**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

MURILO DE SOUZA FERREIRA

**Variabilidade espacial e temporal da reaeração superficial em riachos:
estimativa por meio dos métodos do traçador gasoso e da sonda solúvel
flutuante**

**São Carlos (SP)
2018**

MURILO DE SOUZA FERREIRA

**Variabilidade espacial e temporal da reaeração superficial em riachos:
estimativa por meio dos métodos do traçador gasoso e da sonda solúvel
flutuante**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

**Orientador: Prof. Dr. Davi Gasparini
Fernandes Cunha**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos (SP)

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F383v Ferreira, Murilo de Souza
Variabilidade espacial e temporal da reaeração
superficial em riachos: estimativa por meio dos métodos
do traçador gasoso e da sonda solúvel flutuante /
Murilo de Souza Ferreira; orientador Davi Gasparini
Fernandes Cunha. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de
Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2018.

1. Coeficiente de reaeração. 2. Hexafluoreto de
enxofre. 3. Ácido oxálico. 4. Qualidade da água. 5.
Riachos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **MURILO DE SOUZA FERREIRA**

Título da dissertação: "Variabilidade espacial e temporal da reaeração superficial em riachos: estimativa por meio dos métodos do traçador gasoso e da sonda solúvel flutuante"

Data da defesa: 06/04/2018

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Davi Gasparini Fernandes Cunha**

(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Julio Cesar de Souza Inacio Gonçalves**

(Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM)

Aprovado

Prof. Dr. **Daniel Jadyr Leite Costa**

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Eduardo Mario Mendiando**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Dedico esta dissertação aos meus pais José e Ana, à minha irmã Tamires e à minha noiva Vânia, que sempre me apoiaram incondicionalmente, e também ensinaram que o amor e a união vencem qualquer obstáculo existente na vida.

AGRADECIMENTOS

Em minha opinião, esta é uma das partes mais importantes desta dissertação, pois aqui se encontram as principais pessoas e fatores que me ajudaram a construir este trabalho. Então, gostaria de agradecer:

Primeiramente, agradeço a Deus pela benção e o dom da vida!

Aos meus pais, José e Ana, e à minha irmã Tamires, que sempre me incentivaram a seguir o meu caminho, e me apoiaram nas decisões tomadas. Vocês são, e sempre serão, a fonte de minha inspiração e o meu alicerce para superar todas as dificuldades.

À minha noiva Vânia, pelo amor, afeto e carinho concedidos, e também por estar sempre ao meu lado me apoiando, mesmo que isso resulte na abdicação de nosso tempo juntos.

Ao Prof. Dr. Davi Gasparini Fernandes Cunha, pela confiança em me aceitar como orientado, pela compreensão das minhas limitações profissionais, pela descontração nas conversas, pelos conselhos na vida profissional e pessoal, e principalmente, pela amizade construída ao longo desses dois anos, e que seja por toda a eternidade. Você é um amigo e um profissional exemplar e admirável!

Ao Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves, pela amizade e parceria construída desde 2012, ano em que comecei minha iniciação científica, e que consequentemente me despertou o interesse pela ciência e pelo conhecimento. Você também é um amigo e um profissional exemplar e admirável!

À toda a equipe do laboratório de Biotoxicologia de Águas Continentais e Efluentes - BIOTACE (Adriana, Wesley, Nicolas, Janaina, Henrique, Larissa, Lucas, Munique, Raphaella, Fellipe, Rômulo, Amanda, Álvaro, Flávia, Ingrid e Andressa) por tornarem o nosso ambiente de trabalho um local organizado, feliz, acolhedor e inspirador.

À Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), à Prof. Maria do Carmo Calijuri e ao Prof. Davi Gasparini Fernandes Cunha, pela ótima infraestrutura da universidade e do laboratório BIOTACE, e por estarem sempre batalhando em prol da conservação e desenvolvimento.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento (SHS), em especial à Maria Auxiliadora (Sá), Priscila, Rosemeire, André, Roberto Bérnago, pelos auxílios administrativos e técnicos prestados.

À meu amigo Me. Wesley Aparecido Saltarelli, pela sincera amizade construída ao longo desses anos, pelas conversas, opiniões, críticas e conselhos. E também pelo auxílio prestado no desenvolvimento desta dissertação, desde as atividades de campo até a escrita.

Ao meu amigo Nicolás Reinaldo Finkler, pelas conversas, companheirismo e auxílio prestado nas atividades de campo.

Aos amigos da Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM (Otávio Cappa e Luis Braga), e ao meu grande amigo e companheiro de apartamento Murilo Esposto, pelas descontraídas conversas e companheirismo nesta nossa jornada juntos que se iniciou desde a graduação.

À EMBRAPA Pecuária Sudeste, em especial ao Dr. Júlio César Palhares e ao analista Me. Carlos Eduardo Kolb Maynardes Araújo de Campos Jordão, pela parceria nas análises de cromatografia gasosa e autorização para acesso ao riacho Canchim.

À Secretaria Geral de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (SGAS) da UFSCar, pela autorização das atividades de pesquisa no riacho Fazzari, e aos colaboradores da portaria e guarda universitária da UFSCar, por terem garantido o acesso ao riacho.

Ao proprietário da Fazenda Santa Maria, por ter concedido a autorização das atividades de pesquisa e acesso ao riacho Santa Maria.

À direção do Parque Ecológico de São Carlos, por ter concedido a autorização das atividades de pesquisa e acesso ao riacho Espriado.

À CNPq, pela bolsa de mestrado concedida, e à FAPESP, pelo auxílio financeiro concedido (Processo FAPESP Nº 2016/14176-1), fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos membros participantes da banca de defesa, Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves e Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa, pela participação e observações realizadas.

À todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e não estão mencionados aqui. E também à você...! Que dedicou um tempinho para checar se seu nome está aqui!

Minhas sinceras saudações e boa leitura!

“Toda forma de saber nasce de um não saber. A gente sabe da importância da luz, no momento que a gente está no escuro!”

(Pe. Fábio de Melo)

RESUMO

FERREIRA, M. S. Variabilidade espacial e temporal da reaeração superficial em riachos: estimativa por meio dos métodos do traçador gasoso e da sonda solúvel flutuante. 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A reaeração superficial é um importante fenômeno físico responsável pela transferência de massa do oxigênio atmosférico para o curso de água, através da interface ar-água. Esse fenômeno é caracterizado quantitativamente pelo coeficiente de reaeração superficial (K_2). O K_2 pode ser influenciado por diversos fatores naturais, em especial, a turbulência, que é afetada pelas características físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água. Este coeficiente é comumente utilizado em modelos ambientais de qualidade da água, o que implica na necessidade da sua correta estimativa. A estimativa do K_2 pode ser realizada por meio de métodos e modelos de predição, entre os métodos destacam-se o traçador gasoso e a sonda solúvel flutuante. O objetivo principal desta pesquisa foi verificar a variabilidade espacial e temporal do K_2 em cinco trechos de quatro riachos tropicais localizados no município de São Carlos-SP, em um ano de amostragem. Nesses trechos foram mensuradas as principais variáveis químicas, físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água, além do K_2 e a velocidade de dissolução de uma sonda solúvel flutuante (V_S). A estimativa do K_2 ocorreu pelo método do traçador gasoso, sendo o SF_6 e o NaCl os traçadores utilizados. A estimativa do V_S ocorreu pelo método da sonda solúvel flutuante, confeccionada com ácido oxálico dihidratado e no formato esférico. Análises estatísticas de correlação (Spearman, r) e variância (Kruskal-Wallis) foram realizadas, e modelos de regressão linear simples (RLS) e múltipla (RLM) foram desenvolvidos. Os trechos apresentaram profundidades e larguras médias inferiores a 0,42 m e 3,27 m, respectivamente. A vazão e a velocidade (U) média variaram de $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $0,110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e de $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $0,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Os números de Reynolds e Froude (Fr) foram inferiores a 34070 e 0,36, respectivamente. Os K_2 variaram de $16,90 \text{ dia}^{-1}$ a $373,80 \text{ dia}^{-1}$ e os V_S , de $0,08 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $0,77 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Os resultados demonstraram variação espacial significativa e temporal não significativa para as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, e também para o K_2 e V_S . U e Fr foram as principais variáveis que se correlacionaram com o K_2 ($r > 0,68$). Um adequado modelo RLM de predição do K_2 ($R^2 = 0,75$), baseado em todas as variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas e no V_S , foi obtido. O modelo RLS, baseado apenas na relação entre K_2 e V_S , não foi adequado ($R^2 = 0,43$) para a predição do K_2 . A razão entre os fenômenos da reaeração superficial e dissolução da sonda solúvel flutuante não foi constante, e foi afetada pela turbulência na interface ar-água, o que indicou que o método da sonda solúvel flutuante ainda precisa ser aprimorado. Espera-se que, além de gerarem dados sobre um método (sonda solúvel flutuante) e tema (reaeração superficial) ainda relativamente pouco estudados em riachos tropicais, as informações apresentadas sobre as principais variáveis intervenientes no fenômeno de reaeração superficial e dissolução em riachos possam oferecer direcionamentos a estudos ambientais, especialmente àqueles que versam sobre a qualidade dos recursos hídricos.

