.* (2006), os parâmetros de tempo são de grande importância no gerenciamento de recursos hídricos, tanto para medidas estruturais quanto para não-estruturais.

Para Lima e Da Paz (2016), o tempo de concentração é um parâmetro muito importante no entendimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, muito utilizado para estimar vazões de pico em estudos de simulação hidrológica do processo de transformação chuva-vazão. Por exemplo, o método racional, usado em projetos de drenagem urbana, utiliza o t_c para determinar a intensidade média da chuva através da curva intensidade-duração-frequência (IDF). O parâmetro também é utilizado para dimensionar o Hidrograma Unitário segundo a metodologia proposta pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), antigo *Soil Conservation Service* (SCS). Essa metodologia utiliza o t_c no cálculo da duração do tempo de pico e vazão de pico (FANG *et al.*, 2008).

Nesse sentido, estimar o tempo de concentração se tornou habitual no dimensionamento de projetos de estruturas hidráulicas e de saneamento, e também para estudar os impactos de cenários de mudança de uso e ocupação do solo, como desmatamento e urbanização, no que se refere à ocorrência de enchentes (CASTRO *et al.*, 2015; LIMA e DA PAZ, 2016). Sabe-se também que o t_c tem influência significativa nos resultados da modelagem hidrológica, Bondelid *et al.* (1982 apud FANG *et al.*, 2008) identificaram que cerca de 75% dos erros encontrados nas estimativas de vazão de pico poderiam estar relacionados a falhas na determinação do t_c .

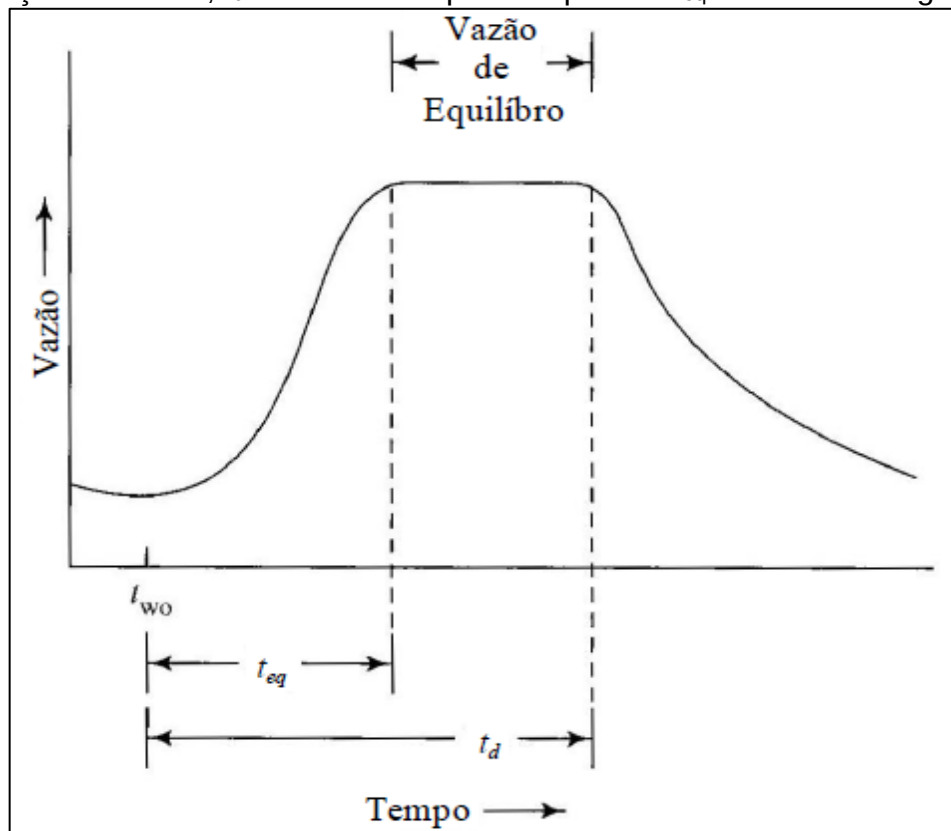
De acordo com Mulvany (1850), o tempo de concentração é o tempo necessário para a chuva que cai no ponto mais remoto da bacia chegar ao exutório, ou ainda, até que toda a área da bacia contribua para a vazão no exutório (BRUTSAERT, 2005, apud MOTA, 2012; COLLISCHONN e DORNELLES, 2013; SILVEIRA, 2016; LIMA e DA PAZ, 2016; LOUSADA e CAMACHO, 2018).

Posteriormente, a definição e o conceito de tempo de concentração foram sendo aperfeiçoados de acordo com o ponto de vista considerado. Atualmente, conclui-se que o ponto mais remoto é determinado hidraulicamente, e não só pela maior distância (MOTA, 2012).

Segundo Mota (2012), o entendimento teórico de tempo de concentração é, de certa forma, comum entre os cientistas e comunidade técnica. Porém, a forma prática de determiná-lo, utilizando dados de chuva e vazão, não é muito precisa. Consiste em definir o tempo entre o final da chuva efetiva e o ponto de inflexão do hidrograma resultante daquele evento, ou momento final do escoamento direto.

Dingman (2002) determina tempo de concentração como um conceito muito favorável para visualizar a resposta da bacia à precipitação. Considera-se que quando a chuva efetiva continua em taxa constante por uma duração igual ou maior que t_c , a vazão de resposta será constante e na mesma taxa que a chuva efetiva, até que a chuva termine (Figura 1). Para essa condição, denomina-se vazão de equilíbrio, e o momento em que a taxa de chuva e vazão se igualam é chamado de tempo de equilíbrio (t_{eq}), que pode ser considerado o tempo de concentração aparente. Alguns autores preferem utilizar o conceito de tempo de equilíbrio como sinônimo para t_c , na dedução de fórmulas empíricas ou teóricas (BUTLER, 1977; MOTA, 2012).

Figura 1: Hidrograma esquemático da vazão de equilíbrio resultante quando a duração da chuva, t_d excede o tempo de equilíbrio t_{eq} da bacia hidrográfica.



Nota: Nota-se que t_{wo} é o tempo de início da precipitação.

Fonte: Mota (2012) adaptado de Dingman (2002).

Além do tempo de concentração, existem outros parâmetros de tempo que estão relacionados na descrição de um hietograma efetivo e seu respectivo hidrograma de resposta. Estes parâmetros estão em função de características da bacia hidrográfica estudada, tais como tamanho, forma, declividade, características do solo, geologia, dentre outros (DINGMAN, 2002; MOTA, 2012; SILVEIRA, 2016). Um exemplo de outro parâmetro de tempo de resposta da bacia importante é o tempo de trânsito, que é o intervalo necessário para um determinado volume de água escoar de um local para outro. Ele também está relacionado às características da bacia, e por isso, muitas vezes é utilizado como equivalente do tempo de concentração (GERGOV, 1971; MOTA, 2012).

2.1.1 Características morfométricas das bacias hidrográficas que influenciam no tempo de concentração

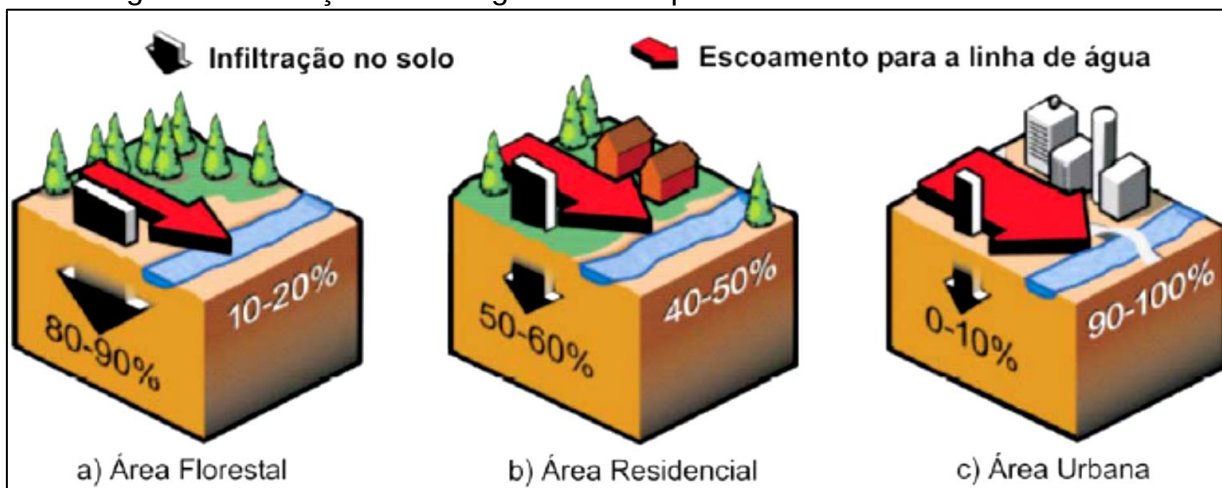
Como já comentado, alguns fatores influenciam no tempo de resposta da bacia hidrográfica, como por exemplo o tipo de ocupação e uso da bacia, a rugosidade da superfície do terreno, a geometria dos canais e planos de escoamento, área de drenagem, comprimento do talvegue e o declive (SILVEIRA, 2005; LIMA e DA PAZ, 2016), sendo estes fatores apresentados a seguir.

2.1.1.1 Rugosidade da superfície

Em comparação com às bacias hidrográficas urbanas, as bacias rurais produzem pouco escoamento, conforme apresentado na Figura 2, por contarem com terrenos com maior capacidade de infiltração, devido a cobertura vegetal que funciona como macro-rugosidade, oferecendo resistência e retardando o escoamento (CHAVECA, 1999; RAMINHOS, 2002). Além disso, a interceptação feita pela cobertura vegetal é fulcral para a diminuição da quantidade e intensidade dos impactos causados no escoamento (MATA-LIMA *et al.*, 2007).

Em bacias hidrográficas urbanas, as ações antrópicas afetam o comportamento hidrológico da mesma, uma vez que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005; TEODORO *et al.*, 2007).

Figura 2: Alterações hidrológicas consequentes do crescimento urbano.



Fonte: Mata-Lima *et al.* (2007) adaptado de Marsh (1983).

Segundo Mata-Lima *et al.* (2007), no caso de bacias hidrográficas urbanas, a quantidade de precipitação que atinge a superfície do solo (ou precipitação efetiva) e o escoamento produzido são manifestamente superiores, em comparação as bacias rurais, pelos seguintes motivos:

- Reduzida interceptação pela cobertura vegetal, consequência do desmatamento;
- Baixa infiltração no solo, causada pela elevada percentagem de áreas impermeabilizadas;
- O escoamento ocorre segundo planos e canais muito bem definidos, pertencentes aos sistemas de drenagem urbana (como por exemplo, estradas, valas, coletores pluviais, etc.).

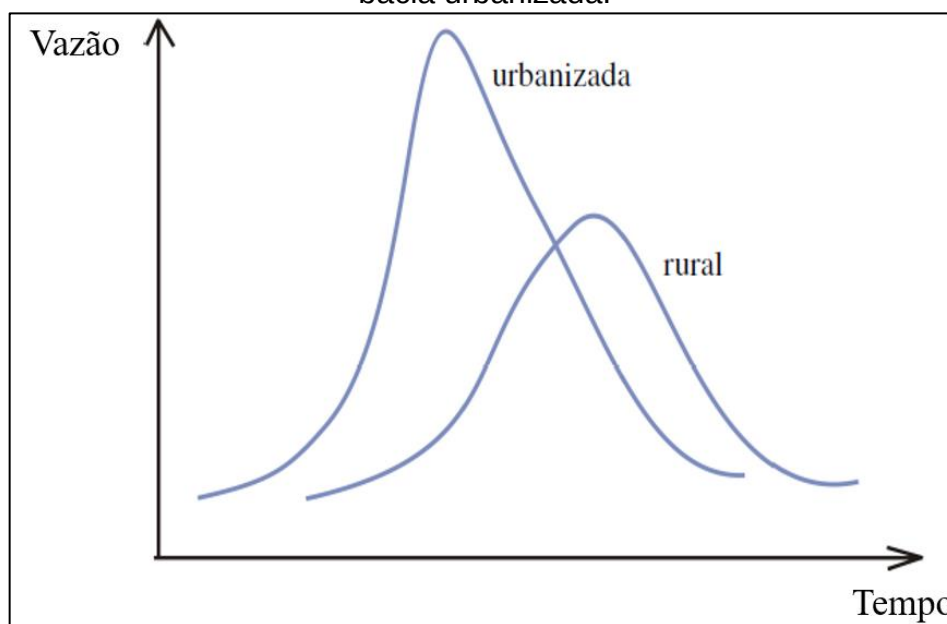
Todos esses fatores contribuem para que o tempo de concentração seja inferior em bacias hidrográficas urbanas, do que em bacias rurais.

2.1.1.2 Geometria dos canais e planos de escoamento

Em bacias hidrográficas rurais, o tempo de concentração depende, necessariamente, do escoamento sobre o terreno. No entanto, com a expansão de áreas urbanas ocasionada pelo crescimento populacional, reduz, progressivamente, o escoamento sobre o terreno, substituindo-o pelo escoamento em canais prismáticos constituintes dos sistemas de drenagem urbana. Observa-se que esses canais possuem elevada “eficiência hidráulica”, sendo a velocidade do escoamento elevada,

o que diminui, consideravelmente, o tempo de concentração das bacias hidrográficas (MATA-LIMA *et al*, 2007), resultando em hidrogramas com picos mais acentuados que em bacias hidrográficas rurais, conforme Figura 3.

Figura 3: Comparação esquemática entre os hidrogramas de uma bacia rural e uma bacia urbanizada.



Fonte: Paz (2004) adaptado de Tucci (2001).

De acordo com Moruzzi *et al.* (2009), intervenção direta nos corpos hídricos proporciona um incremento das vazões escoadas, diminuindo o tempo de concentração na bacia e aumenta os problemas de enchente a jusante, maximizados pela crescente ocupação e impermeabilização da área.

2.1.1.3 Precipitação e teor de humidade do solo

Quando a chuva atinge a bacia hidrográfica, parte da água fica interceptada nas depressões do terreno, parte infiltra no solo e o restante escoar pela superfície do terreno. Contudo, isso acontece após a intensidade da precipitação superar a capacidade de infiltração da água no solo e de serem preenchidas as depressões da superfície do mesmo pela água da chuva (SILVEIRA, 2016).

De acordo com Hotchkiss e McCallum (1995), o tempo de concentração varia ligeiramente com a intensidade de precipitação e o teor de humidade inicial do solo. Desta forma, o tempo de concentração é tanto menor quanto maior for a intensidade de precipitação e o teor de humidade inicial do solo.

De acordo com TUCCI (2008), a canalização do escoamento é uma das principais causas das inundações.

2.1.1.4 Declividade

Em relação ao declive, a situação não é clara como nos outros fatores. O crescimento urbano (ou urbanização) de uma dada bacia não significa, necessariamente, o aumento do declive, pois tudo dependerá da geomorfologia da região. No entanto, sabe-se que, com o processo de urbanização da bacia hidrográfica, os efeitos do declive, no escoamento, ganham maior significado se houver a tendência de se construírem canais impermeáveis, retilíneos e perpendiculares aos planos de encostas para recolher e drenar a água pluvial.

Segundo Araújo (2011), a declividade dos terrenos de uma bacia é um conceito importante, pois controla em boa parte a velocidade com que se dá o escoamento superficial, já que quanto mais íngreme for o terreno, mais rápido será o escoamento superficial, o tempo de concentração será menor e os picos de enchentes maiores.

O relevo corresponde às variações que se verificam à superfície da Terra. As principais características de uma bacia, neste aspeto em particular, são a declividade da bacia, a altitude média e a declividade do rio principal (COSTA e LANÇA, 2011; LOUSADA e CAMACHO, 2018).

A temperatura, precipitação e evaporação assumem valores variáveis em função da altitude da bacia e a velocidade do escoamento superficial é determinada pela declividade do terreno, isto mostra a importância e a necessidade de caracterizar o relevo na medida em que influencia significativamente os fatores hidrológicos (COSTA e LANÇA, 2011; LOUSADA e CAMACHO, 2018).

2.1.1.5 Área de drenagem

A área da bacia corresponde a sua área de drenagem, cujo valor equivale à área plana entre os divisores topográficos projetada verticalmente.

Segundo Lousada e Camacho (2018), a área de drenagem deve resultar da projeção horizontal da bacia uma vez definidos os respetivos contornos.

De acordo com Tucci (1997), a área de drenagem é um dado fulcral para determinar a potencial hídrico da bacia hidrográfica, pelo fato de seu valor,

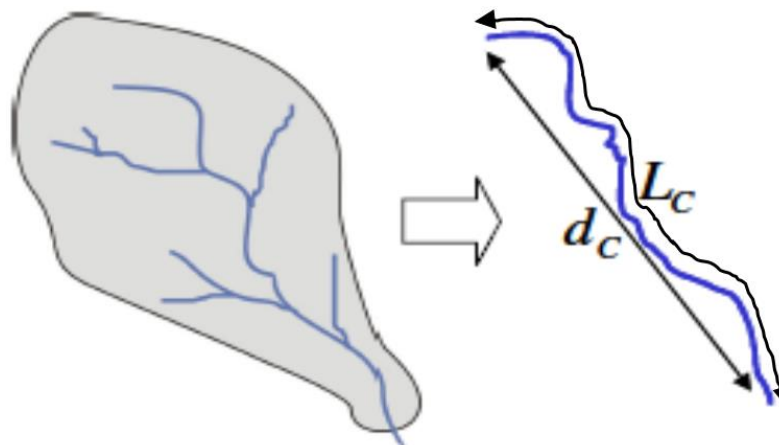
multiplicado pela lâmina da chuva precipitada, definir o volume de água recebido pela bacia.

Silveira (2005) constatou que a maioria das equações que utiliza a área da bacia como uma variável explicativa exibe a tendência de superestimação do tempo de concentração independente da amplitude das áreas aceitas para as equações.

2.1.1.6 Comprimento do talvegue (L_c)

O comprimento da linha de talvegue corresponde ao perfil longitudinal da altura sobre o plano, ou seja, da seção de saída (exutório) até a nascente principal (SAMPAIO *et al.*, 2016), conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Representação do comprimento do rio principal e a distância entre sua foz e nascente.



Fonte: Paz (2004).

Segundo Lousada e Camacho (2018), o perfil longitudinal do curso de água relaciona, em cada ponto, as cotas do seu leito com a distância do ponto à foz. No traçado gráfico do perfil longitudinal é usual assinalar as obras hidráulicas mais relevantes (barragens, açudes, confluências, etc.).

2.1.2 Métodos de determinação de tempo de concentração

A estimativa do tempo de concentração pode ser feita de duas maneiras: a direta, que usa registros hidrometeorológicos ou traçadores; e o indireto, que usa expressões matemáticas previamente estabelecidas para certas regiões. Métodos diretos utilizam registros hidrometeorológicos com intervalos de discretização menores que o tempo de concentração ou traçadores em pesquisas de campo

(FARIAS JÚNIOR e BOTELHO, 2011). No Brasil, no entanto, a disponibilidade de informações é escassa, especialmente para médias e pequenas bacias hidrográficas. Portanto, a alternativa que é normalmente utilizar métodos indiretos para a estimativa do tempo de concentração (SOUZA *et al.*, 2018).

Segundo Silveira (2005), como a última gota a chegar do ponto mais distante corresponde teoricamente a escoamentos de baixa magnitude, o tempo de concentração definido como a diferença entre o fim da chuva e o fim do escoamento superficial tende a ser maior que o “verdadeiro” tempo de concentração que é influenciado pela propagação hidráulica com carga média maior. Desta forma, há uma incerteza prática na definição do tempo de concentração que, muitas vezes, afeta a geração das fórmulas de cálculo. Normalmente, as medidas ou observações do tempo de concentração, das mais sofisticadas (com traçadores diversos) às mais pragmáticas (via análise hietograma-hidrograma ou somatória de tempos de trânsito), podem superestimar o tempo de concentração caso se refiram ao escoamento superficial com baixa carga hidráulica.

Segundo Kibler (1982), a determinação do tempo de concentração através de fórmulas empíricas está sujeita à imprecisões e incertezas que se devem ao tipo de escoamento que a fórmula procura representar (MARCELLINI, 1994).

Pode-se observar que, apesar de ser muito estudado e utilizado, o tempo de concentração apresenta certa dificuldade para ser definido objetivamente, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos (SAMPAIO *et al.*, 2016).

Várias são as equações, em sua maioria de caráter empírico, que visam possibilitar a determinação do tempo de concentração, baseando-se nas características geomorfológicas da bacia que devem ser anteriormente conhecidas para determinação desse parâmetro (ESTEVES e MENDIONDO, 2003; SILVEIRA, 2005; DE ALMEIDA *et al.*, 2013). Muitas vezes estas fórmulas são utilizadas de forma indiscriminada, através de sua aplicação errônea fora do seu campo de validade (SAMPAIO *et al.*, 2016). Para os projetos de engenharia, as consequências estão no cálculo das vazões máximas de projeto, podendo sub ou superestimá-las, perdendo assim a eficácia e a eficiência (DE ALMEIDA *et al.*, 2013), aumentando os riscos à saúde da população e a preservação do meio ambiente.

Para Lima e Da Paz (2016), os tempos de concentração superestimados resultam em hidrogramas que indicam uma vazão máxima menor, ocorrendo após um

maior período de tempo dado o início do evento de precipitação. O que culminaria em previsões hidrológicas menos preocupantes e projetos menos seguros. Por outro lado, tempos de concentração subestimados preveem hidrogramas com vazão máxima elevada, ocorrendo em menor período de tempo após o início da chuva. Nesse contexto, as simulações hidrológicas seriam demasiadamente alarmantes e os projetos seriam mais onerosos, porque seriam superdimensionados.

As equações utilizadas para determinar o tempo de concentração em bacias hidrográficas são empíricas e se dividem em dois grupos: estritamente empíricos e semi-empíricos. Os métodos estritamente empíricos derivam do estudo estatístico de informações de campo da bacia, que resultam na relação entre o tempo de concentração da bacia e suas características geomorfológicas, através da análise de regressão linear múltipla. Dessa forma, consistem em métodos rígidos e que por sua vez não consideram a variabilidade no tempo e no espaço das características da bacia em análise (MATA-LIMA *et al.*, 2007). Já os métodos semi-empíricos são aqueles que incluem parâmetros que variam em função das características ocupacionais da bacia, denotando, portanto, flexibilidade no uso. Tratam-se de métodos particularmente importantes por admitirem analisar os diversos cenários e, sobretudo, por viabilizarem a previsão do comportamento hidrológico face às alterações propostas (MATA-LIMA, 2006).

A seguir são apresentados os principais métodos utilizados na estimativa do tempo de concentração.

2.1.2.1 Método de Kirpich

Considerado como um dos métodos mais utilizados até hoje, sendo muito usado na aplicação do Método Racional (TOMAZ, 2002), o Método de Kirpich foi elaborada em 1940 por um engenheiro civil, contratado como engenheiro hidráulico assistente no Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (U.S. Army Corps of Engineers) em Baltimore.

Kirpich (1940), em seu trabalho, desenvolveu a Equação (1) a partir de pequenas bacias agrícolas situadas, na cidade de Jackson, no Estado de Tennessee, Estados Unidos (utilizando os dados de 6 pequenas bacias rurais e com alguma porcentagem de reflorestamento), com declividades variando entre 3 e 10% e áreas de no máximo 0,5 km² (SAMPAIO *et al.*, 2016).

Esta Equação é recomendada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) para a elaboração de projetos de pequenas obras hidráulicas (DAEE, 2005).

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (1)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em minutos;

L – Comprimento do talvegue, em quilômetros;

H – Diferença de cotas do talvegue entre o ponto mais afastado e a seção de referência da bacia, em metros.

O valor de tempo de concentração obtido deve ser multiplicado por 0,2 ou 0,4, conforme sejam canais de betão ou superfícies asfaltadas, respectivamente. Entretanto, isto valeria se toda a bacia fosse equipada com sistema de drenagem e houvesse um alto grau de impermeabilização (SILVEIRA, 2005).

De acordo com Sampaio *et al.* (2016), quando se extrapola sua aplicação a bacias hidrográficas de maiores áreas, é de se esperar obter tempos de concentração menores do que os reais.

2.1.2.2 Método de Giandotti

Este método foi elaborado com uma base de dados de bacias hidrográficas rurais da região da Itália setentrional e central, com tamanhos variados, de 170 a 70.000 km² (GREPPI, 2005). Mesmo não tendo se difundido muito no Brasil, na Europa, sobretudo na Itália, é muito utilizado. Portanto, diversos autores têm aplicado esta fórmula para bacias hidrográficas italianas e obtido resultados satisfatórios (MOTA, 2012).

Segundo Radice *et al.* (2012), este método Equação (2) é indicado principalmente para bacias de acentuada declividade.

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{H_m}} \quad (2)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

A – Área de drenagem da bacia hidrográfica, em km²;

L – Comprimento do talvegue, em quilômetros;

H_m – Elevação média a partir do exutório, em metros.

Silveira (2005) comenta que este método apresenta ampla faixa de áreas com potencial aceitabilidade de uso. No entanto, por utilizar a área da bacia hidrográfica como uma variável explicativa, exhibe a tendência de superestimação do tempo de concentração, independente da amplitude das áreas aceitas para as fórmulas.

2.1.2.3 Método de Dooge

Em seu trabalho, O'Kelly (1955) desenvolveu uma primeira versão deste método, com base em dados de 10 bacias hidrográficas rurais na Irlanda, com área entre 145 e 948 km² (DOOGE, 1973). A partir deste método, Dooge (1956) deduziu sua fórmula para cálculo de tempo de concentração (Equação (3)).

$$t_c = 0,3649 \cdot A^{0,41} \cdot S^{-0,17} \quad (3)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

A – Área de drenagem da bacia hidrográfica, em km²;

S – Declividade da bacia, em m/m;

Porto (1995) fez a primeira divulgação do método de Dooge no Brasil e, segundo ele, a aplicação do método deve refletir melhor o tempo de concentração em bacias onde predomina o escoamento em canais (MOTA, 2012).

De acordo com Silveira (2005), em seu trabalho, este método mostrou desempenhos variados na sua aplicação de ofício, ou seja, aplicação a bacias rurais. Além disso, o autor destaca que pelo fato do método utilizar a área da bacia como uma variável explicativa, exhibe a tendência de superestimação do tempo de concentração, independente da amplitude das áreas aceitas para as fórmulas.

2.1.2.4 Método de *Corps of Engineers*

O método do *Corps of Engineers* teve como fonte básica a publicação espanhola do MOPU (1987), não tendo sido consultada nenhuma publicação original do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, por dificuldade de acesso (SILVEIRA, 2005).

Para a elaboração do método foram estudadas 25 bacias hidrográficas rurais com áreas de até 12.000 km² e declividades menores que 14% (SILVEIRA, 2005).

MOPU (1987) apresenta a fórmula do tempo de retardo do *Corps of Engineers*, simplificando-a ao substituir o comprimento do rio principal até próximo do centro de gravidade (L_c) da bacia pelo equivalente à metade do comprimento total L desse rio. Assim, a Equação (4) depende apenas de L e S . Na fórmula original o tempo de retardo é proporcional ao fator $(L.L_c)/S^{0,5}$ na potência 0,38. Linsley *et al.* (1967) expõem esta proporcionalidade para diferentes fisiografias de bacias enquanto MOPU (1987) não faz esta distinção.

$$t_c = 0,191 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19} \quad (4)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

L – Comprimento do canal principal, em km;

S – Declividade do canal principal, em m/m;

Silveira (2005) constatou, em seu trabalho, um bom resultado para aplicação desse método em bacias hidrográficas rurais, apresentando resultados mais consistentes que os demais métodos analisados, além de apresentar um considerado desempenho em bacias hidrográficas urbanas (com áreas menores que seis hectares).

2.1.2.5 Método do DNOS

O método de DNOS (antigo Departamento Nacional de Obras de Saneamento) foi elaborado por George Ribeiro em 1955, com base em estudos em 6 (seis) bacias hidrográficas rurais, com área até 0,45 km² e declividade entre 3 e 10%. Encontrou-se somente a partir da referência de Mello (1973), apesar de ser provavelmente um método frequentemente utilizado por órgãos técnicos do Brasil, como comprovam vários memoriais de cálculo do DAER/RS (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul) (SILVEIRA, 2005).

O método do DNOS foi proposto originalmente como uma adaptação da fórmula de Bransby-Williams (EUA), de 1923, onde George Ribeiro introduziu um fator de rugosidade (ver Equação (5) com um raciocínio empírico (RIBEIRO, 1955). Foi

verificada com os dados de Ramser, o que a colocaria no mesmo patamar de credibilidade do método de Kirpich. Destaque-se, entretanto, que a fórmula de Bransby-Williams (EUA), de 1923, utilizada por George Ribeiro, é completamente diferente daquela publicada por Wanielista *et al.* (1997).

$$t_c = 0,419 \cdot k^{-1} \cdot A^{0,3} \cdot L^{0,2} \cdot S^{-0,4} \quad (5)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

k – Fator de rugosidade do terreno, adimensional;

A – Área de drenagem da bacia hidrográfica, em km^2 ;

L – Comprimento do talvegue, em km;

S – Declividade da bacia, em m/m.

O fator k do Método de DNOS pode ser determinado a partir da Tabela 1, levando-se em consideração as características do terreno da bacia hidrográfica.

Tabela 1: Valores de k correspondentes às características do terreno.

Características do terreno da bacia	k
Areno-argiloso, vegetação intensa, elevada absorção	2,0
Comum, coberto de vegetação, absorção apreciável	3,0
Argiloso, coberto de vegetação, absorção média	4,0
Com vegetação média, pouca absorção	4,5
Em rocha, escassa vegetação, baixa absorção	5,0
Rochoso, vegetação rala, reduzida absorção	5,5

Fonte: Silveira (2005) adaptado de Mello (1973).

2.1.2.6 Método de George Ribeiro

De autoria brasileira, o método conhecido como o de George Ribeiro, foi proposta em 1961 (RIBEIRO, 1961), tendo grande divulgação com o livro de Garcez (1967) e de Canedo (1989). George Ribeiro buscou uma base física ao fazer a razão do comprimento do talvegue, afetado por um coeficiente, pela velocidade média de escoamento, dada por uma potência da declividade do talvegue multiplicada por um fator de rugosidade (SILVEIRA, 2005). O fator de rugosidade foi considerado como uma função linear da porcentagem da bacia coberta com mata (ver Equação (6). George Ribeiro calibrou sua equação por mínimos quadrados com os dados das 6

(seis) bacias rurais de Ramser-Kirpich mais dados de outras bacias que não discrimina. Entretanto, pode-se inferir, pela sua publicação de 1955, que muito provavelmente utilizou dados de apenas mais duas bacias, uma da Índia com 18.650 km² e outra dos EUA com 58 km², com declividade entre 1 e 10%. A discrepância de magnitudes entre essas bacias e as de Ramser (0,5 a 45 hectares) não garantiriam, a princípio, uma maior representatividade em relação ao seu método anterior (Método do DNOS), como afirmou Ribeiro (1961).

$$t_c = 0,222 \cdot (1,05 - 0,2 \cdot p)^{-1} \cdot L \cdot S^{-0,04} \quad (6)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

p – Fração de área com mata, adimensional, varia entre 0 e 1;

L – Comprimento do talvegue, em km;

S – Declividade da bacia, em m/m.

Silveira (2005) observou como resultado, que o Método de George Ribeiro, mesmo sendo considerada para bacias hidrográficas rurais, teve seus melhores resultados em bacias urbanas do que nas rurais, possuindo a vantagem, em relação às fórmulas genuinamente urbanas, de oferecer um erro médio de apenas 4% (com erro padrão de 26%) para bacias até 6 km². Mas deve ser considerado que seu universo foi de apenas nove bacias hidrográficas.

2.1.2.7 Método de Ven te Chow

O Método de *Ven te Chow* é originalmente utilizado para determinar o tempo de pico, sendo que para transformar em tempo de concentração, na equação, deve ser aplicado o fator 1,67, conforme sugerido por McCuen *et al.* (1984), sendo a fórmula já adaptada para o tempo de concentração apresentada a seguir (Equação (7)).

$$t_c = 0,16 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (7)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

L – Comprimento do canal principal, em km;

S – Declividade do canal principal, em m/m.

O estudo de *Ven te Chow* foi baseado em dados de 20 bacias hidrográficas rurais com área de drenagem de 1 a 19km² (DAEE, 1978).

Silveira (2005) avaliou em seu trabalho este método e outros 22 métodos de determinação de tempo de concentração, recomendando, em segundo lugar, o Método de *Ven te Chow* para utilização em bacias hidrográficas rurais, ficando apenas depois do Método do *Corps of Engineers*. O método funcionou melhor para bacias de 6 a 11.162 km², apresentando erro médio de 7% e erro-padrão de 19%.

2.1.2.8 Método de Carter

Em 1961, Carter estudou 5 bacias urbanas do município de Washington, Estados Unidos, sendo inicialmente desenvolvida para determinar o tempo de retardo (PAULINO, 2014).

Carter (1961) não determinou limites para a área da bacia, declividade e comprimento do talvegue. Porém, segundo McCuen (1984), o método deve ser utilizado para bacias de até 21 km², talvegue de até 12 km e declividade do talvegue menor que 0,5%. Já segundo Silveira (2005), o Método de Carter apresenta bons resultados quando aplicada em bacias hidrográficas urbanas com área entre 0,02 e 10,70 km², pois em seu estudo apresentou um erro médio de apenas 1%.

A Equação (8) que determina o tempo de concentração, foi adaptada por Silveira (2005) da equação original, onde determinava o tempo de retardo.

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \quad (8)$$

Onde:

t_c – Tempo de Concentração, em horas;

L – Comprimento do canal principal, em km;

S – Declividade do canal principal, em m/m.

2.2 UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES EM ESTUDOS HIDROLÓGICOS

O conhecimento e o monitoramento dos corpos hídricos são muito importantes para a manutenção da vida no planeta, sendo no ramo da hidrologia, necessário o uso de agentes que possam monitorar a dinâmica das águas, tal como os traçadores, utilizados tanto em águas superficiais quanto subterrâneas. Com estes agentes incorporados aos fluxos aquáticos, têm-se metodologias diretas, geralmente

rápidas e comumente únicas, das quais se pode determinar as fontes originais de água, ou a comprovação de novos afluentes aquáticos, delineamento de velocidades de fluxo de água e até a identificação de fontes poluentes (MAGGIO, 2000; SILVA *et al.*, 2009).

Segundo Bedmar (1972) e Duarte (1973), traçador é qualquer produto que, incorporado na massa de uma substância, permite investigar seu comportamento em determinado processo físico ou químico.

Wilson Jr. *et al.* (1986) consideram que traçador pode ser definido como qualquer material solúvel ou insolúvel que seja utilizado para determinar o caminho, tempo de trânsito e da dispersão de materiais similares na água.

Para Silva *et al.* (2009), Bj Rnstad e Maggio (1994) e Lopes (2016), traçadores são quaisquer substâncias, ou partículas/entidades (químicas ou biológicas), que podem ser usadas para seguir, pontualmente ou de forma constante, o comportamento de um determinado sistema ou de um componente, tal como volume de água, seja em ambiente aberto (hidrologia de superfície) ou subterrâneo (ambiente poroso ou fissurado).

Segundo Ribeiro *et al.* (2016), traçadores são substâncias usadas pelo homem para obter informação de maneira indireta sobre uma porção de matéria em repouso ou em movimento, podendo ou não estar presente no meio, neste caso, ele recebe o nome de traçador natural ou artificial, respectivamente. Eles podem também estar associados à fase oleosa (traçadores lipossolúveis) ou à fase aquosa (traçadores hidrossolúveis), mas em ambos os casos estarão associados ao fluxo ou movimento de algum fluido base ou fluido em estudo.

Atualmente, os traçadores são utilizados em quase todos os campos da ciência, tais como medicina, ciências biológicas, química, agricultura, geociências e engenharia, com maior interesse para o estudo de processos ambientais, industriais e biológicos (BJ RNSTAD e MAGGIO, 1994; LOPES, 2016), cabendo destacar, no entanto, que a aplicação dos traçadores é muito mais comum nos estudos de caracterização de reservatórios de petróleo (MAGGIO, 2000; SILVA *et al.*, 2009).

Em estudos ambientais, os traçadores são utilizados como agente de monitoramento ambiental de recursos hídricos, para análise do processo de sedimentação, determinar parâmetros de transporte e dispersão para alimentar modelos matemáticos, autodepuração de corpos hídricos, determinação de vazão e

velocidade de escoamento, eficiência de sistemas de tratamento de efluentes, avaliação de fugas de água em barragens, dentre outros (BENISCHKE, 1989; CORBERT *et al.*, 1997; SILVA *et al.*, 2009; LOPES, 2016; PIMENTA *et al.*, 2018).

O interesse científico e tecnológico no uso de traçadores em hidrologia surgiu da necessidade vital de monitorar os fluxos de água, sendo seu uso muito antigo, onde o primeiro relato histórico do uso de traçadores ocorreu em 20 d.C., quando o tetrarca Herodes Antipas utilizou cascas moídas para identificação das fontes do Rio Jordão (MAGGIO, 2000). Foram utilizados os mais diferentes tipos de traçadores, algumas vezes adicionados diretamente na água, e em outras, aproveitando-se determinadas substâncias nela contidas, como consequência de processos naturais ou de despejos acidentais.

Baseando-se no comportamento dos traçadores, pode-se deduzir determinados parâmetros hidrológicos. No entanto, é condição importante que seu comportamento seja igual, ao menos, muito parecido com o da água (BEDMAR, 1972; DUARTE, 1973; LOPES, 2016).

Silva *et al.* (2009) classifica, em seu trabalho, os traçadores conforme Tabela 2 e Figura 5.

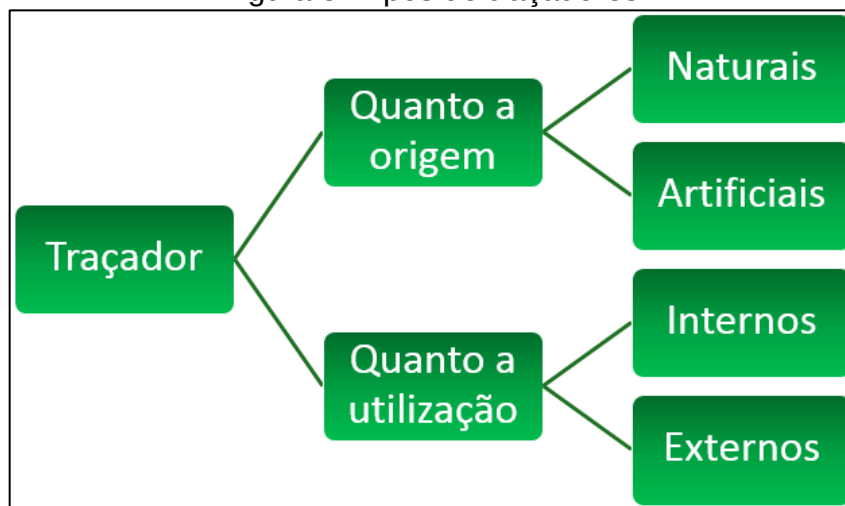
Tabela 2: Classificação dos traçadores segundo Silva *et al.* (2009).