Palavras chave: Coeficiente de reaeração. Hexafluoreto de enxofre. Ácido oxálico. Qualidade da água. Riachos.

ABSTRACT

FERREIRA, M. S. **Spatial and temporal variability of surface reaeration in streams: estimation by gas tracer and floating soluble probe methods.** 2018. 116 p. Dissertation (Master's degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

Surface reaeration is an important physical phenomenon responsible for the transfer of atmospheric oxygen mass into the water course through the air-water interface. This phenomenon is quantitatively characterized by the surface reaeration coefficient (K_2). K_2 can be influenced by several natural factors, especially turbulence, which is affected by the physical, hydrologic and hydraulic characteristics of the watercourse. This coefficient is commonly used in environmental models of water quality, which implies the need for its correct estimation. The estimation of K_2 can be performed by models of prediction and methods, among the methods the gas tracer and the floating soluble probe stand out. The aim of this research was to verify the spatial and temporal variability of K_2 in five stretches of four tropical streams located in the city of São Carlos-SP, in a year of sampling. In these stretches the main chemical, physical, hydrological and hydraulic variables of the watercourse were measured, besides K_2 and the dissolution rate of the floating soluble probe (V_s). The estimation of K_2 occurred by the gas tracer method, with SF_6 and NaCl being the tracers used. The V_s estimation was carried out by the floating probe method, made with oxalic acid dihydrate and in spherical format. Statistical analyzes of correlation (Spearman, r) and variance (Kruskal-Wallis) were performed, and simple linear regression (SLR) and multiple linear regression models (MLR) were developed. The stretches presented mean depths and widths of less than 0.42 m and 3.27 m, respectively. The flow rate and average velocity (U) ranged from $0.001 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ to $0.110 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and from 0.01 m.s^{-1} to 0.33 m.s^{-1} , respectively. The Reynolds and Froude (Fr) numbers were less than 34070 and 0.36, respectively. The K_2 ranged from 16.90 day^{-1} to 373.80 day^{-1} and the V_s , from 0.08 mm.min^{-1} to 0.77 mm.min^{-1} . The results showed significant spatial variation and a non-significant temporal variation for the physical, hydrological and hydraulic variables, as well as for K_2 and V_s . U and Fr were the main variables that correlated with K_2 ($r > 0.68$). A suitable MLR prediction model of K_2 ($R^2 = 0.75$), based on all physical, hydrological and hydraulic variables and V_s , was obtained. The SLR model, based only on the relationship between K_2 and V_s , was not adequate ($R^2 = 0.43$) for K_2 prediction. The ratio between the phenomena of surface reaeration and dissolution of the floating soluble probe was not constant and was affected by turbulence at the air-water interface, which indicated that the floating soluble probe method still needs to be improved. It is expected that, in addition to generating data on a method (floating soluble probe) and surface (surface reaeration) that are still relatively little studied in tropical streams, the information presented on the main variables involved in the phenomenon of surface reaeration and dissolution in streams may offer environmental studies, especially those dealing with the quality of water resources.

Keywords: Reaeration coefficient. Sulfur hexafluoride. Oxalic acid. Water quality. Streams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da configuração metodológica do lançamento do soluto conservativo (NaCl) que foi utilizado para medida da vazão e velocidade nos trechos dos riachos	52
Figura 2 - Esquema da aplicação do método do traçado gasoso, lançamento dos traçadores, coleta das amostras nas estações de amostragem nos trechos dos riachos e o intervalo ideal para amostragem e coleta das amostras de água.....	55
Figura 3 - Procedimentos utilizados para a confecção da sonda solúvel flutuante no formato esférico. A - Ácido oxálico dihidratado; B - Molde metálico desacoplado; C - Molde metálico acoplado sendo prensado; D - Esferas com hastes metálicas fixadas e suportes flutuantes; E - Vista detalhada de uma esfera e um suporte flutuante e F - Sonda solúvel flutuante no formato esférico pronta para uso	57
Figura 4 - Detalhes da sonda solúvel esférica flutuante condicionada com ácido oxálico dihidratado: (A) sonda confeccionada; (B) esquema em corte transversal da sonda solúvel flutuante sobre a água	58
Figura 5 - Esquema da aplicação da metodologia da sonda solúvel flutuante nos trechos dos riachos estudados	58
Figura 6 - Precipitação total mensal (mm) no município de São Carlos (SP), entre ago/16 e ago/17 na estação meteorológica A-711 de observação de superfície automática do INMET, e média histórica (1961 - 1990) dos diferentes meses do ano.....	63
Figura 7 - Temperatura média mensal do ar (°C) no município de São Carlos (SP), entre ago/16 e ago/17 na estação meteorológica A-711 de observação de superfície automática do INMET e média histórica (1961 - 1990) dos diferentes meses do ano	64
Figura 8 - Largura média dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo.....	65
Figura 9 - Profundidade média dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo.....	66
Figura 10 - Vazão dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo.....	67

Figura 11 - Velocidade média dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo	68
Figura 12 - Número de Reynolds dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo	69
Figura 13 - Número de Froude dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo	70
Figura 14 - Gráficos comparativos entre os K_2 modelados e mensurados. (A) K_2 modelado pelo RLM1; (B) K_2 modelado pelo RLM2; (C) K_2 modelado pelo RLM3; (D) K_2 modelado pelo RLM 4; (E) K_2 modelado pelo RLM5; (E) K_2 modelado pelo RLM6 e (G) K_2 modelado pelo RLS7.....	81
Figura 15 - Razão entre K_2 e K_S e a relação com a velocidade média do escoamento da água nos trechos dos riachos estudados	91
Figura 16 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês ago/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ	101
Figura 17 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_S) nos cinco trechos estudado no mês de ago/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ	102
Figura 18 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês out/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ	103
Figura 19 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_S) nos cinco trechos estudado no mês de out/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ	104
Figura 20 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês jan/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ	105

<p>Figura 21 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de jan/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	106
<p>Figura 22 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês mar/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	107
<p>Figura 23 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de mar/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	108
<p>Figura 24 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês mai/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	109
<p>Figura 25 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de mai/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	110
<p>Figura 26 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês jun/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	111
<p>Figura 27 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de jun/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	112
<p>Figura 28 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês jul/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ.....</p>	113