Natureza do traçador	Tipo	Descrição
Quanto a origem	Naturais	Dentre estes flora e fauna (acompanhamento qualitativo e quantitativo de espécies vegetais e animais), isótopos ambientais, temperatura e condutância específica.
	Artificiais	Compostos orgânicos e inorgânicos, tais como: pigmentos, sais e outros compostos como os fluocarbonados; entidades biológicas, como esporos; bactérias e vírus.
Quanto a utilização	Internos	São elementos estáveis ou radioativos que ocorrem naturalmente no sistema sob estudo, geralmente de difícil quantificação.
	Externos	São traçadores adicionados ao sistema a ser estudado e podem ser classificados como fluorescentes, biológicos, químicos, radioativos e ativáveis

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2009).

No presente trabalho, será dado maior ênfase aos traçadores externos, pois os mesmos serão utilizados no desenvolvimento do estudo.

Figura 5: Tipos de traçadores.



Fonte: Autor (2019).

2.2.1 Tipos de traçadores externos

2.2.1.1 Traçadores biológicos

Os traçadores biológicos formam uma classe distinta de traçadores, uma vez que não são solutos, mas sim uma suspensão de partículas submicroscópicas, que na água se comportam como partículas coloidais (SILVA *et al.*, 2009).

De uma forma geral, Rossi *et al.* (1998) apresenta os traçadores biológicos com as seguintes características:

- a) Fácil crescimento em grandes culturas;
- b) Não patogênicos (para animais, plantas e humanos);
- c) Não estarem presentes no meio em estudo;
- d) Não terem movimento próprio;
- e) Dentre outras.

Os principais microrganismos utilizados como traçadores são: vírus, bactérias, leveduras, protozoários e esporos. As bactérias são os microrganismos comumente utilizados em estudos hidrológicos, enquanto o uso de leveduras e protozoários é limitado devido ao tamanho e tempo de sobrevivência; os vírus apresentam o inconveniente de alguns serem patogênicos aos seres humanos (HARVEY, 1997; SILVA *et al.*, 2009).

Segundo Silva *et al.* (2009), dentre os vários traçadores biológicos, os bacteriófagos apresentam-se como os mais vantajosos, por serem vírus de dimensões muito reduzidas, específicos para uma bactéria hospedeira, pois infectam somente organismos procariontes.

Goldscheider *et al.* (2007) utilizou bacteriófagos marinhos para estudar a circulação, o transporte e a propagação de bactérias e outros contaminantes no lago de Genebra, Suíça. Esses bacteriófagos também são utilizados para estudar a contaminação por vírus patógenos humanos em um aquífero (CORAPCIOGLU *et al.*, 2006).

Esses traçadores apresentam menores limites de detecção que os traçadores químicos e seu impacto ambiental é praticamente nulo, dada a sua curta persistência. No entanto, estes agentes têm como inconvenientes sua forte interação com o meio físico (não são conservativos) e a necessidade de um alto grau de sofisticação para sua cultura (KASS, 1998).

2.2.1.2 Traçadores químicos

São compostos não-radioativos, tais como haletos (iodetos, brometos), ânions ou moléculas orgânicas que são detectáveis por análises químicas (RIBEIRO *et al.*, 2016). No entanto, apresentam geralmente limitações de estabilidade térmica, reatividade em potencial e altos limites de detecção. Apesar dos altos limites de detecção, o baixo custo do material não-radioativo permite a injeção de grandes quantidades, compensando a sensibilidade do método (SILVA *et al.*, 2009).

Os haletos de metais alcalinos, como o iodeto de potássio (KI) e o brometo de potássio (KBr), são muito utilizados como traçadores, pois apresentam menor tendência à interação com a formação de um reservatório (CHRYSIKOPOULOS e KRUGER, 1986; SILVA *et al.*, 2009).

O amplo escopo e a larga aplicabilidade de traçadores para estudos oceânicos podem ser avaliados no artigo de revisão de England e Maier (2001), com 147 referências citadas. Neste estudo pode concluir que os traçadores químicos têm sido utilizados para analisar e simular a movimentação em modelos oceânicos, podendo-se citar vários exemplos, tais como: o trítio, clorofluor carbonos (CFCs), radiocarbonos produzidos naturalmente, oxigênio, silicatos, fosfatos, isótopos de carbonos em compostos orgânicos e inorgânicos e certos gases nobres (como hélio,

argônio). Constatase que com a utilização destes traçadores químicos podem ser obtidas informações importantes, que não seriam obtidas com os dados de correlação entre temperatura e salinidade.

Devens (2006), em seu trabalho, utilizou o Cloreto de Sódio (NaCl), um traçador salino e ambientalmente neutro, para determinar o coeficiente de dispersão longitudinal (E_L), um importante parâmetro físico de qualidade da água, em três córregos situados na cidade de Ouro Preto, aplicando os seguintes métodos de injeção: o método de injeção instantânea (MII), o método de injeção com curta duração (MICD) e o método de injeção com longa duração (MILD). A escolha da substância cloreto de sódio, utilizada como traçador no trabalho, está relacionada às considerações de ordem prática e à satisfação de um conjunto de requerimentos que o traçador deve apresentar. Dentre suas vantagens, tem-se: solubilidade em água, presença natural quase nula, não tóxica para homens e animais, facilidade de armazenamento ou de quantificação, e também um custo muito baixo. No entanto, observou-se que o traçador salino não se mostrou absolutamente conservativo, podendo ser empregado como traçador mediante a aplicação de correções que se mostraram adequadas por eliminar o efeito da perda sobre o E_L quantificado pelos métodos diretos.

Como conclusão em seu trabalho, Passos *et al.* (2015), utilizando o NaCl como traçador em ensaios desenvolvidos no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte/MG, em duas lagoas de polimento rasas, utilizadas para tratamento de esgotos, constatou que os traçadores salinos são geralmente mais baratos e de mais fácil aquisição e quantificação que os demais (podendo ser utilizado um condutivímetro comum para sua detecção), não são tóxicos e não apresentam riscos de poluição ambiental ou à saúde, nas concentrações comumente utilizadas. No entanto, apresentam como desvantagens a possível adsorção no meio que está sendo avaliado (no caso das lagoas, na matéria orgânica, biomassa ou lodo, por exemplo), a maior densidade da solução e a necessidade de aplicação de grandes quantidades da substância, devido à elevada concentração de sais nas lagoas.

Bortoluzzi e Fernandez (2007), verificaram a precisão dos métodos de medição da vazão líquida comumente empregados em pequenos cursos fluviais. Os levantamentos foram realizados em canais de primeira e segunda ordem na área

urbana de Marechal Cândido Rondon (PR). Além do método volumétrico adotado como referência, foram empregados os métodos de Manning, área versus velocidade e químico de integração (utilizando traçador salino, NaCl). As medições foram realizadas em cinco pontos de monitoramento e foi constatado que, para medições de vazão (Q) com resultados abaixo de 10 L/s, todos os métodos forneceram valores similares da vazão. Por outro lado, quando $Q > 10$ L/s, as diferenças entre os valores aumentam com a vazão.

2.2.1.3 Traçadores fluorescentes

São compostos orgânicos ou inorgânicos que apresentam fluorescência (luminescência que ocorre quando a luz é recebida e emitida em diferentes frequências de onda, dentro da faixa de luz visível, entre o maior ultravioleta e os comprimentos de onda infravermelhos), tais como os corantes fluorescentes usuais: fluoresceína, isotiocianato de fluoresceína, rodamina-B, rodamina-WT, eosina, Evans Blue e urânio (SILVA *et al.*, 2009; LOPES, 2016).

O efeito fluorescente ocorre apenas enquanto as partículas estiverem sendo impulsionadas por uma fonte de energia de excitação, por isso, é um efeito transitório em comparação com efeitos de vida longa como a fosforescência. A intensidade da emissão fluorescente se comporta de maneira linear envolvendo a intensidade da luz incidente e a concentração do traçador ao longo de um largo intervalo de tempo (LEIBUNDGUT e SEIBERT, 2011; RIBEIRO *et al.*, 2016).

Devido às impossibilidades de se realizar medições precisas e eficientes utilizando-se os sentidos humanos e devido ao seu baixo limite de detecção, recorre-se a métodos instrumentais para as medições das fluorescências dos traçadores. Estes equipamentos são o fluorímetro de campo e o espectrofluorímetro (SILVA, 2013).

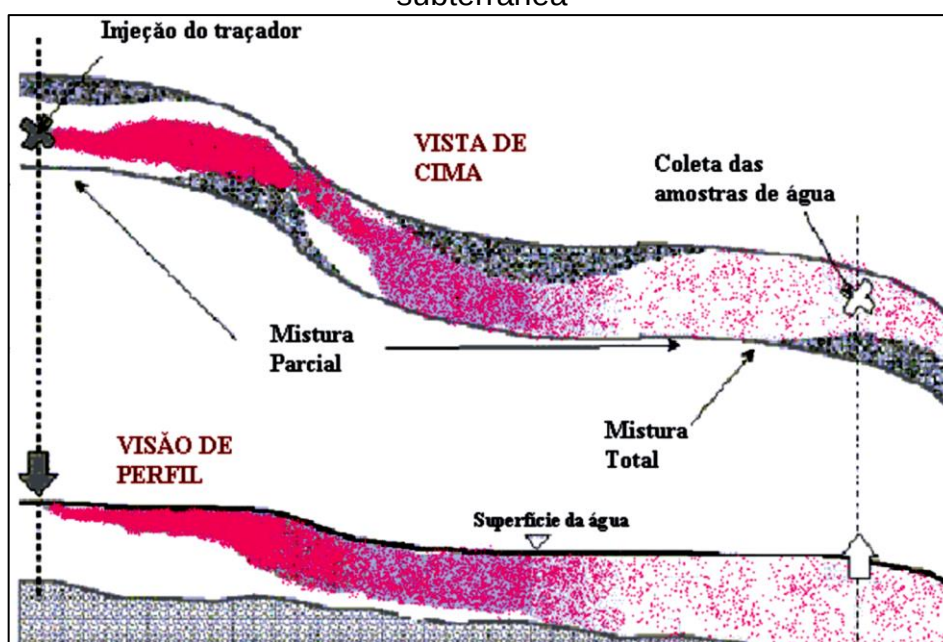
A precisão dos equipamentos que medem a fluorescência é uns dos fatores que podem explicar o uso de traçadores fluorescentes em hidrologia. Ainda neste contexto, segundo SILVA *et al.* (2009), o fato dos traçadores fluorescentes serem utilizados em hidrologia se dá, também, por possuir alta capacidade de solubilidade em água, facilidade de detecção e baixo custo (LOPES, 2016). No entanto, alguns compostos fluorescentes são carcinogênicos, como a rodamina B.

Os traçadores fluorescentes são muito eficazes para estudos em águas superficiais, sendo eles utilizados em: determinação dos parâmetros de transporte e

dispersão para calibrar modelos matemáticos (SILVA, 2017); estudos sedimentológicos; medidas de vazão de cursos de água (ROLDÃO, 1973); estudo do comportamento hidrodinâmico de uma unidade tratamento de efluentes (MATOS *et al.*, 2015); planejamento prévio visando minimizar problemas ocasionados por despejos de poluentes (ROLDÃO *et al.*, 1998; PECLY, 2000; BARBOSA, 2012); dentre outras aplicações (RIBEIRO, 2007).

Dentre os traçadores fluorescentes, a rodamina-WT é muito utilizada em hidrologia devido ao baixo custo, facilidade de detecção, usualmente com o emprego da técnica de injeção constante no campo para aplicação, assegurando a mistura por completo do traçador injetado, sendo injetados na parte de cima do rio em estudo (Figura 6).

Figura 6: Traçadores na investigação das interações da água de superfície e subterrânea



Fonte: Silva *et al.* (2009).

2.2.1.4 Traçadores radioativos

Traçadores radioativos são átomos ou moléculas, marcados isotopicamente e cujos átomos estudados são radioativos, sendo o tipo de traçador mais comumente utilizado em testes, pois apresenta baixos limites de detecção. Os radioisótopos utilizados dependem das propriedades do material, energia de radiação e tempo de meia vida (SILVA *et al.*, 2009).

Os traçadores radioativos são bons para medidas contínuas, pois emitem radiações (gama ou beta) com grande sensibilidade e baixa interferência. Teoricamente, traçadores radioativos são capazes de confirmar todos os resultados obtidos com os traçadores fluorescentes, mas o inverso não ocorre, pois, os traçadores radioativos apresentam como desvantagens a dificuldade de manipulação de material radioativo e possível contaminação do meio ambiente. Esses fatores têm contribuído para o uso preferencial de materiais não radioativos como traçadores em estudos biológicos e ambientais (MACEDO, 2004).

A utilização de traçadores radioativos tem fornecido imensa contribuição para o estudo de processos ambientais, tais como o estudo dos processos de erosão (ZHANG *et al.*, 2001), onde são utilizadas partículas marcadas com metais (^{137}Cs , ^{210}Pb , ^7Be , ^{234}Th , ^{56}Fe , ^{60}Co). O isótopo radioativo do cério (^{137}Cs) é usado para estudar a taxa de erosão por períodos prolongados, pois apresenta meia vida de 30 anos. O isótopo radioativo do Chumbo (^{210}Pb) apresenta meia vida de 20 anos e o isótopo radioativo do Berílio (^7Be) meia vida de 53 dias, são formados naturalmente na atmosfera e depositados na superfície por precipitação, distribuindo-se em diferentes profundidades do solo. Esses dois elementos, quando utilizados em conjunto como traçadores, fornecem uma identificação mais precisa do processo de erosão nos rios. ^{14}C e ^{15}N são amplamente utilizados em estudos de assimilação e translocação em ecossistemas (LEPOINT *et al.*, 2004).

O trítio (^3H) apresenta grande aplicabilidade como traçador em águas subterrâneas. Ele é o isótopo mais pesado do hidrogênio e o único radioativo. O trítio é mais barato que a maioria dos radioisótopos, mas é mais difícil de medir, devido à baixa energia de radiação e necessita de equipamento mais sofisticado para sua detecção (SILVA *et al.*, 2009).

2.2.1.5 Traçadores ativáveis

Traçadores ativáveis são aqueles que podem ser introduzidos no estado inativo dentro do sistema a ser analisado e, posteriormente, serão transformados em radioativos por “irradiação” em instalações nucleares, mais especificamente por irradiação de nêutrons para facilitar a análise por ativação neutrônica. Estes traçadores oferecem vantagens semelhantes aos radioativos, sem causar danos à saúde e ao ambiente e, além disso, podem ser obtidos em grandes quantidades com baixo custo. Destaca-se que o traçador deve apresentar alta seção de choque para

nêutrons térmicos, o radionuclídeo produzido deve emitir radiação gama para medição por espectrometria de raios-gama e ter bom tempo de meia vida para permitir a contagem após o período de resfriamento entre o fim da irradiação e a medida da atividade (CHRYSIKOPOULOS e KRUGER, 1986; SILVA *et al.*, 2009).

A quantidade do elemento estável usada como traçador geotérmico depende do fluxo de nêutrons disponível, com um alto fluxo de nêutrons é necessária pequena quantidade de elemento estável para a análise por ativação. Para utilização de um traçador ativável é necessário: a escolha e introdução de uma forma química do traçador no sistema a ser estudado, retirada cuidadosa das amostras com o material que será marcado evitando contaminação externa, submissão dessas amostras à análise por ativação neutrônica para identificação do produto da reação nuclear, bem como quantificação do traçador presente no material (MACEDO, 2004).

Os traçadores ativáveis apresentam vantagens em relação aos outros tipos de traçadores, quando utilizados em reservatórios, pois não sofrem processos de clivagem e, na maioria dos casos, são estáveis em altas temperaturas e em variações de pH, e não são tóxicos (SILVA *et al.*, 2009).

A utilização desses traçadores tem fornecido grande suporte para o estudo de processos ambientais, como na utilização dos elementos terras raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Dy e Yb) no estudo da erosão e deposição de sedimentos (LIU *et al.*, 2004). No entanto, tem uma maior utilização em petroquímica, para a caracterização de reservatórios de petróleo no processo denominado de recuperação secundária (técnica para se obter um melhor aproveitamento dos reservatórios de petróleo), onde são injetados juntamente com a água (IAEA, 2004).

2.2.2 Escolha do traçador

Está disponível no mercado uma enorme gama de traçadores que podem ser utilizados para estudos hidrológicos. A escolha do traçador ideal dependerá da exatidão esperada, dos recursos humanos e materiais disponíveis, da quantidade mínima de traçador para sua detecção, das ressurgências disponíveis e da sua atoxicidade em relação à saúde do ecossistema local.

É digno de nota que, de modo geral, os traçadores devem possuir as seguintes características: serem estáveis; estarem bem aderidos à fase de estudo e apresentarem uma densidade próxima a do fluido em estudo. Além disso, devem apresentar detecção inequívoca e quantificação em concentrações mínimas, serem

atóxicos ao meio, não devendo interagir com materiais do meio e nem deixar resíduos; a injeção, a detecção e a análise devem ser realizadas sem introdução de perturbações ao sistema em estudo (MACEDO, 2004; SILVA *et al.*, 2009; LOPES, 2016). Acrescentando a estas condições, os traçadores devem atender os objetivos da pesquisa, o tipo do sistema, ou seja, distância a percorrer e tempo de residência da água no sistema, assim como, os instrumentos de medição disponíveis (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Segundo Ayub (1998), não existe um traçador que pode ser considerado ideal em todas as suas características. Desta forma, é necessário escolher dentre todos os traçadores disponíveis, aquele que melhor se adequa ao trabalho a ser realizado, devendo apresentar as seguintes características:

- Não reaja com a água ou altere as propriedades químicas e físicas da mesma;
- Não se separe da água, ou seja, não precipite e nem evapore;
- Seja estável química e biologicamente na água, isto é, não sofra oxidação, redução ou decomposição;
- Não altere as propriedades do corpo hídrico;
- Que não contamine o sistema, antes durante ou depois de efetuado o ensaio;
- Possua alta solubilidade em água;
- Possa ser detectável em baixas concentrações de forma quantitativa por algum método;
- Seja de fácil manuseio;
- Não seja tóxico ao meio ambiente;
- Não apresente alto custo de aquisição e seja de fácil obtenção;
- Não exista na água que será testada;
- Possa ser utilizado em baixas concentrações por questões de toxicidade, custo e transporte.

Portanto, segundo Lopes (2016), a escolha do traçador é de crucial importância, sendo necessário o estudo detalhado das características físico/químicas de cada traçador como também das propriedades do meio em que o mesmo será injetado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esse item descreve a metodologia utilizada para os ensaios de determinação da vazão e do tempo de concentração da bacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba. Dentro disso, exigiu-se a elaboração de uma estrutura organizacional afim de nortear o planejamento e execução de cada etapa do trabalho. Dividiu-se este item em três partes, com o objetivo de expor, com mais clareza, o desenvolvimento lógico de como se efetuou cada etapa do estudo.

Na primeira parte, apresenta-se a área de estudo com as devidas caracterizações, sob os aspectos físicos, tais como: localização e propriedades físicas da microbacia hidrográfica.

Na segunda parte são apresentados os métodos utilizados nos ensaios de determinação da vazão e do tempo de concentração, a partir da injeção de substância traçadora salina.

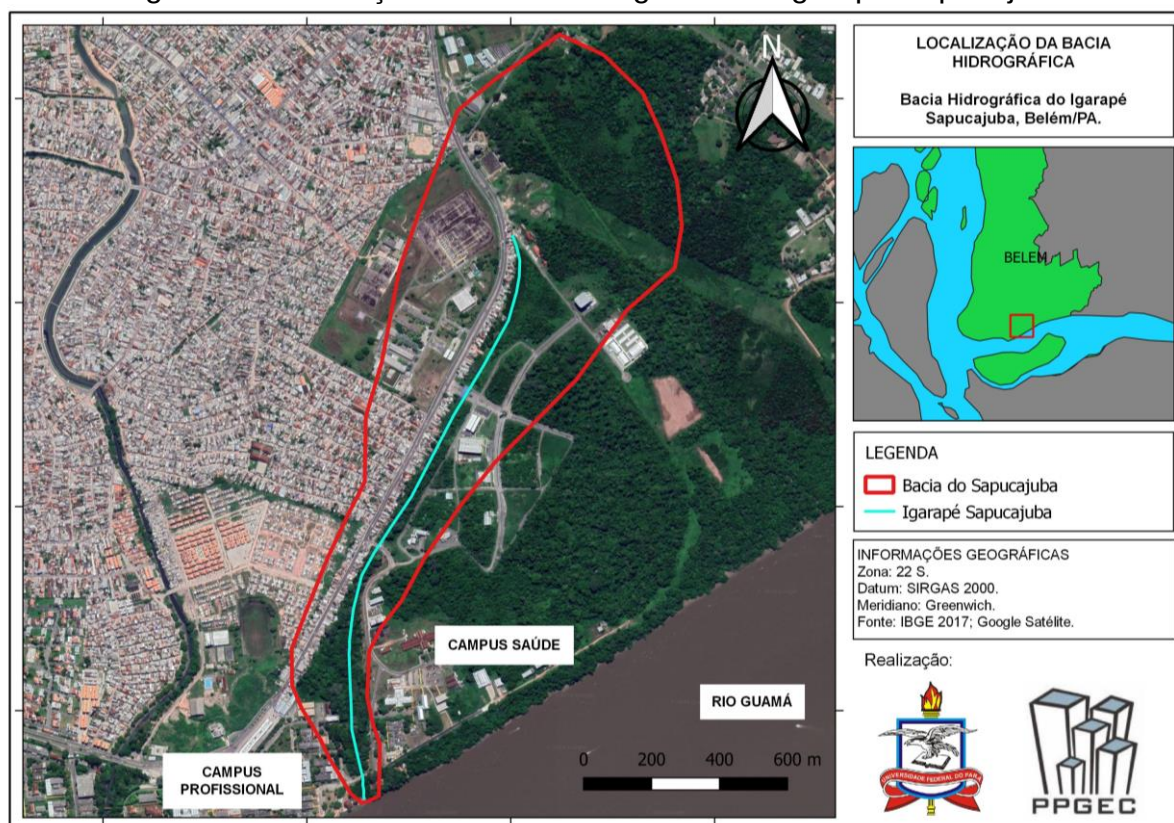
Por fim, na terceira e última parte, são apresentados os métodos empíricos e semi-empíricos para a determinação do tempo de concentração que terão os resultados destes comparados com o tempo de concentração estimado em campo, a partir da utilização de traçador salino.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Bacia Hidrográfica do Igarapé Sapucajuba

A área de abrangência do estudo compreende a Microbacia Hidrográfica do Igarapé Sapucajuba (Figura 7), que está situada no bairro da Terra Firme, município de Belém/PA. O Igarapé Sapucajuba possui o deságue no Rio Guamá, que, de acordo com a maré (forte influência de maré do Rio Guamá e da Baía do Guajará), inverte o sentido do escoamento. Mais da metade de sua área abrange o território da Universidade Federal do Pará (UFPA), mais especificamente o Campus da Saúde, o Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá (PCT Guamá) e uma pequena parte do Campus Profissional.

Figura 7: Localização da bacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba.



Fonte: Autor (2019).

Segundo Almeida e Penner (2017), a microbacia drena uma área de 986.640 m² (0,98664 km²), detendo aproximadamente 63,9% de área verde (630.389 m²), que, além disso, apresenta um coeficiente de escoamento superficial de 0,6. Da nascente até a foz do Igarapé Sapucajuba, o córrego apresenta um comprimento de aproximadamente 1,80 km, sendo sua nascente diretamente impactada pela presença de moradias irregulares localizadas ao longo da Avenida Perimetral, recebendo os efluentes domésticos dessas residências, bem como as águas pluviais provindas de parte das galerias de drenagem da Avenida Perimetral.

Às margens do igarapé, pode-se perceber que a mata ciliar, em sua maior porção, apresenta-se conservada, como é mostrado na Figura 8. Tal preservação é importante, pois, além de minimizar o arraste de sedimentos, o igarapé pertence a uma Unidade de Conservação (UC), a Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém (APA Belém), criada por meio do Decreto Estadual nº 1.551, de 03/05/1993.

Figura 8: Margens do Igarapé Sapucajuba com preservação de mata ciliar.



Fonte: Autor (2019).

Almeida e Penner (2017) observaram que mesmo inserida na área urbana do município de Belém/PA, a Microbacia do Sapucajuba possui baixa tendência a enchentes, devido às suas características físicas e ao grande percentual de preservação de áreas naturais, que colaboram para o menor escoamento superficial do volume que precipita no terreno. No entanto, pode-se observar que às margens do igarapé, principalmente as que apresentam residências sobre o leito do mesmo, possuem uma significativa quantidade de resíduos sólidos sobre sua superfície (Figura 9). O acúmulo de resíduos sólidos é prejudicial à qualidade das águas e à redução da capacidade do escoamento de água no corpo hídrico, além de proliferação de insetos e animais vetores de doenças.

Figura 9: Margens do Igarapé Sapucajuba com preservação de mata ciliar.



Fonte: Almeida e Penner (2017).

Em relação aos dados de topografia, como não foi possível a sua obtenção a partir de dados secundários de artigos científicos e de projetos de engenharia, elaborados para a infraestrutura do território da universidade, realizou-se o levantamento topográfico planialtimétrico, desde a nascente até a foz do Igarapé Sapucajuba (Figura 10), no dia 12/08/2019, com início às 09 (nove) horas, utilizando-se de uma Estação Total modelo GPT-3207N da marca TOPCON (Figura 11).

Figura 10: Levantamento topográfico planialtimétrico.



Fonte: Autor (2019).

Figura 11: Estação Total utilizada.



Fonte: Autor (2019).

Em seguida, os dados obtidos em campo foram sistematizados no programa de topografia e, posteriormente processados com o programa para Sistemas de Informações Geográficas (SIG) de código aberto, o Quantum GIS, Versão 2.9.

3.2 MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO E DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM CAMPO

3.2.1 Medição de vazão pelo Método de dissolução de sal (NaCl) ou Método Químico de Integração

Para a determinação da vazão do Igarapé Sapucajuba com dissolução de traçador salino (NaCl) foi utilizada a metodologia descrita por Pineda (2008). Em seu trabalho, Pineda (2008) injetou instantaneamente (pulso) uma solução de sal no igarapé, aproximadamente 50 m a montante do ponto onde foi medida a concentração (indiretamente através da condutividade elétrica da água, em μ -siemens, devendo ser efetuada a transformação para concentração) da nuvem do traçador, através do instrumento e do sensor de condutividade elétrica.

Esta metodologia também foi utilizada no trabalho de Bortoluzzi e Fernandez (2007), em pequenos corpos hídricos situados no Campus Marechal

Cândido Rondon, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), onde comparou este método, que o chama de Método Químico de Integração, com os demais métodos de medição de vazão, como o método volumétrico e o método área-velocidade.

No trabalho de Carvalho *et al.* (2014), esta metodologia foi utilizada no Rio do Crato, localizado na cidade de Humaitá/Amazonas, tendo resultado bem satisfatório em comparação ao método de molinete.

No caso do presente trabalho foram utilizados o instrumento e o sensor de condutividade elétrica modelo LabQuest® 2, de fabricação da empresa Vernier (ver Figura 12).

Figura 12: Instrumento e sensor de condutividade elétrica modelo LabQuest® 2.



Fonte: Autor (2019).

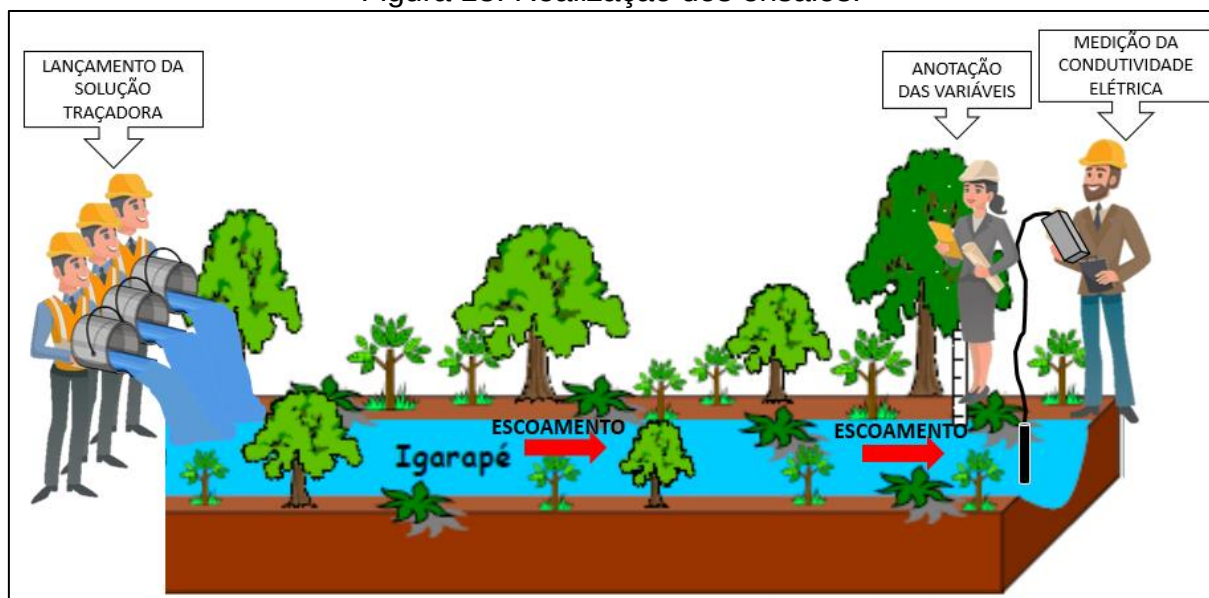
Em relação a calibração do sensor, segundo o manual do fabricante, o sensor já vem calibrado de fábrica, como se tratava do primeiro uso do sensor, checkou-se se havia algum desvio de leitura, com não houve, não foi realizada nova calibração. O sensor conta com chave seletora para 03 (três) intervalos de medição: baixo (de 0 a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$); médio (para 200 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e; alto (para 2000 a 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Para o presente trabalho, foi posicionada a chave seletora no intervalo médio.

As distâncias entre os pontos de injeção do traçador salino e a medição na nuvem de concentração, o intervalo de medição, o tempo total de medição e a massa do soluto foram adotados e testados.

Antes de realizar a injeção do traçador salino no corpo hídrico, mediu-se a condutividade elétrica das soluções injetadas (dentro de cada recipiente onde estavam as soluções totalmente dissolvidas) e do corpo hídrico onde se mediu a vazão. Deve-se destacar que, para o preparo das soluções, foram utilizadas águas do próprio corpo hídrico.

Simultaneamente a injeção da solução no rio, em forma de pulso (lançamento imediato e pontual), iniciou-se a medição da condutividade, finalizando a medição quando a concentração medida no corpo hídrico voltou a sua concentração inicial (*background*). Para a realização do experimento, precisou-se de uma equipe composta de pelo menos 05 (cinco) integrantes que dominem a metodologia utilizada (três integrantes para injetar o traçador, outro para medir a condutividade elétrica e um quinto para anotar os valores e auxiliar os demais), como ilustra a Figura 13.

Figura 13: Realização dos ensaios.



Fonte: Autor (2019).

Para a determinação da vazão do rio, utilizou-se a Equação (9) proposta por Pineda (2008).

$$Q = \frac{(c_i - c_b) \cdot V_i}{\int_0^{\infty} (c(t) - c_b) dt} \quad (9)$$

Onde:

Q – Vazão do rio, em m³/h;

c_i – Concentração do sal na solução;

c_b – Concentração do igarapé antes de injetar a solução;

$c(t)$ – Concentração no tempo t , em segundos;

V_i – Volume injetado do traçador salino, em m^3 .

3.2.2 Determinação do tempo de concentração por meio de utilização de traçador

Na determinação do tempo de concentração da Microbacia do Igarapé Sapucajuba foi utilizada metodologia similar à metodologia de medição de vazão do corpo hídrico, realizando a dissolução de traçador salino (NaCl) no corpo hídrico. No entanto, o que diferencia é que o tempo de concentração foi considerado sobre duas hipóteses: na primeira, foi considerado o t_c com sendo o tempo de viagem da nuvem de concentração do traçador, desde a injeção do traçador salino até a medição do pico de condutividade elétrica (maior valor) determinado no ponto de medição; já a segunda hipótese se diferencia por considerar o tempo desde a injeção do traçador salino até a chegada da nuvem do traçador no ponto de medição (início do aumento da condutividade). Desta forma, aproveitou-se os mesmos ensaios para determinar as duas variáveis: vazão e tempo de concentração.

Trabalho parecido foi desenvolvido por Borges *et al.* (2009), onde utilizou traçadores fluorescentes (rodamina WT e fluoresceína sódica) para determinar o tempo de residência experimental (TR) dos sistemas alagados construídos (SACs) vegetados de escoamento subsuperficial. Os SACs são, atualmente, importante opção para o tratamento de águas residuárias e controle da poluição pontual e difusa.

Nos estudos de Passos *et al.* (2015) foram realizados ensaios com traçador salino (NaCl) para a determinação do tempo de detenção hidráulica (TDH) de duas lagoas de polimento rasas para pequenas comunidades, sendo uma sem chicanas e outra com duas chicanas longitudinais e com menor profundidade. A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte – MG.

Para o presente trabalho foram necessárias as realizações de testes *in loco* em um trecho do corpo hídrico, para a determinação de tempo de ensaio, intervalo de medição instantânea e concentração da solução traçadora. Com os parâmetros definidos, foram realizados ensaios em 03 (três) trechos do corpo hídrico estudado (em duplicata).

Os ensaios foram feitos em trechos do Igarapé, pelo fato de que se fosse realizado em toda a extensão do corpo hídrico iria ser necessária uma grande quantidade de solução salina a ser lançada, podendo interferir significativamente na biota local. Adicionalmente buscou-se uma alternativa de fácil aplicação e reprodução para caso similar.

3.2.3 Campanha de ensaios de teste

Segundo Silva (2013), recomenda-se verificar a DBM (Distância de Boa Mistura) por meio de experimentos de campo, que consiste em coletar amostras simultaneamente em diferentes verticais nas seções de monitoramento e comparar as curvas de passagem dos traçadores fluorescentes em cada uma das verticais. Adicionalmente, a concentração da solução traçadora, o tempo total de medição e do intervalo de medição da condutividade poderão precisar ser ajustados conforme testes realizados em campo.

Desta forma, dois ensaios de teste foram desenvolvidos para determinar a vazão do Igarapé Sapucajuba (dias 03 e 22 de agosto de 2018), pelo período da tarde (16h26min e 18h41min, respectivamente).

No primeiro ensaio de teste, para o preparo da solução salina, foram utilizados: um balde graduado de 20 litros (sendo utilizado o volume de 18 litros de água retirada do próprio corpo hídrico); 500 g de NaCl e; instrumento multiparâmetros e o sensor de condutividade elétrica modelo LabQuest® 2, de fabricação da empresa Vernier (ver Figura 12). Determinou-se a distância de 7,5 m entre o ponto de injeção e o ponto de medição (pontos situados próximo ao portão 4 de acesso à UFPA, no Campus Saúde, ver Figura 14). A configuração do instrumento de medição ficou a seguinte: intervalo de medição de 8 segundos e; tempo total do ensaio de 416 segundos (aproximadamente 7 minutos).

Figura 14: Local para realização de campanha de ensaios de teste, perto do Portão 4 de acesso à UFPA.



Fonte: Autor (2019) adaptado de Google Earth Pro.

No segundo ensaio de teste, para o preparo da solução salina, foram utilizados: 03 (três) baldes graduados de 20 litros (sendo utilizado o volume de 15 litros em cada balde, com utilização de água do próprio corpo hídrico, ver Figura 15); 3 kg de NaCl (1 kg em cada balde) e; instrumento multiparâmetros e o sensor de condutividade elétrica. Foram despejadas as soluções traçadoras dos 03 baldes, simultaneamente. Determinou-se a distância de 11 metros entre o ponto de injeção e o ponto de medição (pontos situados próximo ao portão 4 de acesso à UFPA). A configuração do instrumento de medição ficou a seguinte: intervalo de medição de 8 segundos e; tempo total do ensaio de 1488 segundos (aproximadamente 25 minutos).

Figura 15: Preparo de solução traçadora salina.



Fonte: Autor (2019).