Figura 29 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_S) nos cinco trechos estudado no mês de jul/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ 114

Figura 30 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês ago/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ 115

Figura 31 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_S) nos cinco trechos estudado no mês de ago/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ 116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de predição do K_2 (s^{-1}) desenvolvidos por Melching e Flores (1999) com as condições de vazão em que podem ser aplicador e o coeficiente de determinação obtido (R^2).....	35
Tabela 2 - Faixas de K_2 (dia^{-1}) e métodos utilizados na estimativa de tal coeficiente, obtidos em cursos de água de diversas regiões do mundo	38
Tabela 3 - Principais modelos de predição do K_2 (dia^{-1}) obtidos por diversos autores em diferentes condições físicas e hidrológicas do escoamento da água, e as suas faixas de aplicação.....	40
Tabela 4 - Fatores de conversão (R) do K_T para K_2 dos principais traçadores gasosos	43
Tabela 5 - Principais informações sobre os trechos dos riachos, incluindo nome do riacho, coordenadas geográficas, extensão do trecho (X), distância das estações de amostragem (Δx), características principais e fotografia	50
Tabela 6 - Resumo das metodologias que foram utilizadas para caracterização climatológica, hidrológica e hidráulica nos trechos dos riachos que foram estudados.....	51
Tabela 7 - Resumo das metodologias que foram utilizadas para caracterização das principais variáveis da água, a fim de caracterizar os trechos dos riachos que foram estudados.....	53
Tabela 8 - Principais informações e propriedades físico-químicas dos traçadores que foram utilizados na aplicação do método do traçador gasoso nos trechos dos riachos	54
Tabela 9 - Resumo das variáveis dependentes e independentes que foram utilizadas para a elaboração de cada modelo RLM e do modelo RLS	61
Tabela 10 - Resultados das variáveis da água nos trechos dos riachos estudados, no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo.....	72
Tabela 11 - Coeficientes K_2 , corrigidos para a temperatura padrão de 20°C, dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo.....	74

Tabela 12 - Valores de V_S corrigidos para a temperatura padrão de 20°C, dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo 76

Tabela 13 - Teste de Kruskal-Wallis realizado para as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, K_2 e V_S , considerando os fatores espacial e temporal. Os casos em que houve diferença significativa ($p < 0,05$) foram destacados em negrito..... 77

Tabela 14 - Correlações de Spearman entre as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, V_S e K_2 dos trechos dos riachos. Os coeficientes estatisticamente significativos foram destacados em negrito 78

Tabela 15 - Modelos RLM e RLS, de predição do K_2 , desenvolvidos com os dados logaritimizados e baseados nas variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, e também V_S dos trechos dos riachos 79

Tabela 16 - Comparação entre trabalhos que estimaram a reaeração superficial de cursos de água com diferentes faixas de vazão (Q) e velocidade do escoamento da água (U), e utilizaram o método do traçador gasoso..... 83

Tabela 17 - Comparação entre geometria, composto solúvel e variação de V_S obtidos em trabalhos que utilizaram o método da sonda solúvel flutuante em diferentes escalas e velocidades do escoamento da água (U) 86

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Abr	Abril
Ago	Agosto
CAS	<i>Chemical Abstracts Service</i>
ECD	Detector por Captura de Elétrons
FID	Detector por Ionização de Chama
Dez	Dezembro
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
SP	Estado de São Paulo
EUA	Estados Unidos da América
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
SE	Erro padrão
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
Fev	Fevereiro
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Jan	Janeiro
Jun	Junho
Jul	Julho
BIOTACE	Laboratório de Biotoxicologia de Águas Continentais e Efluentes
Mar	Março
Mai	Maio
Nov	Novembro
OD	Oxigênio Dissolvido
Out	Outubro
RLM	Regressão Linear Múltipla
RLS	Regressão Linear Simples
Set	Setembro
ESP1	Trecho 1 do riacho Espraiado
ESP2	Trecho 2 do riacho Espraiado
CAN	Trecho do riacho Canchim
SMA	Trecho do riacho Santa Maria
FZZ	Trecho do riacho Fazzari
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

USP	Universidade de São Paulo
UFSJ	Universidade Federal de São João Del-Rey

LISTA DE SIMBOLOS

$A_{(t)}$	Área superficial do sólido solúvel em determinado tempo
A_0	Área superficial inicial do sólido solúvel
g	Aceleração da gravidade
H_m	Altura hidráulica
$A_{g(x)}$	Área do cromatograma na posição x
$A_{g(0)}$	Área do cromatograma na posição $x=0$
K_2	Coeficiente de reaeração superficial
K_S	Coeficiente de dissolução da sólido solúvel
H_e	Constante de Henry
C_{sat}	Concentração de saturação do oxigênio dissolvido no meio líquido
$K_{2(20^\circ C)}$	Coeficiente de rearação superficial a $20^\circ C$
R^2	Coeficiente de determinação
C_{OD}	Concentração de oxigênio dissolvido
TOC	Concentração de carbono orgânico total
CE	Condutividade elétrica da água
SS	Concentração de sólidos suspensos no meio líquido
K_T	Coeficiente de dessorção de um gás traçador
C_g	Concentração do gás traçador no curso de água
C_C	Concentração do traçador conservativo no curso de água
NaCl	Cloreto de sódio
ϕ	Coeficiente de correção da temperatura para o fenômeno da dissolução
C_R	Concentração background do traçador conservativo no curso de água
C_P	Concentração do traçador conservativo ao atingir o <i>plateau</i> de um curso de água
L_M	Comprimento de mistura dos traçadores no curso de água
D_L	Coeficiente de dispersão longitudinal
K_{SF_6}	Coeficiente de dessorção do SF_6
β_n	Coeficiente parcial de regressão
r	Coeficiente de correlação de Spearman
θ	Coeficiente de correção da temperatura para o fenômeno da reaeração superficial
I	Declividade do curso de água
D_0	Diâmetro médio inicial do sólido solúvel
D	Diâmetro médio do sólido solúvel

Δx	Distância entre as estações de amostragem
X	Extensão total do trecho do riacho
R	Fator de conversão do fenômeno da dessorção para reaeração superficial
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
β_0	Intercepto
L	Largura média do curso de água
M_g	Massa do gás traçador injetada no curso de água
M_C	Massa do traçador conservativo injetada no curso de água
M	Massa do sólido solúvel
M_0	Massa inicial do sólido solúvel
Re_y	Número de Reynolds
Fr	Número de Froude
p_p	Pressão parcial do gás
Y	Profundidade média do curso de água
P_{atm}	Pressão atmosférica
P	Precipitação
pH	Potencial hidrogeniônico
p	Probabilidade de significância
R_H	Raio hidráulico da seção do escoamento
$T_{água}$	Temperatura da água
t	Tempo
T_{ar}	Temperatura do ar
$Turb$	Turbidez
V_S	Velocidade de dissolução
U	Velocidade média do escoamento da água
Q	Vazão do curso de água
$V_{S(20^\circ C)}$	Velocidade de dissolução a 20°C
Q_T	Vazão de injeção do traçador conservativo no curso de água
ν	Viscosidade cinemática da água
W	Variável dependente a ser prevista
X_n	Variáveis independentes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
2 OBJETIVOS.....	31
3 REVISÃO DA LITERATURA	33
3.1 Reaeração superficial	33
3.1.1 Métodos de estimativa do K_2	36
3.1.2 Modelos de predição do K_2	39
3.1.3 Método do Traçador Gasoso	41
3.1.4 Método da Sonda Solúvel Flutuante	44
4 MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1 Caracterização dos trechos dos riachos	49
4.2 Variáveis climatológicas, hidrológicas e hidráulicas	51
4.3 Variáveis da água.....	52
4.4 Aplicação do método do traçador gasoso.....	53
4.4.1 Traçadores utilizados.....	53
4.4.2 Coleta das amostras de água nos trechos.....	55
4.4.3 Análise cromatográfica e estimativa do coeficiente de reaeração superficial....	56
4.5 Aplicação do método da sonda solúvel flutuante.....	57
4.6 Análises estatísticas.....	60
4.6.1 Desenvolvimento de um modelo de predição para o K_2	60
5 RESULTADOS.....	63
5.1 Variáveis climatológicas e pressão atmosférica.....	63
5.2 Variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas	64
5.2.1 Largura e profundidade.....	64
5.2.2 Vazão e velocidade.....	66
5.2.3 Números de Reynolds e Froude	68
5.3 Variáveis da água.....	70