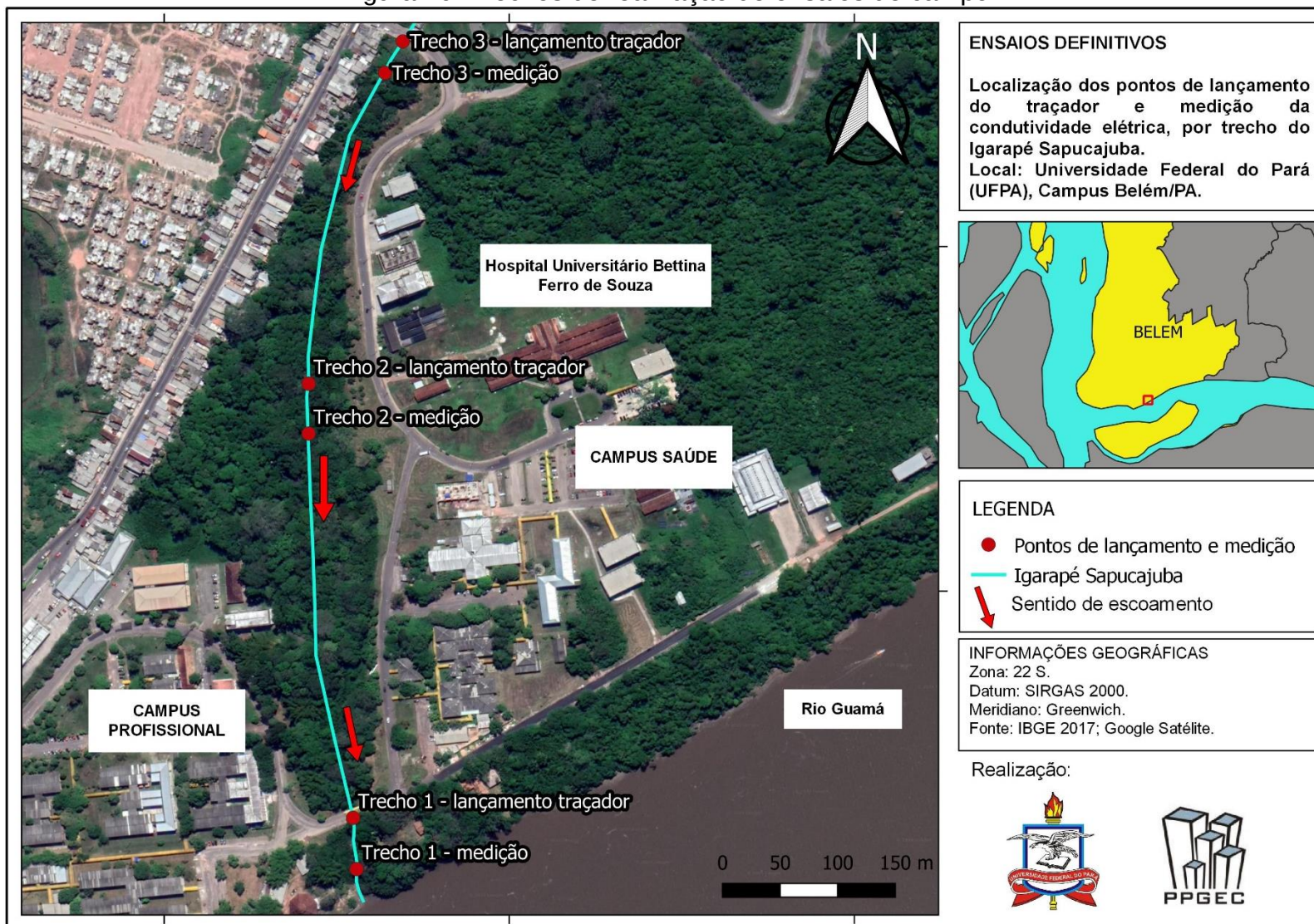
Conforme resultados dos testes, configurou-se os ensaios para posteriores determinações de vazão e de tempo de concentração, sendo que, para que a maré não interferisse nos resultados, realizaram-se as medições quando a maré estava em baixa-mar, isto é, quando o sentido do escoamento do igarapé Sapucajuba estava para o Rio Guamá. Tal consideração é importante, pois a preamar causa a redução da velocidade do escoamento da água, aumentando assim o tempo de concentração da microbacia hidrográfica.

3.2.4 Campanhas de ensaios de determinação de vazão e tempo de concentração

Após os parâmetros ajustados, realizaram-se as campanhas de ensaios de determinação de tempo de concentração e vazão, sendo estes ocorridos nos dias 09/03/2019 (no trecho 1 do corpo hídrico) e 16/03/2019 (nos trechos 2 e 3 do corpo hídrico). A localização dos trechos estudados está apresentada na Figura 16.

Esses trechos foram escolhidos devido a acessibilidade para a realização dos ensaios e para a maior distribuição espacial dos trechos estudados.

Figura 16: Trechos de realização de ensaios de campo.



Fonte: Autor (2019) adaptado de Google Earth Pro.

No dia 09/03/2019, com início às 09h e 50 min, foram realizados 02 (dois) ensaios no trecho 1 (ponte próxima da foz do igarapé Sapucajuba), sendo utilizados os seguintes componentes: 03 (três) baldes graduados de 20 litros (sendo utilizado o volume de 18 litros em cada balde, com utilização de água do próprio corpo hídrico, ver Figura 17); 3 kg de NaCl (1 kg em cada balde) e; instrumento multiparâmetros e o sensor de condutividade elétrica. Foram despejadas as soluções traçadoras dos 03 baldes, simultaneamente. Determinou-se a distância de 25 metros entre o ponto de injeção e o ponto de medição. A configuração do instrumento de medição ficou a seguinte: intervalo de medição de 1 segundos e; tempo total do ensaio de 240 segundos (aproximadamente 4 minutos).

Figura 17: Ensaios no trecho 1.



Fonte: Autor (2019).

No dia 16/03/2019, para a realização dos 02 (dois) ensaios realizados no trecho 2 (próximo ao Hospital Betina), iniciados às 13 h e 15 min, foram utilizados: 03

(três) baldes graduados de 20 litros (sendo utilizado o volume entre 15 e 17 litros em cada balde, com utilização de água do próprio corpo hídrico, ver Figura 18); 3 kg de NaCl (1 kg em cada balde) e; instrumento multiparâmetros e o sensor de condutividade elétrica. Foram despejadas as soluções traçadoras dos 03 baldes, simultaneamente. Determinou-se a distância de 29,60 metros entre o ponto de injeção e o ponto de medição. A configuração do instrumento de medição ficou a seguinte: intervalo de medição de 4 segundos e; tempo total do ensaio de 480 segundos (aproximadamente 8 minutos).

Figura 18: Ensaios no trecho 2.



Fonte: Autor (2019).

Por fim, no trecho 3, para a realização dos 02 (dois) ensaios, iniciados às 14 h e 35 min, foram utilizados: 03 (três) baldes graduados de 20 litros (sendo utilizado o volume de 16 litros em cada balde, com utilização de água do próprio corpo hídrico, ver Figura 19); 3 kg de NaCl (1 kg em cada balde) e; instrumento multiparâmetros e o sensor de condutividade elétrica. Determinou-se a distância de 19,70 metros entre o ponto de injeção e o ponto de medição. A configuração do instrumento de medição

ficou a seguinte: intervalos de medição de 5 e 10 segundos e; tempos totais dos ensaios de 1200 e 900 segundos (aproximadamente 20 e 15 minutos).

Figura 19: Ensaios no trecho 3.



Fonte: Autor (2019).

Finalizadas as medições, os dados foram retirados do sistema de aquisição do instrumento multiparâmetros e trabalhados em planilha eletrônica Microsoft Excel 2016, para interpretação e cálculos.

Para ser determinado o tempo de concentração em toda a microbacia hidrográfica foram determinados os tempos médios (considerando os tempos de início e de pico da nuvem do traçador) encontrados em cada trecho, sendo feita a relação com a distância percorrida (em metros por minuto). Após isso, os valores do tempo de concentração foram extrapolados para a bacia hidrográfica como um todo.

3.3 MÉTODOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Após a determinação do tempo de concentração por meio de utilização de traçador medido em campo, foram realizadas estimativas do tempo de concentração a partir dos métodos listados na Tabela 3, utilizando-se de dados de área de drenagem e comprimento do talvegue, extraídos do trabalho de Almeida e Penner (2017), e as cotas, a declividade e a elevação média, por meio de levantamento topográfico planialtimétrico, realizado no dia 12/08/2019, com uma Estação Total modelo GPT-3207N da marca TOPCON.

Tabela 3: Resumo dos métodos apresentados para cálculo de tempo de concentração.

Item	Método	Tipo	Urbana/Rural
1	Método de Kirpich	Estritamente empírico	Rural
2	Método de Giandotti	Estritamente empírico	Rural
3	Método de Dooge	Estritamente empírico	Rural
4	Método de Corps of Engineers	Estritamente empírico	Rural
5	Método do DNOS	Semi empírico	Rural
6	Método de George Ribeiro	Semi empírico	Rural
7	Método de Ven te Chow	Estritamente empírico	Rural
8	Método de Carter	Estritamente empírico	Urbana

Para se ter uma noção das discrepâncias entre os métodos de estimativa de tempo de concentração, foram observadas as orientações de Tomaz (2002) e Porto (1993):

- a) Cálculo da velocidade média do escoamento na bacia, comparando-a com os valores fornecidos pela Tabela 4. A velocidade média em metros por segundo foi obtida por $V=L(tc \times 60)$, sendo L em metros e t_c em segundos.
- b) Alguns parâmetros, tais como rugosidades, coeficiente de escoamento superficial são determinados com um grau de incerteza relativamente alto, sendo conveniente proceder à sensibilidade com relação a estes parâmetros.

Desta forma, para o Método de DNOS, realizou-se o teste de sensibilidade do Fator de rugosidade do terreno (k), verificando o grau de variação dos resultados, conforme se variava o fator, comparando posteriormente com os resultados medidos em campo.

Tabela 4: Velocidades médias em m/s para o Cálculo de t_c .

Descrição do escoamento	Declividade 0 a 3%	Declividade 4 a 7%	Declividade 8 a 11%	Declividade >12%
Em superfície				
Florestas	0 a 0,5	0,5 a 0,8	0,8 a 1,0	Acima de 1,0
Pastos	0 a 0,8	0,8 a 1,1	1,1 a 1,3	Acima de 1,3
Áreas cultivadas	0 a 0,9	0,9 a 1,4	1,4 a 1,7	Acima de 1,7
Pavimentos	0 a 2,6	2,6 a 4,0	4,0 a 5,2	Acima de 5,2
Em canais				
Mal definidos	0 a 0,6	0,6 a 1,2	1,2 a 2,1	-----
Bem definidos	Calcular pela fórmula de Manning			

Fonte: Tomaz (2002) apud Porto (1993).

Por fim, os resultados foram comparados, a partir do erro percentual calculado pela Equação (10) e foram identificados os métodos mais adequados para as bacias hidrográficas que apresentam características semelhantes a microbacia hidrográfica estudada, servindo de suporte para trabalhos futuros.

$$E\% = \frac{|t_{c\text{medido}} - t_{c\text{calculado}}|}{t_{c\text{medido}}} \cdot 100 \quad (10)$$

Onde:

E% – Erro percentual;

t_c medido – Tempo de concentração medido;

t_c calculado – Tempo de concentração calculado.

Tal comparação foi realizada no trabalho de Mota (2012), onde se comparou a média de t_c medidos, a partir de 30 eventos da série de chuva-vazão de uma pequena bacia experimental caracterizada por vegetação secundária de Floresta Ombrófila Mista, e os calculados com cada uma das fórmulas de estimativa morfométrica, utilizando a base de escala 1:5.000.

Outros trabalhos também realizaram a comparação entre os tempos de concentração, como o de Silveira (2005), Kobiyama *et al.* (2006), Mota-Lima *et al.* (2007), Paulino (2014) e Silveira (2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE TESTE

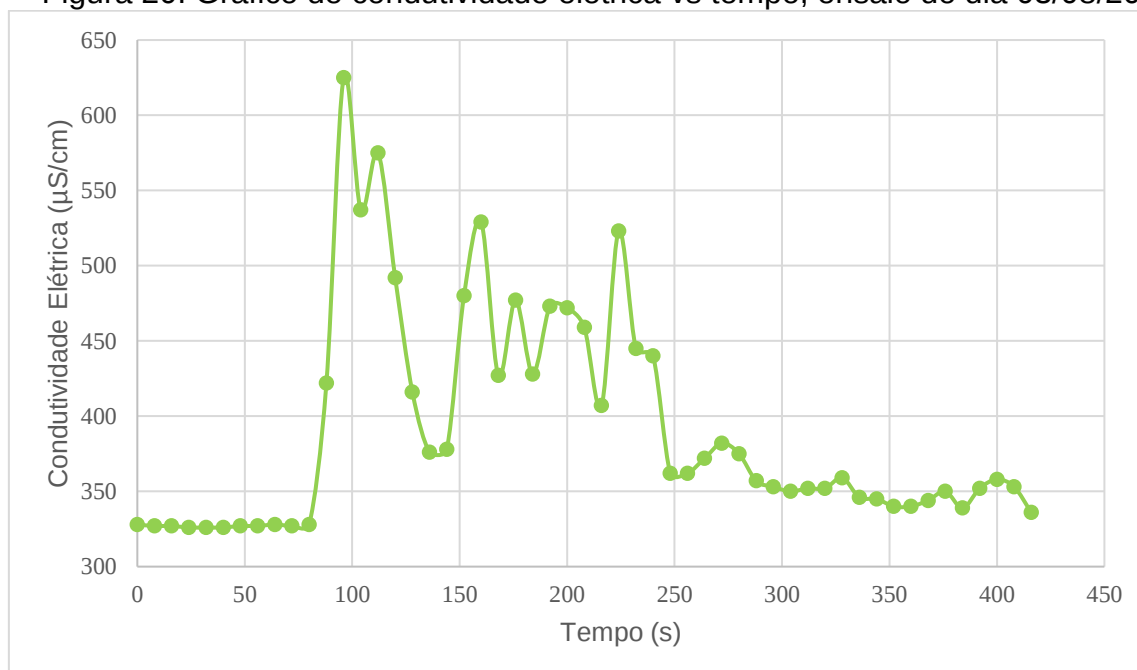
Conforme já apresentado, dois ensaios foram realizados para determinar a vazão do Igarapé Sapucajuba e determinar as variáveis necessárias para a realização dos ensaios definitivos. Tais ensaios ocorreram nos dias 03 e 22 de agosto de 2018, pelo período da tarde (16h26min e 18h41min, respectivamente), sendo os resultados apresentados a seguir.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos para este ensaio, apresentando a vazão medida. Na Figura 20 é apresentado o gráfico de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em função do tempo (segundos), obtido a partir do ensaio de campo realizado no dia 03 de agosto de 2018.

Tabela 5: Parâmetros e valores de vazão medidos, ensaio do dia 03/08/2018.

Variável	Valor	Unidade
Intervalo de medição (dt)	8	s
Tempo total de ensaio	416	s
Massa de NaCl utilizada	500	g
Condutividade elétrica do sal na solução	3988	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Concentração do sal na solução (c_i)	1994	mg/L
Condutividade elétrica do igarapé antes de injetar a solução	326	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Concentração do sal no igarapé antes de injetar a solução (c_b)	163	mg/L
Volume injetado do traçador salino (V_i)	18	L
Vazão do igarapé (Q)	2,37	L/s

Figura 20: Gráfico de condutividade elétrica vs tempo, ensaio do dia 03/08/2018.



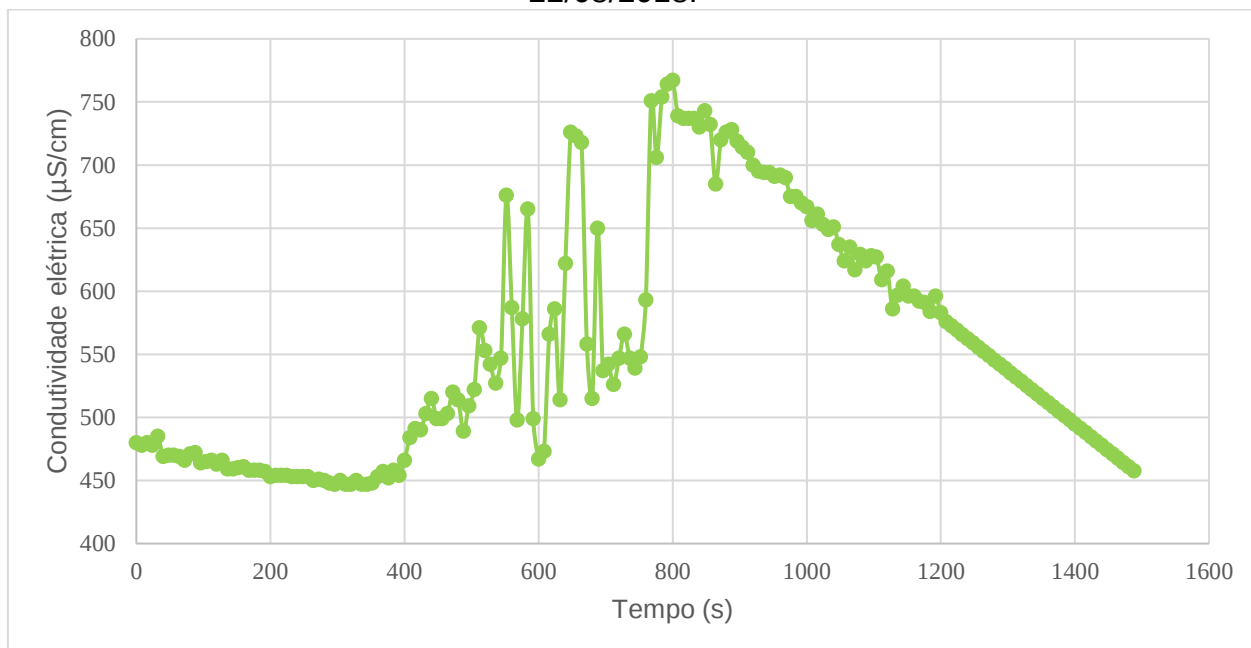
Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados obtidos para a campanha, apresentando a vazão medida. Na Figura 21 é apresentado o gráfico de condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) em função do tempo (segundos), obtido a partir do ensaio de campo realizado no dia 22 de agosto de 2018.

Tabela 6: Parâmetros e valores de vazão medidos, campanha do dia 22/08/2018.

Variável	Valor	Unidade
Intervalo de medição (dt)	8	s
Tempo total de ensaio	1488	s
Massa de NaCl utilizada	3000	g
Condutividade elétrica do sal na solução	3873	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal na solução (c_i)	1936,5	mg/L
Condutividade elétrica do igarapé antes de injetar a solução	240	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal no igarapé antes de injetar a solução (c_b)	120	mg/L
Volume injetado do traçador salino (V_i)	45	L
Vazão do igarapé (Q)	1,75	L/s

Figura 21: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, campanha do dia 22/08/2018.



Fonte: Autor (2019).

Como observado nas Tabelas 5 e 6, as variáveis como tempo total de medição, massa de NaCl utilizada e volume injetado do traçador salino foram diferentes entre os dois testes, justamente para serem verificadas quais as respostas de cada ensaio.

Conforme pode ser observado nas Figuras 20 e 21, ocorreram grandes oscilações nos valores de condutividade elétrica (nos dois ensaios de teste realizados), no trecho dos gráficos da curva que representa a passagem da nuvem do traçador. Tais oscilações podem ter ocorrido devido a distância entre os pontos ser insuficiente para que ocorra a mistura total da solução traçadora (dissolução vertical, transversal e longitudinal) ou pela não uniformidade do lançamento da substância traçadora.

Deve-se destacar que esta etapa realizada foi de suma importância para poder ter sensibilidade em relação à análise de campo, devendo atentar para os ajustes necessários, evitando assim resultados irreais, conforme recomendado por Silva (2013).