5.4 Coeficientes de reaeração superficial	73
5.5 Velocidades de dissolução da sonda solúvel flutuante.....	75
5.6 Resultados das análises estatísticas	77
6 DISCUSSÃO	83
6.1 Variação espacial e temporal do K_2	83
6.2 Variação espacial e temporal do V_s	85
6.3 Correlação entre K_2 e V_s	88
7 CONCLUSÃO.....	93
REFERÊNCIAS	95
APÊNDICE 1	101
APÊNDICE 2	103
APÊNDICE 3	105
APÊNDICE 4	107
APÊNDICE 5	109
APÊNDICE 6	111
APÊNDICE 7	113
APÊNDICE 8	115

1 INTRODUÇÃO

O oxigênio dissolvido (OD) é um importante parâmetro químico de caracterização da qualidade da água de ecossistemas aquáticos lênticos e lóticos (PINHEIRO; FAHT; SILVA, 2012). Entre os diversos processos naturais que ocorrem em um curso de água, a reaeração superficial e a fotossíntese são os principais fenômenos responsáveis por introduzir OD no meio líquido, entretanto a biodegradação da matéria orgânica é um dos principais processos que reduzem o OD disponível no meio.

As águas residuárias, ricas em matéria orgânica e originadas por atividades antrópicas, são frequentemente lançadas em cursos de água receptores para serem diluídas (COSTA, 1999). A matéria orgânica sofre um processo de biodegradação natural promovido, em sua maior parte, pela ação de microrganismos aeróbios. Este processo geralmente ocasiona um decréscimo na concentração de OD e pode prejudicar a biota aquática (COSTA, 1999). A reintrodução de OD no curso de água é realizada, principalmente, pela reaeração superficial, até que as condições naturais de OD, ou próximas às originais do curso de água, sejam reestabelecidas.

A reaeração superficial é um fenômeno físico-químico de transferência de massa de oxigênio na interface ar-água, e pode ser quantificada por um coeficiente denominado K_2 . O K_2 é um importante coeficiente utilizado como variável de entrada em modelos matemáticos de qualidade da água (e.g., SALLA et al., 2013; MENEZES et al., 2015; GONÇALVES et al., 2017) e metabolismo aquático (e.g., RILEY; DODDS, 2013; DEMARS; THOMPSON; MANSON, 2015), o que implica na necessidade de uma estimativa confiável deste coeficiente.

Nos rios e riachos, o K_2 é comumente estimado por meio de modelos de predição, que o correlacionam com as principais características físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água. Embora existam diversos modelos de predição (e.g., JHA; OJHA; BHATIA, 2001, 2004; KALBURGI et al., 2015) e métodos para estimativa do K_2 (e.g., COX, 2003b), o método de traçador gasoso é o que possui uma maior confiabilidade e acurácia, apesar de ser dispendioso, pois exige equipamentos sofisticados (BICUDO; JAMES, 1989).

Outro método para estimativa do K_2 é a sonda solúvel flutuante, que possui um menor custo e fácil aplicabilidade (BICUDO; JAMES, 1989). Tal método consiste em estimar indiretamente o K_2 por meio da velocidade de dissolução (V_s) de um

sólido solúvel fluando no escoamento da água (BICUDO; JAMES, 1989; GIORGETTI; SCHULZ, 1990). Os precursores deste método investigaram intensivamente, com diferentes compostos químicos, níveis de turbulência e formatos geométricos, o comportamento da dissolução de sondas solúveis, e concluíram que o método possui potencial, porém aprimoramentos ainda são necessários.

A variação espacial e temporal do K_2 em rios e riachos ainda é relativamente pouco estudada e existem diversas lacunas de pesquisa a serem preenchidas. Até o momento, vários pesquisadores estimaram o K_2 em diversos rios e riachos mais frequentemente localizados em áreas temperadas do Hemisfério Norte (e.g., TYROLLER et al., 2010; BENSON et al., 2014; KNAPP; OSENBRÜCK; CIRPKA, 2015). Entretanto, os resultados demonstraram variações significativas nos K_2 obtidos em diferentes cursos de água (e.g., relacionados com os aspectos físicos e hidráulicos do escoamento) e sob condições ambientais contrastantes (e.g., aspectos meteorológicos e hidrológicos).

Esta pesquisa integrou um projeto financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Processo 2016/14176-1), intitulado *“Retenção de macronutrientes por riachos do Cerrado (SP) e sua relação com o metabolismo aquático em gradiente de condições ambientais: uma abordagem sobre os serviços ecossistêmicos”*, parceria entre a Universidade de São Paulo (EESC-USP), Universidade Federal de São João del-Rey (UFSJ) e Kansas State University (Estados Unidos).

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi investigar a variação espacial e temporal do K_2 de riachos tropicais caracterizados por diferentes condições ambientais (e.g., usos e ocupação das microbacias, diferentes características físicas, hidrológicas e hidráulicas entre outras), a fim de fornecer subsídios para aprimoramentos metodológicos e também gerar informações para estudos ambientais. Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Estimar os K_2 e V_S dos trechos dos riachos, com o uso do método do traçador gasoso e da sonda solúvel flutuante, respectivamente;
- ii. Mensurar as principais variáveis da água (i.e., químicas, físicas, hidrológicas e hidráulicas) nos trechos dos riachos, e verificar a influência destas sobre os K_2 e V_S ;
- iii. Avaliar a influência da variação espacial (i.e., em diferentes riachos) e temporal (i.e., em diferentes estações do ano) sobre os K_2 e V_S , e também avaliar o aprimoramento do método da sonda solúvel flutuante na estimativa indireta do K_2 ;
- iv. Desenvolver modelos de predição para o K_2 baseado nas variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas e os V_S dos trechos dos riachos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Reaeração superficial

A reaeração superficial é um fenômeno físico-químico de transferência de massa de oxigênio atmosférico para os cursos de água através da interface ar-água e se processa, em diferentes magnitudes, em ecossistemas lênticos e lóticos. É um fenômeno frequentemente estudado por pesquisadores de todo o mundo, em especial, em regiões do Hemisfério Norte, e também é utilizado em processos na engenharia industrial, química, sanitária, geofísica, sistemas ambientais entre outras (GUALTIERI; DORIA, 2008; JANZEN; SCHULZ; LAMON, 2008).

A transferência de massa de oxigênio ocorre por meio da recirculação das moléculas de oxigênio entre o meio líquido e o atmosférico (interface ar-água) devido à ação de dois principais mecanismos físico-químicos, sendo eles: a difusão molecular e a turbulenta. Na difusão molecular, o meio líquido encontra-se praticamente estagnado (e.g., lagos e reservatórios), e a taxa de espalhamento do gás é lenta e uniforme por todo o espaço disponível (GUALTIERI; DORIA, 2008). A difusão turbulenta é um mecanismo de troca gasosa mais eficiente e rápido com relação ao de difusão molecular, pois envolve a criação de interfaces, denominadas turbilhões, que promovem uma maior mistura e conduzem o gás para várias profundidades da meio líquido (von SPERLING, 2014).