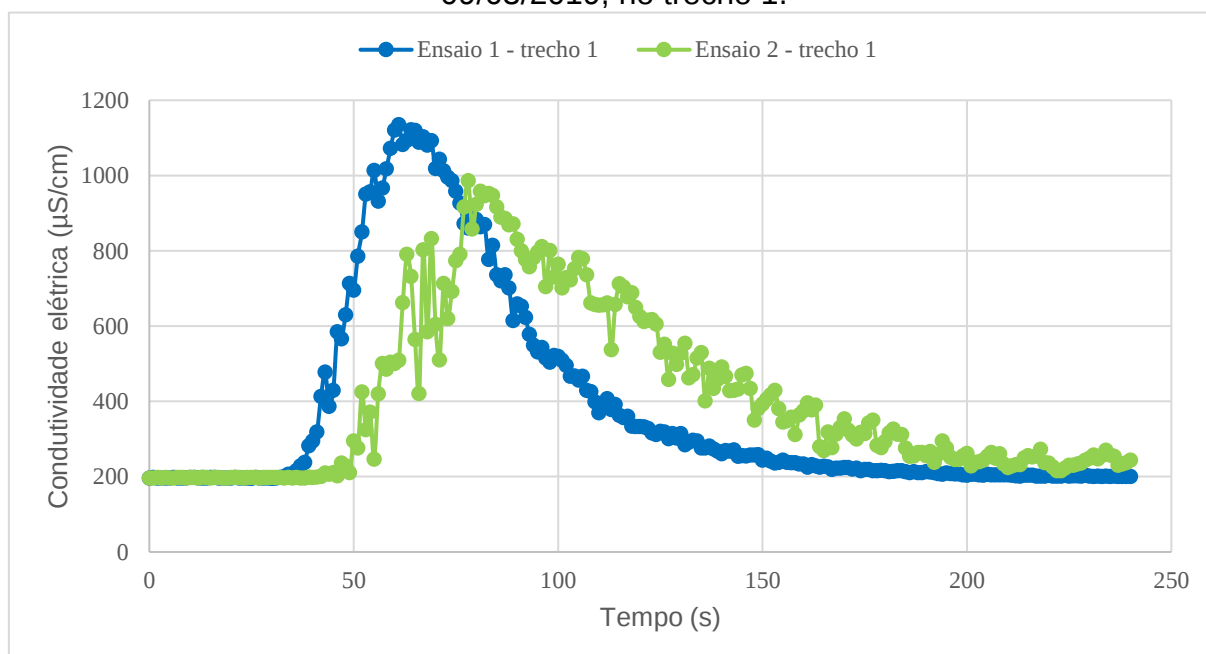
4.2 DETERMINAÇÃO DE VAZÃO E TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

De acordo com os resultados dos ensaios testes, configurou-se os ensaios para posteriores determinações de vazão e de tempo de concentração, sendo que, para que a maré não interferisse nos resultados, realizaram-se as medições quando a maré estava em baixa-mar, isto é, quando o sentido do escoamento do igarapé Sapucajuba estava para o Rio Guamá. Tal consideração é importante, pois a preamar causa o remanso, aumentando assim o tempo de concentração da microbacia hidrográfica. A seguir estão apresentados os resultados dos ensaios.

4.2.1 Ensaios do trecho 1 (09/03/2019)

Na Figura 22 é apresentado o gráfico de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em função do tempo (segundos), obtido a partir dos 02 (dois) ensaios de campo realizados no dia 09 de março de 2019, no trecho 1. Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos para a campanha, apresentando a vazão e o tempo de concentração medidos.

Figura 22: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, ensaios do dia 09/03/2019, no trecho 1.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 7: Parâmetros e valores de vazão e tempo de concentração medidos, ensaios do dia 09/03/2019, no trecho 1.

Variável	Valor (ensaio 1)	Valor (ensaio 2)	Unidade
Intervalo de medição (dt)	1	1	s
Tempo total de ensaio	240	240	s
Massa de NaCl utilizada	3.000	3.000	g
Condutividade elétrica do sal na solução	4.096	4.096	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal na solução (c_i)	2.048	2.048	mg/L
Condutividade elétrica do igarapé antes de injetar a solução	196,51	196,51	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal no igarapé antes de injetar a solução (c_b)	98,25	98,25	mg/L
Volume injetado do traçador salino (V_i)	54	54	L
Vazão do igarapé (Q)	4,67	4,07	L/s
Tempo de concentração medido (t_c): Tempo (pico) - tempo início de medição	1,017	1,300	min
Tempo de concentração medido (t_c): Tempo início de nuvem - tempo início de medição	0,550	0,700	min

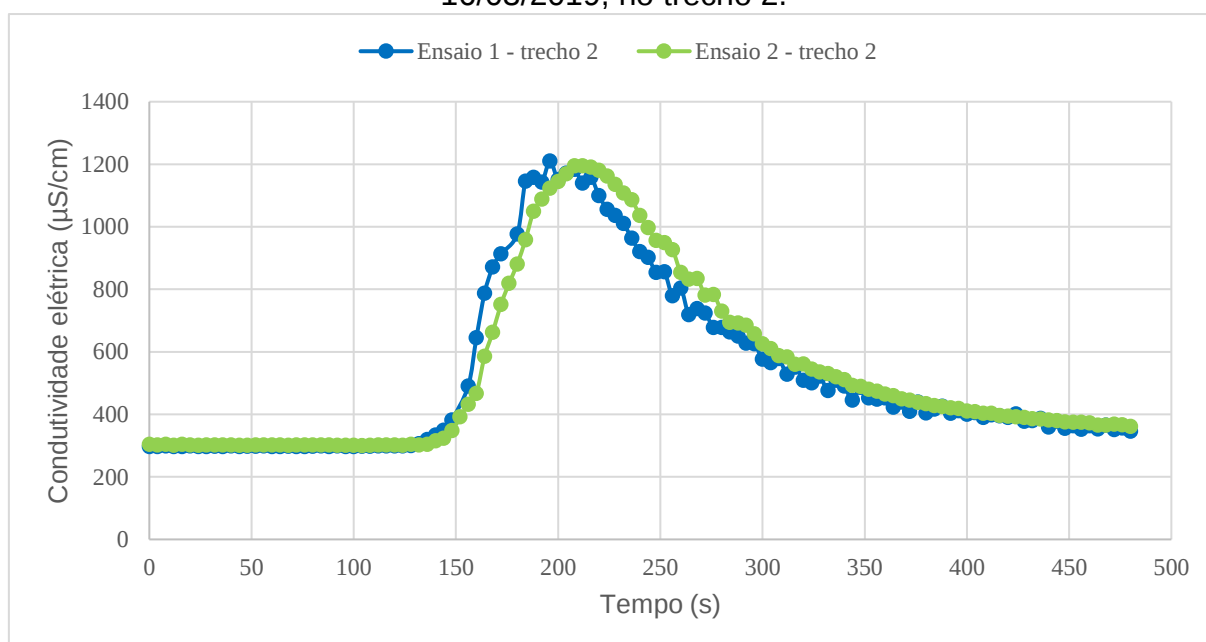
Conforme pode ser observado na Figura 22, os gráficos da nuvem do traçador se diferenciaram entre os ensaios 1 e 2, onde o ensaio 2 teve um tempo maior para a chegada da nuvem da solução (diferença de 9 segundos em relação ao ensaio 1), além de ocorrerem oscilações nos valores de condutividade elétrica, que podem ter sido ocasionadas pela não uniformidade no lançamento do traçador ou pelo intervalo de medição da condutividade elétrica.

Deve ser destacado que as linhas dos gráficos são meramente ilustrativas, não indicam tendência do comportamento do traçador.

4.2.2 Ensaios do trecho 2 (16/03/2019)

Na Figura 23 é apresentado o gráfico de condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) em função do tempo (segundos), obtido a partir dos 02 (dois) ensaios de campo realizados no dia 16 de março de 2019, no trecho 2. Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos para a campanha, apresentando a vazão e o tempo de concentração medidos.

Figura 23: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 2.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 8: Parâmetros e valores de vazão e tempo de concentração medidos, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 2.

Variável	Valor (ensaio 1)	Valor (ensaio 2)	Unidade
Intervalo de medição (dt)	4	4	s
Tempo total de ensaio	480	480	s
Massa de NaCl utilizada	3.000	3.000	g
Condutividade elétrica do sal na solução	4038	4040	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal na solução (c_i)	2019	2020	mg/L
Condutividade elétrica do igarapé antes de injetar a solução	296,26	303,442	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal no igarapé antes de injetar a solução (c_b)	148,13	151,72	mg/L
Volume injetado do traçador salino (V_i)	49,5	48	L
Vazão do igarapé (Q)	1,64	1,57	L/s
Tempo de concentração medido (t_c): Tempo (pico) - tempo início de medição	3,267	3,467	min
Tempo de concentração medido (t_c): Tempo início de nuvem - tempo início de medição	2,200	2,333	min

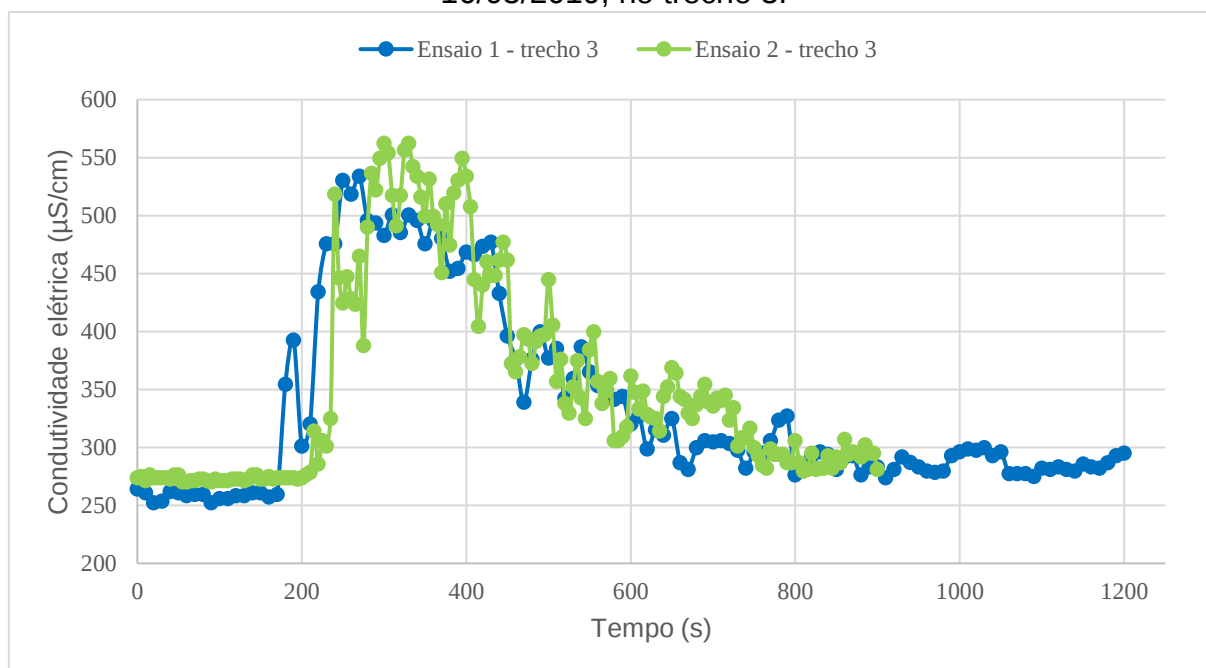
Na Figura 23, nota-se que os gráficos da nuvem do traçador medido nos dois ensaios apresentam uma menor diferença entre si do que os ensaios realizados no trecho 1, além de ocorrerem oscilações muito menores do que as identificadas no ensaio 1.

Outro ponto a ser destacado é a maior uniformidade do traçado do gráfico do ensaio 2, em relação ao ensaio 1 (trecho 2), podendo ser justificada pelo fato de parte da solução salina ter sido absorvida pelo meio ou pelo fato da solução traçadora não apresentar massa específica semelhante à do líquido em tratamento, o que pode ter ocasionado o fluxo preferencialmente vertical do sal, especialmente se a solução estava mais concentrada. Já no segundo ensaio não houve essa ocorrência.

4.2.3 Ensaios do trecho 3 (16/03/2019)

Na Figura 24 é apresentado o gráfico de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em função do tempo (segundos), obtido a partir dos 02 (dois) ensaios de campo realizados no dia 16 de março de 2019, no trecho 3. Na Tabela 9 estão apresentados os resultados obtidos para a campanha, apresentando a vazão e o tempo de concentração medidos.

Figura 24: Gráfico de condutividade elétrica em função do tempo, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 3.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 9: Parâmetros e valores de vazão e tempo de concentração medidos, ensaios do dia 16/03/2019, no trecho 3.

Variável	Valor (ensaio 1)	Valor (ensaio 2)	Unidade
Intervalo de medição (dt)	10	5	s
Tempo total de ensaio	1200	900	s
Massa de NaCl utilizada	3.000	3.000	g
Condutividade elétrica do sal na solução	3975	4001	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal na solução (c_i)	1987,5	2000,5	mg/L
Condutividade elétrica do igarapé antes de injetar a solução	264,18	273,71	$\mu\text{S/cm}$
Concentração do sal no igarapé antes de injetar a solução (c_b)	132,09	136,85	mg/L
Volume injetado do traçador salino (V_i)	48	48	L
Vazão do igarapé (Q)	2,08	2,46	L/s
Tempo de concentração medido (t_{c1}): Tempo (pico) - tempo início de medição	4,500	5,000	min
Tempo de concentração medido (t_{c2}): Tempo início de nuvem - tempo início de medição	3,000	3,417	min

Conforme pode ser observado na Figura 24, os gráficos da nuvem do traçador se diferenciaram entre os ensaios 1 e 2, onde o ensaio 2 teve um tempo maior para a chegada da nuvem da solução (diferença de 25 segundos em relação ao ensaio 1), além de ocorrerem oscilações maiores nos valores de condutividade elétrica, em comparação aos ensaios realizados nos demais trechos.

Deve ser destacado que o trecho 3 foi o mesmo trecho utilizado para a realização dos ensaios de teste, onde foram identificadas consideráveis oscilações na condutividade elétrica da nuvem do traçador salino.

4.2.4 Tempo de concentração de toda a microbacia hidrográfica

Na Tabela 10 são apresentados os resultados de cálculo do tempo de concentração para a bacia toda.

Tabela 10: Tempo de concentração medido em cambo extrapolado para toda a microbacia hidrográfica.

Trecho	Ensaio	Distância (m) Lançamento/medição	t_{c1} (min)	t_{c2} (min)	Velocidade (m/min)	
					p/ t_{c1}	p/ t_{c2}
1	1	25,0	1,017	0,550	24,582	45,455
	2	25,0	1,300	0,700	19,231	35,714
2	1	30,1	3,267	2,200	9,213	13,682
	2	30,1	3,467	2,333	8,682	12,902
3	1	19,7	4,500	3,000	4,378	6,567
	2	19,7	5,000	3,417	3,940	5,765
Toda a Microbacia		1.778,52	152,388	88,863	11,671	20,014

Conforme pode ser observado na Tabela 10, os valores de tempo de concentração para toda a microbacia tiveram uma grande diferença entre si, sendo o maior valor medido para o t_c medido a partir do t_{c1} (tempo de pico da condutividade elétrica menos o tempo inicial de medição, por trecho – 152,388 minutos), apresentando 63 minutos de diferença (71% maior) em relação ao t_c medido a partir do t_{c2} (tempo de início da nuvem de condutividade elétrica menos o tempo de início da medição, por trecho – 88,863 minutos).

Outro ponto que deve ser observado é em relação as velocidades de escoamento medidas, que tiveram o maior (45,455 m/min para o ensaio 1 do trecho 1) e o menor (5,765 m/min para o ensaio 2 do trecho 3) valores para o t_{c2} e t_{c1} , respectivamente. Utilizando desses valores de velocidades extremas, calculou-se os t_c que tiveram os valores de 39,127 minutos (velocidade máxima) e de 451,401 minutos (velocidade mínima).

4.3 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO POR MÉTODOS EMPÍRICOS E SEMI-EMPÍRICOS

4.3.1 Levantamento topográfico planialtimétrico

Como já comentado, em relação aos dados de topografia, realizou-se o levantamento topográfico planialtimétrico, desde a nascente até a foz do Igarapé

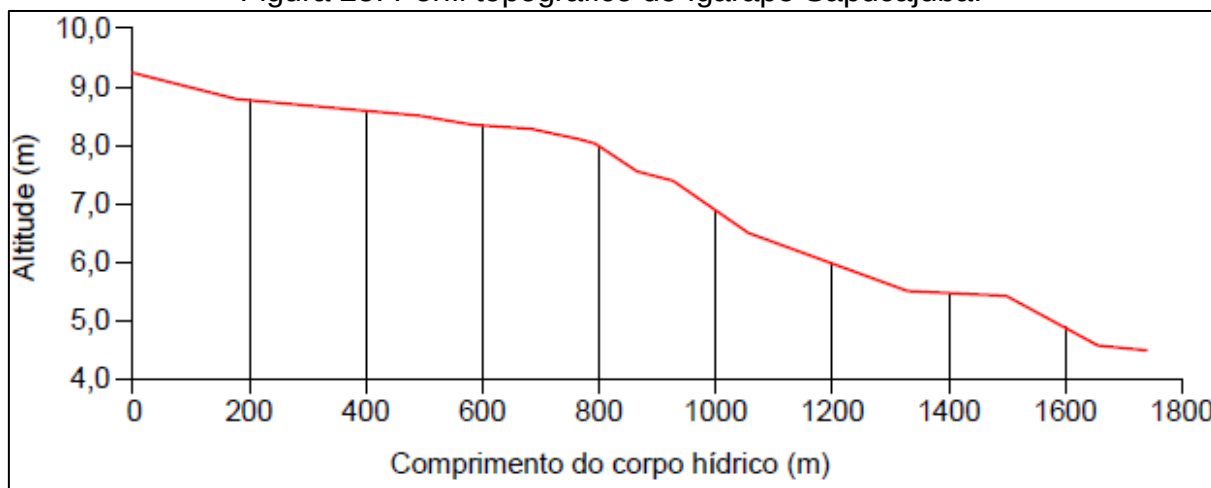
Sapucajuba, no dia 12/08/2019, utilizando-se de uma Estação Total modelo GPT-3207N da marca TOPCON.

Pela dificuldade do acesso na maior parte da extensão do corpo hídrico foi realizado o levantamento em pontos às margens do mesmo.

Em seguida, os dados obtidos em campo foram sistematizados no programa de topografia e, posteriormente processados com o programa para Sistemas de Informações Geográficas (SIG) de código aberto, o Quantum GIS, Versão 2.9, tendo como resultado o perfil longitudinal e mapa ilustrados pelas Figura 26 e Figura 26.