Diversas variáveis são utilizadas na representação da turbulência em cursos de água, sendo as mais comuns, a velocidade média, vazão, e os números de Reynolds e Froude. O número de Reynolds representa a razão entre a força inercial e a força viscosa no escoamento da água, e o número de Froude a razão entre a força inercial e a força gravitacional. Ambos os números de Reynolds e Froude são comumente utilizados para representar a turbulência em escoamentos da água em condutos forçados e escoamento livre, respectivamente (HUISMAN; WEBER; GUJER, 2004).

A concentração de saturação estabelece a concentração máxima de OD no curso de água, e conseqüentemente também afeta a reaeração superficial. Tal concentração de saturação é influenciada principalmente pela pressão parcial do oxigênio atmosférico (Equação 1), até que se atinja o equilíbrio entre o OD no curso de água e o oxigênio atmosférico em contato com o meio líquido através da interface ar-água (GUALTIERI; DORIA, 2008).

$$pp = H_e \cdot C_{sat} \quad (1)$$

Em que, pp é a pressão parcial do oxigênio atmosférico (atm), H_e a constante de Henry (atm.mol.m⁻³) e C_{sat} a concentração de saturação do oxigênio dissolvido no curso de água (mol.m⁻³).

O K_2 é o principal coeficiente utilizado para caracterizar quantitativamente o fenômeno da reaeração superficial, este coeficiente também é influenciado por diversos fatores naturais (CHAPRA, 1997; von SPERLING, 2014), entre eles temperatura, pressão atmosférica, salinidade, umidade do ar e características físicas, hidrológicas e hidráulicas do curso de água. A temperatura, pressão atmosférica e salinidade são fatores que afetam a concentração de saturação de OD no curso de água.

De acordo com von Sperling (2014) e Demars e Manson (2013), a influência da temperatura sobre o K_2 ocorre de duas formas: i) o aumento da temperatura reduz a solubilidade do oxigênio atmosférico no meio líquido; e ii) o aumento da temperatura acelera os processos biológicos, e aumenta a absorção do oxigênio atmosférico. Devido a essas influências, o K_2 é frequentemente corrigido para a temperatura padrão de 20°C (equação simplificada de Arrhenius, Equação 2).

$$K_2 = K_{2(20^\circ C)} \theta^{(T_{\text{água}} - 20^\circ C)} \quad (2)$$

Em que, K_2 o coeficiente de reaeração superficial (dia⁻¹), $K_{2(20^\circ C)}$ é o coeficiente de reaeração superficial a 20°C (dia⁻¹), $T_{\text{água}}$ a temperatura da água em que o coeficiente K_2 foi obtido (°C), θ o coeficiente de correção da temperatura (-). Segundo Chapra (1997) e Demars e Manson (2013), $\theta = 1,0241$ para o fenômeno da reaeração superficial.

A pressão atmosférica altera a C_{sat} no curso de água. Em regiões de altitudes elevadas a C_{sat} é menor, pois o aumento da altitude reduz a pressão que é exercida para que o oxigênio atmosférico se dissolva na água, assim o déficit entre concentração de OD e a C_{sat} pode ser menor e resultar na redução da taxa de reaeração superficial (von SPERLING, 2007).

Silveira (2004) estudou a influência da umidade relativa do ar sobre o K_2 . Os experimentos foram realizados em um tanque cilíndrico com agitação mecânica rotativa, em níveis de turbulências e de taxas de evaporação. O autor constatou que a evaporação foi inversamente proporcional à umidade atmosférica, e concluiu que existe uma correlação negativa entre K_2 e a umidade do ar.

O aumento da concentração de sais no curso de água afeta negativamente a solubilidade do oxigênio atmosférico na água. Geralmente, o efeito da salinidade é considerado relevante em estuários e oceanos, porém em cursos de água lóticos, a influência da salinidade pode ser considerado igual a zero (EPA, 1985).

As características físicas, hidrológicas e hidráulicas do curso de água, como por exemplo, declividade, velocidade, altura da lâmina d'água, rugosidade e vazão também exercem influência significativa sobre o K_2 (BENNETT; RATHBUN, 1972).

Melching e Flores (1999) realizaram um levantamento de K_2 obtidos pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Os autores reuniram 493 valores de K_2 de rios e riachos localizados em 166 bacias hidrográficas em 23 estados norte-americanos. Os pesquisadores correlacionaram os K_2 obtidos com a declividade, vazão, velocidade, profundidade e largura dos cursos de água, e obtiveram quatro modelos preditivos (Tabela 1) baseados nas características desses cursos de água, sendo eles: corredeiras, baixas velocidades e canais construídos para controle e monitoramento da qualidade da água. Melching e Flores (1999) concluíram que os modelos obtidos podem fornecer estimativas confiáveis para o K_2 , em uma ampla condição de vazão na qual esses modelos foram obtidos.

Tabela 1 - Modelos de predição do K_2 (s^{-1}) desenvolvidos por Melching e Flores (1999) com as condições de vazão em que podem ser aplicados e o coeficiente de determinação obtido (R^2)

Condição em que os modelos foram obtidos	Modelos*	R^2
$Q < 0,556 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$K_2 = 517 \frac{(U.I)^{0,524}}{Q^{0,242}}$	0,83
	$K_2 = 88 \frac{(U.I)^{0,313}}{Y^{0,353}}$	0,69
$Q > 0,556 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$K_2 = 596 \frac{(U.I)^{0,528}}{Q^{0,136}}$	0,90
	$K_2 = 142 \frac{(U.I)^{0,333}}{Y^{0,660} \cdot L^{0,243}}$	0,84

* U representa a velocidade média do escoamento da água ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); I é a declividade do curso de água ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$); Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), Y é a profundidade média da lâmina de água (m) e L é a largura média do curso de água (m).

Fonte: Adaptado de Melching e Flores (1999).

Atualmente, a estimativa da reaeração superficial está voltada para modelos de metabolismo aquático e de qualidade da água (e.g., CANALE et al., 1995; WILLIAMS et al., 2000; COX, 2003a, 2003b; REID; MACKINNON; ELLIOT, 2007; DEMARS; MANSON, 2013; RILEY; DODDS, 2013; KNAPP; OSENBRÜCK; CIRPKA; 2015), que na maioria dos casos, pequenas variações sobre K_2 podem resultar em variações significativas nos resultados finais, geralmente fornecidas em concentrações de OD (MATEUS et al., 2015). Esta sensibilidade resulta na necessidade de uma estimativa confiável deste coeficiente, caso contrário, um valor incorreto de K_2 pode resultar em impactos ambientais e também financeiros.

3.1.1 Métodos de estimativa do K_2

O K_2 pode ser estimado por meio de modelos de predição teóricos (conceituais), empíricos e semi-empíricos, além de várias metodologias de campo e laboratório (PINHEIRO; FAHT; SILVA, 2012). Segundo Bennett e Rathbun (1972), os modelos conceituais são equações baseadas em variáveis que influenciam o K_2 , sendo elas: químicas, físicas, hidrológicas e hidráulicas (e.g., velocidade do escoamento, profundidade, vazão, difusão molecular, solubilidade do oxigênio atmosférico, viscosidade da água, entre outras).

O modelo teórico clássico (Equação 3), desenvolvido por Adeney e Becker (1919), é comumente utilizado para estimar o K_2 em cursos de água e em laboratório (COSTA, 1999). Este modelo foi elaborado com o objetivo de estimar a taxa de dissolução do oxigênio atmosférico na água. De acordo com os autores, a taxa de transferência de massa de oxigênio através da interface ar-água é proporcional ao déficit de OD, em relação ao seu valor máximo de concentração (C_{sat}).

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_{sat} - C_{OD}) \quad (3)$$

Em que dC/dt é a taxa variação do déficit de concentração de OD em relação ao tempo, C_{sat} e C_{OD} as concentrações de saturação e inicial de OD da água ($g.m^{-3}$), respectivamente.

A teoria dos Dois Filmes de Whitman e a teoria da Renovação Superficial também são modelos conceituais amplamente conhecidos (CHAPRA, 1997). Estes

modelos são de fato equações que descrevem uma interpretação das condições físicas que governam a transferência de massa em uma interface ar-água (BENNET; RATHBUN, 1972).

Os modelos empíricos e semi-empíricos, por sua vez, resultam da combinação de modelos conceituais com análises de regressões dos dados experimentais obtidos em campo ou laboratório. Estes modelos são baseados nas características físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água, e podem ser usados apenas nas faixas em que foram gerados (BENNETT; RATHBUN, 1972; GUALTIERI; DORIA, 2008). Maiores informações sobre os modelos de predição do K_2 são detalhadas em um tópico específico adiante (Item 3.1.2)

Em relação aos métodos que possuem componente de campo ou laboratório para estimativa do K_2 , estes podem ser: balanço do oxigênio dissolvido, traçador gasoso, sonda solúvel flutuante, pressão sonora e o delta. Os métodos mais utilizados são o do balanço do oxigênio dissolvido e o traçador gasoso (COX, 2003b).

O método do balanço de oxigênio dissolvido, desenvolvido por Streeter e Phelps (1925), utiliza como princípio o balanço de massa que envolve o consumo e geração de OD no meio líquido (COX, 2003b). O método do traçador gasoso, desenvolvido por Tsivoglou e Wallace (1972), atualmente é conhecido pela sua elevada eficácia (SOARES et al., 2013). Este método consiste em estimar o K_2 por meio do fenômeno de dessorção de um gás inerte inserido em um curso de água. Maiores informações sobre o método do traçador gasoso são apresentadas em um tópico específico adiante (Item 3.1.3).

O método da sonda solúvel flutuante, proposto por Giorgetti e Giansanti (1983), que também é detalhado em um tópico específico adiante (Item 3.1.4), foi baseado no princípio de que V_S e o K_2 são fortemente dependentes da turbulência existente na interface ar-água no escoamento da água. Os autores concluíram que K_2 pode ser estimado indiretamente por meio de V_S .

O método da pressão sonora, desenvolvido por Morse et al. (2007), foi baseado na hipótese da existência de uma correlação entre a pressão sonora (ruído) de um curso de água e o K_2 , pois ambos os fenômenos são influenciados pela turbulência da superfície do escoamento da água. A correlação obtida pelos autores foi positiva ($R^2 = 0,94$) e linear, entretanto os autores estimaram 18% de incerteza

em tal correlação, e recomendaram mais pesquisas a fim de validar a aplicação do método.

O método de delta, proposto por Chapra e Di Toro (1991), é baseado em medições diárias e ininterruptas do OD em um curso de água. Estas medições fornecem curvas senoidais, e a partir do comportamento destas curvas estimam-se o K_2 , a produção primária e a taxa de respiração. Os autores concluíram que este método é ideal para cursos de água com K_2 relativamente baixos ($K_2 < 10 \text{ dia}^{-1}$).

Na Tabela 2 estão apresentados os principais resultados fornecidos por diversos métodos de estimativa do K_2 , obtidos em diferentes cursos de água naturais. Foi observado que existe grande diversidade de faixas de valores de K_2 , e o método mais utilizado foi o traçador gasoso, sendo a maioria dos estudos proveniente de regiões de clima temperado.

Tabela 2 - Faixas de K_2 (dia^{-1}) e métodos utilizados na estimativa de tal coeficiente, obtidos em cursos de água de diversas regiões do mundo

Local	Método	K_2 (dia^{-1})	Referência
Tubingen/ Alemanha	Traçador gasoso	40 - 70	Knapp, Osenbrück e Cirpka (2015)
Karnataka/ Índia	Balanço do oxigênio dissolvido	5,12 - 9,01	Kalburgi et al. (2015)
Sierra Nevada/ Califórnia/EUA	Traçador gasoso	47 - 66	Benson et al. (2014)
Manhattan/ Kansas/EUA	Traçador gasoso	2 - 130	Riley e Dodds (2013)
Tennessee/EUA	Traçador gasoso	5,40 - 40	Jin et al. (2012)
Delf/Holanda	Traçador gasoso	2,70 - 6,70	Tyroller et al. (2010)
Norte do Alasca	Traçador gasoso e Pressão sonora	107 - 140	Morse et al. (2007)
Irlanda do Norte	Traçador gasoso	3 - 80	Reid, Mackinnon e Elliot (2007)
Saharanpur/ Índia	Balanço do oxigênio dissolvido	2 - 07	Jha, Ojha e Bhatia (2001)
Sul da Inglaterra	Delta	2,40 - 11,60	Williams et al. (2000)
Flórida/EUA	Sonda solúvel flutuante	0,72 - 64,60	Belanger et al. (1999)
Minneapolis/ Minnesota/EUA	Traçador gasoso	01,33 - 1,58	Hibbs, Parkhill e Gulliver (1998)
Tennessee/EUA	Traçador gasoso	134	Wanninkhof, Mulholland e Elwood (1990)

3.1.2 Modelos de predição do K_2

Os modelos de predição do K_2 geralmente são obtidos sob condições controladas em campo e laboratório. Tais modelos, em sua maioria, estão associados a variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água, tais como: largura, profundidade, velocidade, declividade, vazão, número de Reynolds e Froude, entre outras.

Vários trabalhos citados por Bennett e Rathbun (1972) apresentaram diferentes modelos de predição do K_2 . Atualmente, estes modelos ainda são usuais, pois muitas vezes a aplicação de alguma metodologia de estimativa direta do K_2 não é conveniente, devido a longos períodos de amostragem e maior necessidade de recursos financeiros, o que torna os modelos uma maneira simples e rápida de predição do K_2 (MELCHING; FLORES, 1999).

Não há um modelo universal de predição do K_2 (von SPERLING, 2014). Os modelos mais utilizados e popularmente conhecidos são: O'Connor e Dobbins (1958), Churchill, Elmore e Buckingham (1962) e Owens, Edwards e Gibbs (1964). Diversos modelos de predição foram desenvolvidos por meio de condições controladas da velocidade, profundidade da lâmina de água e a declividade (Tabela 3).

Tabela 3 - Principais modelos de predição do K_2 (dia^{-1}) obtidos por diversos autores em diferentes condições físicas e hidrológicas do escoamento da água, e as suas faixas de aplicação

Modelo	Critério de aplicação*	Referência
$K_2 = 3,901 \frac{U^{0,5}}{Y^{1,5}}$	$0,60 \text{ m} < Y < 4 \text{ m}$ $0,05 \text{ m.s}^{-1} < U < 0,80 \text{ m.s}^{-1}$	O'Connor e Dobbins (1958)
$K_2 = 5,026 \frac{U^{0,97}}{Y^{1,67}}$	$0,60 \text{ m} < Y < 4 \text{ m}$ $0,80 \text{ m.s}^{-1} < U < 1,50 \text{ m.s}^{-1}$	Churchill, Elmore e Buckingham (1962)
$K_2 = 5,35 \frac{U^{0,67}}{Y^{1,85}}$	$0,10 \text{ m} < Y < 0,60 \text{ m}$ $0,05 \text{ m.s}^{-1} < U < 1,50 \text{ m.s}^{-1}$	Owens, Edwards e Gibbs (1964)
$K_2 = 5,577 \frac{U^{0,607}}{Y^{1,689}}$	$0,12 \text{ m} < Y < 3,5 \text{ m}$ $0,04 \text{ m.s}^{-1} < U < 1,5 \text{ m.s}^{-1}$	Bennett e Rathbun (1972)
$K_2 = 1740 \cdot U^{0,46} \cdot I^{0,79} \cdot Y^{0,74}$	$I > 0 \text{ m.m}^{-1}$	Moog e Jirka (1998)
$K_2 = 5,79 \frac{U^{0,5}}{Y^{0,25}}$	-	Jha, Ojha e Bhatia (2001)
$K_2 = 0,492 \frac{U^{0,08}}{Y^{0,712}}$	$0,30 \text{ m.s}^{-1} < U < 0,60 \text{ m.s}^{-1}$	Barros et al. (2011)
$K_2 = 5,446 \frac{U^{0,5}}{Y^{0,51}}$	$0,22 \text{ m} < Y < 0,66 \text{ m}$ $0,5 \text{ m.s}^{-1} < U < 0,73 \text{ m.s}^{-1}$	Kalburgi et al. (2015)

* U é a velocidade média do escoamento da água, Y é a profundidade média da lâmina d'água e I é a declividade do curso de água.