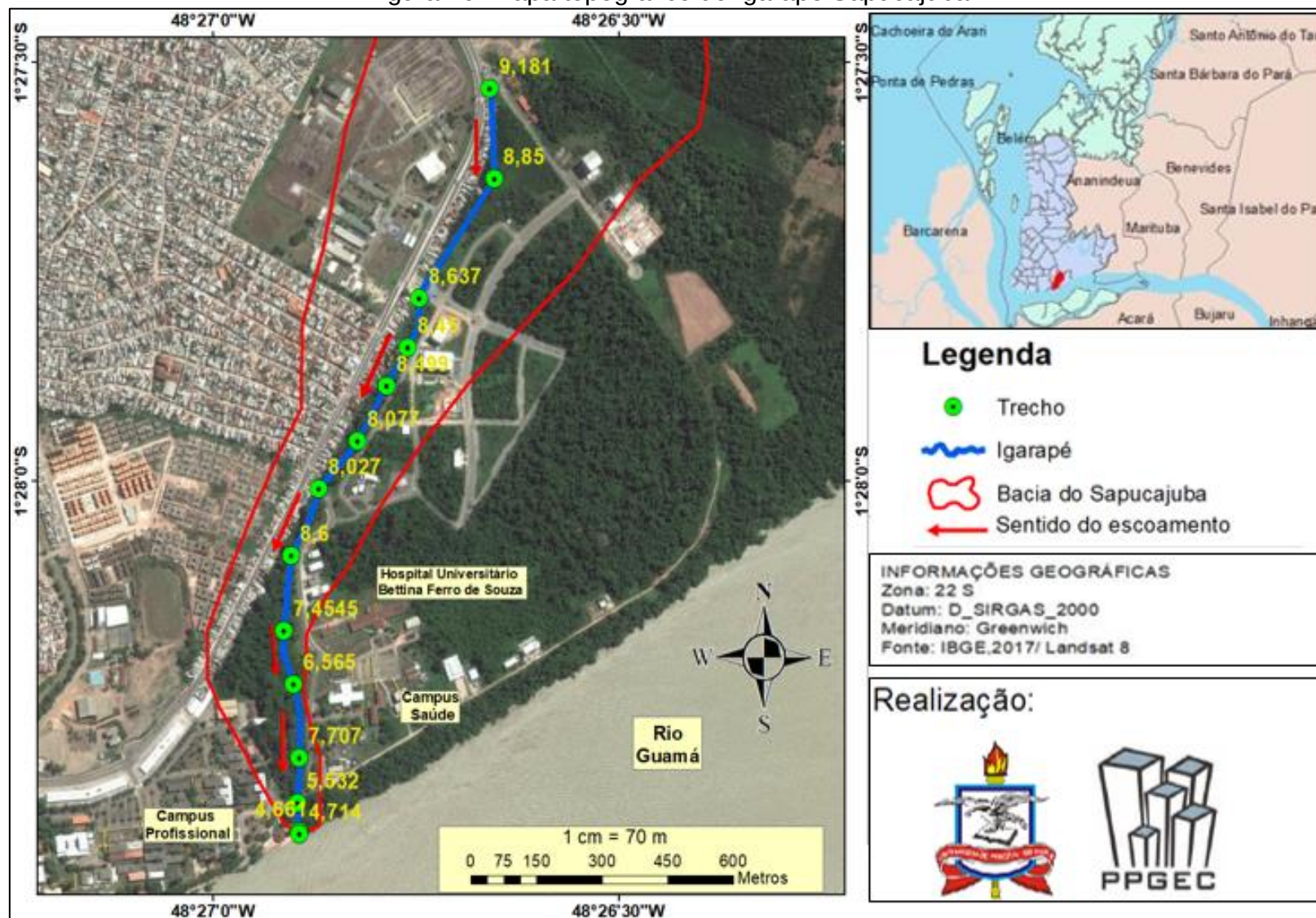
As cotas medidas na nascente e na foz (diretamente no leito do rio) foram de 9,191 e 4,661, sendo possível determinar a declividade do corpo hídrico de 0,00413 m/m.

Figura 25: Perfil topográfico do Igarapé Sapucajuba.



Fonte: Autor (2019).

Figura 26: Mapa topográfico do Igarapé Sapucajuba.



Fonte: Autor (2019).

4.3.2 Tempo de concentração estimado

De posse das características morfométricas da microbacia, o tempo de concentração foi calculado utilizando os métodos descritos na Tabela 3, estando as características morfométricas e os resultados de cálculos apresentados na Tabela 11, sendo os valores do t_c apresentados em minutos.

Tabela 11: Estimativa de t_c para os métodos empíricos.

Variável	Valor	Unidade
Comprimento do curso principal (L)	1.778,52	m
Diferença de cotas do talvegue entre o ponto mais afastado e a seção de referência da bacia (H)	7,34	m
Diferença de cotas do corpo hídrico (h)	4,52	m
Área de drenagem da bacia hidrográfica (A)	0,99	km ²
Comprimento do talvegue (Lb)	2.355,00	m
Declividade do canal principal (S)	0,00413	m/m
Declividade da Bacia (Sb)	0,0031	m/m
Fator de rugosidade do terreno (K)	3,72	—
Fração de área com mata (p)	0,64	—
Método de Kirpich	71,16	min
Método de Giandotti	207,79	min
Método de Dooge	58,08	min
Método de Corps of Engineers	50,38	min
Método de George Ribeiro	42,86	min
Método de Ven te Chow	80,41	min
Método de Carter	42,99	min

A variedade de resultados obtidos para o tempo de concentração demonstra que os métodos foram desenvolvidos em bacias específicas, com características distintas e situações diferentes entre si, sendo que algumas diferem das características da microbacia estudada.

O método que apresentou maior valor de estimativa de t_c foi o Método de Giandotti (207,79 minutos). Já os menores valores encontrados foram obtidos pelos métodos de Carter e de George Ribeiro (42,99 e 42,86 minutos, respectivamente).

Pode-se observar que na Tabela 11 não está presente o valor de t_c estimado pelo Método de DNOS, pois foi realizado o teste de sensibilidade em relação ao Fator de rugosidade do terreno (k). Para tal, utilizou-se todos os valores apresentados na Tabela 1, estando os resultados presentes na Tabela 12.

Tabela 12: Teste de sensibilidade para a estimativa de t_c para o Métodos de DNOS.

Características do terreno da bacia	k	t_c (min)
Areno-argiloso, vegetação intensa, elevada absorção	2	149,46
Comum, coberto de vegetação, absorção apreciável	3	99,64
Argiloso, coberto de vegetação, absorção média	4	74,73
Com vegetação média, pouca absorção	4,5	66,43
Em rocha, escassa vegetação, baixa absorção	5	59,73
Rochoso, vegetação rala, reduzida absorção	5,5	54,35

Nota-se que os valores de t_c obtidos para diferentes valores de k , também se diferem, sendo possível observar que o tipo de rugosidade do terreno influencia diretamente o valor do t_c , ficando evidente que quanto mais impermeável a área da bacia, menor é o tempo de concentração.

Para se ter uma noção das discrepâncias entre os métodos de estimativa de tempo de concentração, foram observadas as orientações de Tomaz (2002) e Porto (1993), sendo calculadas as velocidades médias do escoamento na bacia e as comparou com os valores fornecidos pela Tabela 4. Os resultados de cálculo estão apresentados na Tabela 13.

Considerando a declividade da bacia hidrográfica como sendo de 0 a 3% e tendo a mesma, características de bacia urbana e bacia rural, utilizou-se a média aritmética dos limites máximos de velocidade em escoamento em pastos e pavimentos (1,7 m/s). Desta forma, todos os valores calculados, utilizando os métodos, estão abaixo do limite máximo.

Tabela 13: Verificação das velocidades médias de escoamento na bacia hidrográfica.

Método	t_c (min)	Velocidade
		média (m/s)
Kirpich	71,16	0,55
Giandotti	207,79	0,19
Dooge	58,08	0,68
<i>Corps of Engineers</i>	50,38	0,59
George Ribeiro	42,86	0,92
Ven te Chow	80,41	0,37
Carter	42,99	0,69
DNOS	Areno-argiloso, vegetação intensa, elevada absorção	149,46
	Comum, coberto de vegetação, absorção apreciável	99,64
	Argiloso, coberto de vegetação, absorção média	74,73
	Com vegetação média, pouca absorção	66,43
	Em rocha, escassa vegetação, baixa absorção	59,73
	Rochoso, vegetação rala, reduzida absorção	54,35

4.3.3 Análise comparativa do t_c calculado com o t_c medido em campo

De uma forma em geral, o que se pode perceber, é que os métodos subestimaram o valor do tempo de concentração, que consequentemente superestimam a vazão do corpo hídrico quando este é o objetivo. Tal constatação é favorável a segurança na elaboração dos projetos de drenagem urbana. No entanto, deve-se ter cuidado para que a estimativa não gere inviabilidade econômica para a execução das obras.

O valor do t_c estimado pelo Método de Kirpich (talvez o mais usualmente utilizados) apresentou menor valor que o t_c medido em campo, isso pode ser explicado pelo fato da microbacia estudada ultrapassar a área limite de aplicação do método (0,5 km²). Silveira (2005) comenta que quando se extrapola sua aplicação a bacias maiores é de se esperar obter tempos de concentração menores que os reais.

O valor do t_c estimado pelo Método de Giandotti é muito maior que o valor do t_c medido em campo (t_{c2}), superestimando assim o resultado de cálculo. Tal verificação também foi feita no trabalho de Silveira (2005), que pelo fato do método

utilizar a área da bacia hidrográfica como uma variável explicativa, exibe a tendência de superestimação do tempo de concentração, independente da amplitude das áreas aceitas. Outro estudo onde foi notada a superestimação deste método foi o de Sampaio *et al.* (2016), onde estimou o t_c para 28 bacias hidrográficas do Estado do Ceará, utilizando 11 métodos de estimativa de t_c .

O valor mais próximo ao do t_{c2} foi o estimado pelo Método de Ven te Chow (80,41 minutos). Todavia em comparação ao t_{c1} , o valor ficou quase duas vezes menor.

A comparação dos resultados de cálculo de estimativa do t_c com os resultados medidos em campo, a partir do erro percentual calculado pela Equação (10), está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: Valores dos erros percentuais de cada método de estimativa de t_c .

Método		Erro percentual (E%)	
		P/ t_{c1} de toda a microbacia	P/ t_{c2} de toda a microbacia
Kirpich		53,30%	19,92%
Giandotti		36,36%	133,84%
Dooge		61,89%	34,64%
<i>Corps of Engineers</i>		66,94%	43,30%
George Ribeiro		71,88%	51,77%
Ven te Chow		47,23%	9,51%
Carter		71,79%	51,62%
DNOS	Areno-argiloso, vegetação intensa, elevada absorção	1,92%	68,19%
	Comum, coberto de vegetação, absorção apreciável	34,61%	12,13%
	Argiloso, coberto de vegetação, absorção média	50,96%	15,91%
	Com vegetação média, pouca absorção	56,41%	25,25%
	Em rocha, escassa vegetação, baixa absorção	60,77%	32,72%
	Rochoso, vegetação rala, reduzida absorção	64,34%	38,84%

Os erros de estimativa de t_c variaram entre 9,51 (Método de Ven te Chow) e 133,84% (Giandotti). Essa variação se dá pela grande variedade de bacias hidrográficas com características diferente, utilizadas para a elaboração dos métodos.

Observa-se que os erros percentuais obtidos para quase todos os métodos, em comparação ao t_{c1} , foram maiores que para os erros percentuais em relação ao t_{c2} . Desta forma, dar-se-á ênfase aos resultados deste último (t_{c2} total da microbacia) por ser o resultado mais próximo dos tempos calculados com as equações empíricas.

Na Tabela 15 são apresentados os métodos mais adequados, isto é, mais próximo aos valores medidos em campo, para a microbacia, por ordem de colocação.

Tabela 15: Métodos mais adequados para a microbacia, por ordem de grandeza.

Método	Ordem
Ven te Chow	1º
DNOS (terreno comum, coberto de vegetação, absorção apreciável)	2º
DNOS (terreno argiloso, coberto de vegetação, absorção média)	3º
Kirpich	4º
DNOS (terreno com vegetação média, pouca absorção)	5º
DNOS (terreno em rocha, escassa vegetação, baixa absorção)	6º
Dooge	7º
DNOS (rochoso, vegetação rala, reduzida absorção)	8º
Corps of Engineers	9º
Carter	10º
George Ribeiro	11º
Giandotti	12º

Conforme a Tabela 15, os dois métodos mais adequados para a microbacia estudada foram os métodos de Ven te Chow e DNOS (terreno comum, coberto de vegetação, absorção apreciável), ficando na 1ª e na 2ª colocação, respectivamente, tendo erros percentuais muito próximos entre si (9,51 e 12,13%, respectivamente). Para estes métodos também foram encontrados bons resultados no trabalho de Silveira (2005).

O método que apresentou pior resultado foi o de Giandotti (erro percentual de 133,84%), ficando na 12ª colocação, sendo que o método exibe a tendência de superestimação do tempo de concentração.

O desempenho do Método de Dooge, baseada em dados de dez bacias rurais da Irlanda, com áreas entre 140 e 930 km², deve refletir melhor o tempo de concentração em bacias onde predomina o escoamento em canais (PORTO, 1995; SILVEIRA, 2005). Diante disso, como a microbacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba possui uma baixa densidade de canais, é de esperar que o escoamento predominante seja sobre o solo, fato que pode ter afetado o desempenho da equação de Dooge, subestimando o tempo de concentração.

O método de Carter, mesmo sendo produzido para bacias urbanas, ficou na 10ª colocação, subestimando o tempo de concentração da microbacia. Tal justificativa pode ser dada pela preservação de áreas verdes, que, segundo Almeida e Penner (2017), a microbacia detém, aproximadamente, 63,9% (630.389 m²).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, determinou-se o tempo de concentração para a microbacia hidrográfica do Igarapé Sapucajuba, a partir de medições em campo, com auxílio de traçador salino (cloreto de sódio – NaCl), e com a estimativa por 8 fórmulas empíricas, que fazem uso das características morfométricas da bacia hidrográfica, sendo posteriormente comparados ao valor real de t_c , isto é, medido em campo.

O reconhecimento e levantamento detalhado das características morfométricas são fundamentais no estudo de microbacias. Apesar destas tenderem a ser mais homogêneas, uma pequena heterogeneidade pode ter um efeito maior do que teria se a bacia fosse maior, pois essa alteração poderia ser filtrada e se constataria um comportamento médio.

Em relação aos dados de topografia da microbacia, como não foi possível a sua obtenção a partir de dados secundários de artigos científicos e de projetos de engenharia, elaborados para a infraestrutura do território da universidade. Desta forma, realizou-se o levantamento topográfico planialtimétrico, desde a nascente até a foz do Igarapé Sapucajuba, tendo como resultado as cotas de 9,191 e 4,661, respectivamente, apresentando uma declividade do corpo hídrico de 0,00413 m/m.

Os resultados obtidos com os diferentes métodos revelaram uma alta variabilidade de valores de tempo de concentração para uma mesma bacia, que variaram de 42,86 a 207,79 minutos. Isso está relacionado às condições iniciais para as quais foram determinadas cada uma das fórmulas e com as variáveis que cada fórmula necessita para ser utilizada. Desta forma, deve-se utilizar os métodos corretamente, de acordo com especificidade de cada um.

Para o Método de DNOS foi realizado o teste de sensibilidade em relação ao Fator de rugosidade do terreno (k), sendo calculado o t_c para cada tipo de terreno. Desta forma, notou-se que os valores de t_c obtidos para diferentes valores de k , também se diferenciavam, sendo possível observar que o tipo de rugosidade do terreno influencia diretamente o valor do t_c , ficando evidente que quanto mais impermeável a área da bacia, menor é o tempo de concentração.

Após a verificação da velocidade médias de escoamento, observou-se que todos os valores calculados, utilizando os métodos, estão abaixo do limite máximo estipulados por Tomaz (2002) e Porto (1993).

Em comparação com o tempo de concentração medido em campo (88,863 minutos), de uma forma em geral, o que se pode perceber, é que os métodos subestimaram o valor do tempo de concentração e, como consequência, irão superestimar a vazão do corpo hídrico caso esse seja o objetivo. Tal situação é favorável a segurança na elaboração dos projetos de drenagem urbana. Contudo, deve-se ter atenção para que a estimativa não inviabilize economicamente o projeto de drenagem.

Os erros de estimativa de t_c variaram entre 9,51 (Método de Vem te Chow) e 133,84% (Giandotti), sendo o Método de Ven te Chow o mais adequado para a utilização na microbacia do Igarapé Sapucajuba. Em segunda colocação, ficou o Método de DNOS.

De posse da dificuldade de estimativa de um tempo de concentração mais próximo do real, recomenda-se a determinação deste através de ensaios de campo utilizando traçadores salinos, uma vez que a metodologia utilizada não necessidade de grandes recursos financeiros para a sua aplicação. Por outro lado, os realizadores dos ensaios precisam dominar a metodologia utilizada.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Calcular o comprimento de mistura completa do traçador e comparar os resultados dos ensaios realizados em comprimentos distintos, dentro e fora do comprimento de mistura;
- Realizar ensaios com traçadores distinto, com lançamentos por pulso e contínuo para a posterior comparação dos resultados obtidos;
- Realizar a comparação do tempo de concentração determinado por traçador salino, com o tempo de concentração determinado a partir de hidrograma;
- Realizar o levantamento batimétrico em algumas seções ao longo do Igarapé Sapucajuba;
- Elaborar equação de tempo de concentração para pequenas bacias com características semelhantes à do Igarapé Sapucajuba.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, I. R.; PENNER, G. C. Caracterização física da bacia do Igarapé Sapucajuba (Belém-PA). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29. São Paulo, 2017, **Anais [...]**. São Paulo: ABES: AESABESP, 2017.

ARAÚJO, B.A.M, *et al.* Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias urbanas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., Maceió, 2011. **Anais [...]**. Maceio; ABRHidro, 2011.

AYUB, S. **Aplicação do corante traçador fluorescente Rhodamina-WT no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas-Santana, Grilo e Zezo, município de Iporanga, Estado de São Paulo.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

BARBOSA, F. R. **Modelagem computacional do campo de diluição de emissários submarinos com suporte de técnicas de traçadores e sensoriamento remoto.** Dissertação (Mestrado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BARRELLA, W. *et al.* As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. *In*: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação.** 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BECK, H. E.; BRUIJNZEEL, L. A.; VAN DIJK, A. I. J. M.; MCVICAR, T. R.; SCATENA, F. N.; SCHELLEKENS, J. The impact of forest regeneration on streamflow *In*: 12 mesoscale humid tropical catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2613-2635, 2013.

BEDMAR, A. P. **Isotopos en Hidrologia.** Madrid: Ed. Alhambra, 1972. p. 71 – 89.

BENISCHKE, R. **Fluorescent Tracers in Hydrology, principles, instrumentation, Physico-Chemical Properties, Analytics.** [s. l.]: Institute for Geothermics & Hydrogeology, Joanneum Research, 1989.

BJ RNSTAD, T.; MAGGIO, G. E. **Radiotracer technology as applied to interwell communication in oilfields; Manuscript, IAEA:** Vienna, 2000; Rossi, P.; Ph. D. Thesis, University of Neuchâtel, 1994.

BONDELID, T. R.; MCCUEN, R. H.; JACKSON, T. J. Sensitivity of SCS models to curve number variation. **JAWRA - Journal of the American Water Resources Association**, v. 20, n. 2, p. 337–349, 1982.

BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M. D. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ROLDÃO, J. S. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos operando sob condições climáticas tropicais. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 301-310, 2009.

BORTOLUZZI, L. N.; FERNANDEZ, O. V. Q.; Medição de vazão líquida em pequenos cursos d'água de Marechal Cândido Rondon (PR). **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria (PR), v. 12, p. 4265-4275, 2008.

BRASIL. **Lei n. 9.433**: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília. Secretaria de Recursos Hídricos. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1997. 72p.

BRUTSAERT, W. **Hydrology: an introduction**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 605 p.

BUTLER, S. S. Overland-flow travel time versus Reynolds number. **J. Hydrol.**, v. 32, n. 1-2, p. 175-182, 1977.

DAEE. **Hidrologia Urbana, Primeiro Relatório Parcial**. São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica/SP, Escola Politécnica da USP, 1978. 74 p.

CANEDO, P. M. Hidrologia Superficial. *In*: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A G.; VILLA NOVA, N. A; REICHARDT, K.; CANEDO, P. M.; CLEARY, R. W. **Engenharia Hidrológica**, v. 2, ABRH. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1989.

CARNEIRO, M. E. S.; NUNES, L. S.; OLIVEIRA, V. T.; SANTOS, J. C. C.; ROCHA, D. M.; JÚNIOR, C. C. S. Delimitação automática da sub-bacia do Ribeirão Maratá em Pires do Rio-Goiás, para fins de mapeamento ambiental. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2017. p. 7629-7634.

CARTER, R. W. Magnitude and frequency of floods in suburban areas. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, v. 424-B, p. 9-11, 1961.

CASTRO, V. L. S.; LIMA, D. M.; COSTA, A. H. A.; PAZ, A. R. Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial. *In*: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015. p. 6305-6312.