Fonte: Adaptado de Kalburgi et al. (2015).

Arora e Keshari (2017) desenvolveram um modelo de predição do K_2 com o uso de uma regressão linear múltipla (RLM). Os autores utilizaram variáveis físicas e hidráulicas do escoamento da água e também da qualidade da água de um trecho do Rio Yamuna em Delhi (Índia). Os resultados indicaram que o modelo obtido (Equação 4) possuiu um coeficiente de determinação igual a 0,79.

$$K_2 = 4,353 - 0,735.Q + 20,121.U - 0,015.Y - 0,033.L - 0,128.TOC - 0,006.CE + 0,011.SS \quad (4)$$

Em que, Q é a vazão ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), U é a velocidade média do escoamento da água (m.s^{-1}), Y é a profundidade média (m), L é a largura média (m), TOC é a concentração de carbono orgânico total (g.m^{-3}), CE é a condutividade elétrica da água ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) e SS a concentração de sólidos suspensos na água (g.m^{-3}).

De acordo com Arora e Keshari (2017), as variáveis de qualidade da água utilizadas no modelo, influenciam as concentrações de OD existentes no meio líquido, e consequentemente também o K_2 . A variável TOC foi utilizada, pois está

relacionada com a atividade microbiológica e matéria orgânica presente no meio líquido; a SS foi utilizada, pois está relacionada com a atividade microbiológica de organismos bentônicos; e a CE foi utilizada, pois representa a condutância de cargas elétricas no meio líquido.

Melching e Flores (1999) desenvolveram modelos de predição, e avaliaram mais de 20 modelos de predição disponíveis na literatura para estimar K_2 . Os autores concluíram que esses modelos fornecem bons subsídios para estimar o K_2 de cursos de água nos quais a aplicação de métodos diretos de mensuração deste coeficiente não é viável.

3.1.3 Método do Traçador Gasoso

Este método foi proposto por Tsivoglou e Wallace (1972), e consiste em utilizar dois tipos de traçadores conservativos, um fluorescente ou soluto e o outro um gás inerte no curso de água, com a finalidade de simular o fenômeno da dessorção de um gás traçador que ocorre na interface ar-água do escoamento. A dessorção de um gás traçador e a reaeração superficial são fenômenos físicos diretamente proporcionais, pois a taxa de dessorção do gás traçador é semelhante a do oxigênio atmosférico que migra para o curso de água tornando-se dissolvido (CHAPRA, 1997).

Tsivoglou e Wallace (1972) iniciaram a aplicação deste método com o uso de um gás traçador radioativo, o criptônio-85, porém, devido à periculosidade do manuseio deste gás, este método foi posteriormente modificado. Rathbun et al. (1978) propuseram o uso de hidrocarbonetos de baixo peso molecular (e.g., propano e etileno), entretanto a taxa de dissolução desses hidrocarbonetos na água foi relativamente baixa, o que resultou na busca gases traçadores mais eficientes (PINHEIRO; FAHT; SILVA, 2012).

Com o objetivo de obter melhor eficiência no método do traçador gasoso, especialmente na taxa de dissolução de gases na água, diversos tipos de gases foram testados, sendo os principais: clorometano (WILCOCK, 1984a), hélio-3 (CLARK et al., 1996), hexafluoreto de enxofre (BENSON et al., 2014; DEMARS; THOMPSON; MANSON, 2015) e xenônio (BENSON et al., 2014). Entre os gases traçadores, o hexafluoreto de enxofre (SF_6) é um gás inerte, inorgânico, possui alta solubilidade na água e está presente na atmosfera em baixas concentrações, o que

o torna um traçador bastante empregado na estimativa do K_2 de cursos de água (HIBBS; PARKHILL; GULLIVER, 1998).

A concentração do gás traçador dissolvido na água varia no espaço e no tempo, em função da dessorção que ocorre através da interface ar-água e pelo efeito da mistura no escoamento. A taxa de dessorção da concentração do gás traçador pode ser quantitativamente representada por um coeficiente de dessorção (K_T), esta taxa ocorre na interface ar-água de forma unidimensional, e apresenta um decréscimo com cinética de primeira ordem (Equação 5) com a concentração do gás traçador decaindo exponencialmente com o tempo (BARBOSA JÚNIOR, 1997; BENSON et al., 2014).

O coeficiente K_T é constante em todo o trecho do escoamento da água, assim como a injeção da massa dos traçadores, devido a isso, o K_T pode ser determinado a partir do conhecimento das massas injetadas e das concentrações de ambos traçadores no escoamento da água em diversos intervalos de tempo.

$$\frac{C_g}{C_C} = \frac{M_g}{M_C} \cdot e^{(-K_T \cdot t)} \quad (5)$$

Em que, C_g e C_C são as concentrações dos traçadores gasoso e conservativo (g.m^{-3}) no curso de água, respectivamente. M_g e M_C são as massas dos traçadores gasoso e conservativo (g) injetadas no meio líquido, respectivamente. K_T é o coeficiente de dessorção do gás traçador (s^{-1}) e t é o tempo (s).

No método do traçador gasoso, a estimativa do K_2 é realizada através da conversão de K_T para K_2 (Equação 6) por meio de um fator de conversão (R), que pode variar de acordo com os diversos tipos de gases traçadores utilizados (Tabela 4).

$$\frac{K_2}{K_T} = R \quad (6)$$

Em que, R é o fator de conversão do fenômeno da dessorção para reaeração superficial (-).

Tabela 4 - Fatores de conversão (R) do K_T para K_2 dos principais traçadores gasosos

Gás traçador	R	Referência
Criptônio-85	1,20	Tsivoglou e Wallace (1972)
Etileno	1,15	Rathbun et al. (1978)
Propano	1,39	Rathbun et al. (1978)
Clorometano	1,40	Wilcock (1984a, 1984b)
Hexafluoreto de enxofre	1,38	Canale et al. (1995)

Fonte: Adaptado de Chapra (1997).

Os traçadores conservativos inicialmente utilizados foram a rodamina-WT e o trítio. A rodamina-WT é um traçador do tipo fluorescente, de coloração avermelhada e facilmente solúvel em água. O trítio é um traçador isótopo do hidrogênio e possui uma meia vida curta (12 anos) (TSIVOGLOU; WALLACE, 1972; WANNINKHOF; MULHOLLAND; ELWOOD, 1990).