CECÍLIO, R. A.; REIS, E. F. **Apostila didática**: manejo de bacias hidrográficas. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Rural, 2006. 10 p.

CHAVECA, C. S. **Resistência ao escoamento sobre o terreno**. Efeitos da macrorrugosidade e vegetação. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.

CHEN, C-N.; WONG, T. S. W. Critical rainfall duration for maximum discharge from overland plane. **J. Hydraul. Eng.**, v. 119, n. 9, p. 1040-1045, 1993.

CHRISTOFOLETTI, A.; TELES, A. P. S. S; LUPINACCI, M. C; BERTAGNA, S. M. A.; MENDES, I. A. A Morfometria do Relevo na Média Bacia do Rio Corumbataí. *In*: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5., 1993, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: Universidade Federal de Santa Maria, 1993.

CHRYSIKOPOULOS, C. V.; KRUGER P. **Chelated Indium Activable Tracers for Geothermal Reservoirs, SGP-TR-99**. California: Stanford University, 1986.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)**, Coleção ABRH; 12, 336p. 2013.

CORAPCIOGLU, M. Y.; VOGEL, J. R.; MUNSTER, C. L.; PILLARI, S. D.; DOWD, S.; WANG, S. **Water, Air, Soil Pollut.** Switzerland, v. 169, 47, 2006.

CORBET, D.R.; BURNETT, W.C.; CABLE, P. H. Tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site by Rn-222. **Jour. Hydrology**, 203, 209-227, 1997

COSTA, T. da.; LANÇA, R. **Capítulo I. Hidrologia de Superfície**. Faro: Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve. 2011.

CRISTALDO, M. F.; SOUZA, C. C. de; JESUS, L. de; OLIVEIRA, P. T. S. de; PADOVANI, C. R.; VIGANÓ, H. D. G. Previsão probabilística de enchentes para uma pequena bacia hidrográfica do Pantanal. Embrapa Pantanal. **Revista Ambiente & Água**, v.13, n. 4, ago. 2018.

CURY, J. F. **A Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas**: a Abertura de uma oportunidade para o Desenvolvimento Sustentável do Alto Paranapanema. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2002.

SILVEIRA, Geraldo Lopes da; TUCCI, Carlos E. M.; SILVEIRA, André L. L. da. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 111-131, jul./set. 1998.

DAVIS, S. N.; CAMPBELL, D. J.; BENTLEY, H. W.; FLYNN, T. J. **Groud water tracers**. Ohio: National Water Well Association Worthing, 1985. p. 86-96.

ALMEIDA, I. K. de; ANACHE, J. A. A.; ALMEIDA, V. R.; SOBRINHO, T. A. Estimativa de tempo de concentração em bacia hidrográfica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., **Anais [...]**. Rio Grande do Sul: 2013.

CARVALHO, R. R. de; TARTARI, R.; RADMANN, V.; PAGANI, C. H. Monitoramento da vazão em rios da região sul do Amazonas. **Revista EDUCamazônia**, Manaus, ano 7, v. 12, n. 1, jun/jul. p. 8-27, 2014.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA-DAEE. **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo, 2005. 116p.

DESBORDES, M.; RAOUS, P. Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques. **La houille blanche**, n. 1, p. 37-43, 1976.

DEVENS, J. A. **Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal em pequenos cursos d'água naturais com o uso de traçador ambientalmente neutro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646p.

DOOGE, J.C.I. **Synthetic unit hydrographs based on triangular inflow**. 1956. M. S. Thesis, Iowa State University, 1956. 103 f.

DOOGE, J.C.I. The linear theory of hydrologic systems. USDA, **Tech. Bull.** n. 1468, U.S. Gov. Print. Off, Washington, D.C, 327p, 1973.

DORIGUEL, F.; CAMPOS, S.; JUNIOR, O. D. Caracterização morfométrica da microbacia do córrego Maria Pires, Santa Maria da Serra, Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Energia na agricultura**, v. 30, n. 4, p. 372-377, 2015.

NASCIMENTO, T. V. do; FERNANDES, L. L. Mapeamento de uso e ocupação do solo em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 1, p. 169-177, 2017.

DROST, W.; MOSER, H. Tecnicas de “pozo unico” y de “pozo multiples” con trazadores radactivos en Hidrogeologia Subterrânea – uma revision critica. *In*: REGIONAL SEMINAR FOR LATIN AMERICA ON THE USE OF ISOTOPE TECHNIQUES IN HYDROLOGY, PROCEEDINGS. IAEA – International Atomic Energy Agency. Vienna, **Anales [...]**. p. 463-476, 1987.

DUARTE, U. **Método de determinação de vazão com o emprego de traçadores radioativos**. Dissertação (Mestrado). São Paulo: USP, 1973.

ENGLAND, M. H.; MAIER-REIMER, E. Using chemical tracers to assess ocean models. **Rev. Geophys**, 39, 29-70, 2001.

ESTEVES, R. L.; MENDIONDO, E. M. Análise comparativa entre equações e observações do tempo de concentração em uma bacia urbana de São Carlos, SP. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS – ABRH, 15., Curitiba, **Anais [...]**.Curitiba, 2003.

FANG, X.; THOMPSON, D. B.; CLEVELAND, T. G.; PRADHAN, P.; MALLA, R. Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, n. 2, p. 202-211, 2008.

FARIAS JUNIOR, J. E. F.; BOTELHO, R. G. M. Análise comparativa do tempo de concentração: estudo de caso rio Cônego, município de Nova Friburgo/RJ. *In*: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 19, 2011. Anais... Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

FONTES, A. R. M.; BARBASSA, A. P. Diagnóstico e Prognóstico da Ocupação e da Impermeabilização Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n. 2, p.137–147, abr./jun. 2003.

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher: Editora da Universidade de São Paulo, 1967. 249 p.

GERGOV, G. Determination of the time of travel along the river network. **J. Hydrol.**, v. 14, n. 3-4, p. 293-306, 1971.

GOLDENFUM, J. A., Pequenas Bacias Hidrológicas Conceitos Básicos. *In*: PAIVA, J. B. C.; PAIVA, E. M. C. D. (Org.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

GOLDSCHIEDER, N.; HALLER, L.; POTÉ, J.; WILDI, W.; ZOPFI, J. **Environ. Sci. Technol.**, 41, 5252, 2007.

GOMIDE, I. S.; BLANCO, C. J. C.; MATOS, T. R. Estudo da variabilidade dos fatores integrantes do modelo USLE para a aplicação na Bacia do Igarapé da Prata em Capitão Poço/PA. *In*: **X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Foz do Iguaçu, 2012.

GREPPI, M. **Idrologia**. 4. reimpress. Milano: Ed. Ulrico Hoepli, 2005. 371p.

HARVEY, R. W. **Microbiol. Rev.**, 20, 461, 1997.

HOTCHKISS, R.H., MCCALLUM, B.E. Peak discharge for small agricultural watersheds, **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 121, n. 1, p. 36-47, 1995.

IAEA. Radiotracer Applications in Industry: A Guidebook. **Technical Reports Series**, n. 423, Vienna, 2004.

JONES, J. A.; SWANSON, F. J. Hydrologic inferences from comparisons among small basin experiments. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 12, p. 2363-2366, 2001.

KASS, W. **Tracing Technique in geohydrology**. Berlin, Balkema, 1998.

KIBLER, D. F. Desk-top Methods for Urban Stormwater Calculation. *In*: KIBLER, D. F. (ed.). **Urban Stormwater Hydrology**, American Geophysical Union, Washington D. C., p 87-135, 1982.

KIRPICH, T. P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **J. of Civ. Eng.**, v.10, n.6, p. 362, 1940.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; LINO, J.; SILVA, R. Estimativa morfométrica e hidrológica do tempo de concentração na bacia do campus da UFSC, Florianópolis-SC. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 1., 2006, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: UFPR, p. 1-11, 2006.

KULANDAISWAMY, V. C.; SEETHARAMAN, S. A note on Barnes' method of hydrograph separation. **J. Hydrol.**, v. 9, n. 2, p. 222-229, 1969.

LEPOINT, G.; DAUBY, P.; GOBERT, S. **Mar. Pollut. Bull**, 49, 887, 2004.

LIMA, W. P.; ZAKIA M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. *In*: RODRIGUES; R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.

LIMA, D. M.; DA PAZ, A. R. Estudo do efeito da caracterização da rede de drenagem na determinação do tempo de concentração via geoprocessamento. **VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Paraíba: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hidrologia para Ingenieros**. Madrid, Ediciones del Castillo, 1967.

LIU, P. L.; TIAN, J. L.; ZHOU, P. H.; YANG, M. Y.; SHI, H. **Soil Till. Res**, 76, 147, 2004.

LOPES, Michele dos Santos *et al.* **Montagem de um canal retangular hidráulico para estudo experimental da dispersão de um traçador conservativo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP, 2016. 79 p.

LOUSADA, S. A. N.; CAMACHO, R. F. **Hidrologia, Recursos Hídricos e Ambiente: aulas teóricas**. 1. ed. Editora Universidade da Madeira. v. 230. p, 2018.

MACEDO, J. A. B. **Águas & Águas**. 2. ed. Belo Horizonte: CRQ-MG, 2004.

MACIEL, E. M. A Complexidade no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas: consumo e gestão integrada. **Revista Brasileira de Gestão e Engenharia**, n. 17, p. 122-136, 2018.

MAGGIO, G. E. **Aplicaciones Industriales de Radiotrazadores y Fuentes Selladas de Radiación**; Proyecto RLA-8-024 (ARCAL, 43). Buenos Aires: CNEA, 2000.

MARCELLINI, S. S. **Análise de critérios para a determinação das tormentas de projeto e sua influência nos hidrogramas em pequenas bacias hidrográficas**. 1994. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MATA-LIMA, H. Hydrologic design that incorporates environmental, quality and social aspects. **Environmental Quality Management**, v. 15, n. 3, p. 51-60, 2006.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007.

MATOS, M. P.; SPERLING, M. V.; MATOS, A. T.; PASSOS, R. G. Uso de traçador salino para avaliação da colmatção e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 6, p.1137-1148, 2015.

MAZIERO, L.; WERLANG, M. K. Modelado do relevo na folha topográfica de MATA-RS. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 5., 2004, Rio Grande do Sul, **Anais [...]**. Rio Grande do Sul, 2004.

MELLO, A. J. Q. **Rios e chuvas do Brasil: novos métodos e tabelas de hidrologia**. ed. do Autor. Curitiba (Paraná): Editora A. M. Cavalcante, 1973.

McCUEN, R.H.; WONG, S.L.; RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. **J. Hydraul. Eng.**, v.110, n.7, p. 887-904, 1984.

MCCURLEY, J. M. **Radiographics**, 1995, v. 15, n. 5, p. 1243.

MICHELOTTI, Deise *et al.* **Disponibilidade hídrica de pequenas bacias hidrográficas na região central do Rio Grande do Sul - indicadores regionais.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Maria (RS), Santa Maria (RS), 2015.

MOPU Tecnologia Carreteras. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. **Textos de la Direccion General de Carreteras**, Espanha, n. 12, 124 p., 1987.

MORUZZI, R. B.; CUNHA, C. M. L. da; CONCEIÇÃO, F. T. da; PEREIRA, L. H. Efeito da ocupação urbana e de obras de drenagem sobre o hidrograma de cheia de uma bacia urbanizada: o caso da bacia do Córrego da Servidão em Rio Claro, SP. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.1, p. 1 - 12, 2009.

MOSCA, A. A. O. **Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental de manejo de florestas plantadas.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. 96p.

MOTA, A. A. **Tempo de concentração em pequena bacia experimental.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MOTA, A. A.; GRISON, F.; GIGLIO, J. N.; KOBAYAMA, M. Instalação de uma pequena bacia experimental florestal: estudo de caso da bacia do Rio Araponga. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 73-80, 2016.

MULVANY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges, in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. **Proc. Inst. Civ. Eng.** (Irel.), v. 4, pt. 2, p. 18-33, 1850.

O'KELLY, J. J. The employment of unit-hydrographs to determine the flows of Irish arterial drainage channels. **Proc. Inst. Civ. Eng.** (Irel.), v. 4, n. 4, p. 365-412, 1955.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: Editora ABRH, 2001. 628 p.

PARÁ. **Decreto Lei nº 1.552, de 3 de maio de 1993.** Dispõe sobre a criação da Unidade Conservação denominada Parque Ambiental de Belém. Belém, Diário Oficial do Estado do Pará, 1993.

PASSOS, R. G.; MATOS, M. P.; DIAS, D. F. C.; SPERLING, M. V. Caracterização hidráulica de lagoas de polimento rasas para pequenas comunidades com uso de traçador salino (cloreto de sódio). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**, Rio de Janeiro, 2015.

PAULINO, P. F. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2014.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada** (apostila). Caxias do Sul (RS): UERGS, 2004.

PECLY, J. O. G. **Monitoramento ambiental do emissário submarino de Ipanema usando traçadores e técnicas geoestatísticas**. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

PEGADO, R. S. **Geotecnologia como instrumento de gestão de recursos hídrico: estudo da Bacia do Tucunduba – Belém (PA)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. 130 f.

PENNER, G. C.; MEDEIROS, J. M. T.; CASANOVA, E. S. S.; GONÇALVES, M. M.; MARTINS, R. T. A. A.; CAVALCANTE, I. C. S.; MELO, R. S.; SOUSA, J. I. S. Avaliação da capacidade de infiltração na Bacia Hidrográfica do Igarapé Sapucajuba (Belém/PA). *In*: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: 2017.

PIMENTA, R. C.; BACELLAR, L. D. A. P.; RJEILLE, M. J.; MOREIRA, R. M. Estado da arte sobre traçadores aplicados na avaliação de fugas de água em barragens. **Periódico Tchê Química**, Porto Alegre, v. 16 n. 31, 571-595p, 2019.

PINEDA, L. A. C. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma microbacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. Tese ((Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

PINTO, N. S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L.S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgar Blücher, 1976. 278p.

PORTO, R. L. L. Escoamento Superficial Direto. *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M.T. (org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. p. 107-165, (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 5)

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

RADICE, A.; GIORGETTI, E.; BRAMBILLA, D.; LONGONI, L.; PAPINI, M. On Integrated Sediment Transport Modelling for Flash Events in Mountain Environments. **Acta Geophys.**, v. 60, n. 1, p. 191-213, 2012.

RAMINHOS, C. **Experimentação e análise de resistência ao escoamento com macrorugosidades**. Évora: Universidade de Évora, 2002. (Relatório técnico).

RIBEIRO, G. Acerca do tempo de concentração: apenas um ensaio. **Revista do Clube de Engenharia**, n. 230, p. 25-31, 1955.

RIBEIRO, G. Acerca do cálculo da vazão de obras d'arte: tempo de concentração, **Revista do Clube de Engenharia**, n. 294, p. 16-19, 1961.

RIBEIRO, C. B. M. **Sistema de alerta ambiental fundamentado em estudo teórico-experimental de transporte e dispersão de poluentes solúveis em cursos d'água**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, 2007.

RIBEIRO, G. L.; BIDONE, E. D.; MELO, M. A. de; SILVA, I. P. G da. Traçadores hidrossolúveis para caracterização de reservatórios de petróleo. **Engevista**, v. 18, n. 1, p. 23-42, 2016.

RODRIGUES, F. M.; PISSARRA, T. C. T.; CAMPOS, S. Caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica do Córrego da Fazenda Glória, município de Taquaritinga, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 3, p. 310-322, 2008.

RODRIGUES, C. M.; MOREIRA, M.; GUIMARÃES, R. C. **Apontamentos para as aulas de hidrologia**. Évora: Departamento de Engenharia Rural, 2011.

ROLDÃO, J. S. F.; PECLY, J. O. G. **Dispersão de traçador em medições de vazões em tubulações**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1973.

ROLDÃO, J. S. F.; PECLY, J. O. G. **Traçadores em Hidrologia**. Rio de Janeiro: COPPE; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

ROSA, M. A.; ANGELO, C. Educação ambiental: escola e bacia hidrográfica. In: ANPED SUL-SEMINÁRIO EM PESQUISA EM EDUCAÇÃO DA REGIÃO SUL, 9., 2012, Caxias do Sul. **Anais [...]** Caxias do Sul (RS): Universidade de Caxias do Sul, 2012.

ROSSI, P.; DORFLIGER, N.; KENNEDY, K.; MULLER, L.; ARAGNO, M. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 2, 101, 1998.

SABANÉS, L. **Manejo sócio-ambiental de recursos naturais e políticas públicas: um estudo comparativo dos projetos "Paraná Rural e Microbacias"**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Faculdade de Ciências Econômicas, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

SAGARA, F. T. **Estudo hidrológico de uma pequena bacia hidrográfica experimental no município de General Carneiro-PR, através de monitoramento e modelagem**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001. 61f.

SAMPAIO, A. S.; SÁ, P. E. F.; BATISTA, T. L.; STUDART, T. M. C. Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias rurais. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 13., 2016, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ABRHidro, 2016.

SILVA, E. V. **A construção do conceito de bacia hidrográfica por alunos do ensino fundamental**: uma proposta sociointeracionista para o ensino de ciências. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D.; FREITAS, C. H.; MOREIRA, R. M.; PINTO, M. F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1576-1585, 2009.

SILVA, P. V. R. M. **Uso de traçadores fluorescentes para determinar características de transporte e dispersão no Rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Rev. Bras. Recur. Híd.**, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SILVEIRA, L. B. P. **Tempo de concentração em pequena bacia hidrográfica parcialmente urbanizada em Uberlândia-MG**. 2016. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. 86 f.

SINGH, V. P. Derivation of time of concentration. **J. Hydrol.**, v. 30, n. 1-2, p. 147-165, 1976.

SHUSTER, W.D.; BONTA, J.; THURSTON, H.; WARNEMUENDE, E.; SMITH, D. R. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. **Urban Water Journal**, v. 2, n. 4, p. 263 – 275, 2005.

SOUZA, J. C.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. **Importance of adequate appropriation of physiographic information for concentration times determination**. Revista Ambiente & Água, v. 13, n. 4, 2018.

TASCA, F. A.; FINOTTI, A.; POMPEO, C. A.; GOERL, R. F. O papel da drenagem urbana na prevenção de desastres hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Itajaí Açu. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, 2017.

TECEDOR, N.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R.; GONÇALVES, L. M. Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 594-604, 2015.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhões, MG**. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. 69p.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007.

TOSELLO, Rino N. Hydrologic studies of small basins with application to irrigation. **Bragantia**, v. 20, n. único, p. 591-615, 1961.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRS, 2001.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22 n. 63, p. 97-112, 2008.

VANDALEN, A.; WIJKSTRA. **J. Radioanal. Nucl. Chem**, 38, 223, 1977.

VITTALA, S. S.; GOVINDAIAH, S.; GOWDA, H. H. Prioritization of sub-watersheds for sustainable development and management of natural resources: an integrated approach using remote sensing, GIS and socio-economic data. **Current Science**, Índia, v. 95, n. 3, 2008.

ZHANG, X. C.; FRIEDRICH, J. M.; NEARING, M. A; NORTON L. D.; **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65, 1508, 2001.

ZHANG, X. C.; FRIEDRICH, J. M.; NEARING, M. A; NORTON L. D. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, 1508-1515, 2001.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Rev. Adm. Púb.**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. **Hydrology, Water Quantity and Quality Control**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

WONG, T. S. W. Evolution of kinematic wave time of concentration formulas for overland flow. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 7, p. 739-744, 2009.