Atualmente, o cloreto de sódio (NaCl) é um traçador conservativo comumente utilizado para estimar características hidrológicas e hidráulicas (i.e., velocidade, vazão, dispersão longitudinal, entre outras) do escoamento em cursos de água superficiais e subterrâneos (PATIL et al., 2013; CHEN; HUANG, 2016; PARRA et al., 2016). O NaCl também é utilizado para monitorar o comportamento e a passagem do gás traçador pelo local de amostragem em um trecho de um curso de água (JIN et al., 2012). A utilização do NaCl como traçador conservativo é conveniente em função de seu baixo custo, facilidade de acesso e elevada solubilidade em água (PARRA et al., 2016).

Segundo Barbosa Júnior (1997), existem dois tipos de procedimentos gerais utilizados em campo para a injeção dos traçadores (i.e., soluto e gás). O procedimento de injeção de curta duração dos traçadores e o procedimento de injeção de longa duração dos traçadores. A injeção de curta duração dos traçadores exige a injeção simultânea e de idêntica duração dos traçadores, sendo também conhecida como *slug*. Por outro lado, o procedimento de injeção de longa duração é realizado com a injeção constante e ininterrupta dos traçadores, sendo também conhecido como patamar ou *plateau*.

Jin et al. (2012) utilizaram o propano e o NaCl para estimar o K_2 de quatro pequenos riachos localizados em Tennessee/EUA. Os autores utilizaram os procedimentos de longa e curta injeção dos traçadores, e propuseram um sistema

de pré-dissolução do gás traçador direto na solução salina. Os resultados demonstraram K_2 variando de 5,4 a 40 dia^{-1} , com R^2 variando de 0,47 a 0,98. Os autores concluíram que os trabalhos de estimativa do K_2 no campo podem ser dispendiosos, e que o método de pré-dissolução do gás traçador direto no soluto contribuiu para a redução desse problema.

Benson et al. (2014) empregaram o SF_6 , xenônio e a rodamina-WT na estimativa do K_2 de dois rios na Califórnia/EUA. Os autores utilizaram o procedimento de longa injeção dos traçadores, com um sistema de dissolução do gás por borbulhamento direto nos cursos d'água. Os resultados demonstraram que a presença de pequenas cachoeiras e quedas d'água contribuiu para elevadas taxas de reaeração ($K_2 > 60 \text{ dia}^{-1}$). Os autores concluíram que a principal limitação do método foi o procedimento de dissolução do SF_6 no curso de água, que resultou em uma grande perda do SF_6 para a atmosfera. Assim, ficou evidenciado que a aplicabilidade do método está vinculada a sistemas mais eficientes de injeção e solubilização de gases no curso de água.

3.1.4 Método da Sonda Solúvel Flutuante

Giorgetti e Giansanti (1983) propuseram um novo método de estimativa do K_2 . Os autores partiram da suposição que a velocidade de dissolução de um sólido solúvel flutuando na superfície do escoamento de um curso de água é favorecida pela turbulência. Esta turbulência, por sua vez, também influencia o fenômeno da reaeração superficial, por meio da renovação superficial ocasionada pelo aumento da área superficial do curso de água em contato com o oxigênio atmosférico. Assim, embora não exista uma relação de causa-efeito, os autores assumiram que existe uma relação indireta manifestando-se quantitativamente através dos parâmetros K_2 e V_s (GIORGETTI; SCHULZ, 1990).

Até o momento, mais seis trabalhos se destacaram na aplicação deste método, sendo eles: Bicudo e James (1989), Schulz (1989), Giorgetti e Schulz (1990), Rodrigues (1996), Costa (1999) e Belanger et al. (1999). Estes trabalhos utilizaram diferentes estruturas geradoras de turbulências, geometrias e compostos químicos para a confecção das sondas solúveis flutuantes.

Bicudo e James (1989) compararam alguns dos principais métodos de estimativa do K_2 : o balanço do oxigênio dissolvido, perturbação do equilíbrio,

traçador gasoso e a sonda solúvel flutuante. Os autores destacaram a aplicação do método da sonda solúvel flutuante em um canal hidráulico anelar, em que a água foi recirculada em um sistema fechado e as velocidades e profundidades foram controladas. O composto químico solúvel utilizado na confecção das sondas foi o ácido benzoico. O formato das sondas foi cilíndrico com a área superficial plana. Os pesquisadores concluíram que o ácido benzoico apresentou V_S entre $0,0009 \text{ mm.min}^{-1}$ e $0,0020 \text{ mm.min}^{-1}$. Uma correlação significativa entre K_2 e V_S foi obtida, com $R^2 = 0,91$, utilizando um modelo linear baseado na massa do sólido dissolvido em função do tempo (Equação 7).

$$\frac{M}{M_0} = 1 - \frac{V_S \cdot t}{D_0} \quad (7)$$

Em que, M é a massa do sólido solúvel em algum determinado tempo (g), M_0 a massa inicial do sólido solúvel (g), V_S a velocidade de dissolução (m.s^{-1}), D_0 o diâmetro inicial do sólido solúvel (m).

Schulz (1989), utilizou um tanque de agitação hidrodinâmica e um canal de recirculação, e testou vários compostos químicos para a confecção do sólido solúvel: ácido bórico, ácido benzoico, carbonato de sódio anidro e o ácido oxálico dihidratado. Destes, o ácido bórico e o benzoico mostraram-se solúveis, enquanto que o carbonato de sódio mostrou-se inviável, pois as características de dissolução deste não puderam ser controladas pela agitação da água. O autor escolheu o ácido oxálico dihidratado, devido a uma dissolução uniforme das sondas solúveis testadas. As sondas solúveis construídas foram planas e cilíndricas, e os V_S foram obtidos por meio do modelo da massa em função do tempo (Equação 7). O autor concluiu que foi possível estabelecer uma relação entre o K_2 , V_S e parâmetros físicos, hidrológicos e hidráulicos do escoamento, entretanto, recomendou mais trabalhos sobre o tema para estabelecer possibilidades e limitações do método.

Giorgetti e Schulz (1990) confeccionaram sondas solúveis planas no formato de pastilhas cilíndricas (28 cm de diâmetro) de ácido oxálico dihidratado, sendo que este composto químico apresentou uma solubilidade maior que a do ácido benzoico. Os experimentos foram realizados em um tanque cilíndrico de agitação hidrodinâmica e também em um canal retangular. O modelo que descreveu o processo de dissolução foi baseado na massa da sonda solúvel (Equação 7). Os

autores observaram uma boa correlação entre V_S e K_2 , e sugeriram a obtenção de uma curva de correlação entre K_2 e V_S , de modo que, esta curva seja independente do formato geométrico, composto químico utilizado na confecção do sólido solúvel e também independente da estrutura de turbulência utilizada.

Rodrigues (1996) utilizou um tanque de agitação hidrodinâmica em ambiente com condições de temperatura controlada. Três diferentes diâmetros (1,6 cm; 2,3 cm e 3,0 cm) de sondas solúveis, no formato esférico, de ácido benzoico, foram confeccionadas. O modelo de dissolução da sonda também foi baseado na variação da massa (Equação 7). A autora concluiu que os parâmetros V_S e K_2 estiveram proporcionalmente correlacionados pela turbulência do meio líquido, entretanto, o modelo para previsão indireta do K_2 através de V_S foi influenciado negativamente pela escala da sonda. Esta influência ocorreu, pois o modelo adotado para obtenção de V_S foi um modelo linear em função da massa, sendo necessário um modelo não linear. A autora destacou a inadequação da geometria esférica na confecção de sondas solúveis, devido a não linearidade do processo de dissolução.

Costa (1999) confeccionou sondas solúveis de ácido oxálico dihidratado em formato de pastilhas cilíndricas planas, e também testou sondas esféricas feitas de pirulitos e balas de açúcar. A autora aplicou o método em campo, e em um tanque de agitação mecânica. Foi observado que, no processo de dissolução das sondas esféricas houve uma dispersão nos valores de V_S , provavelmente relacionada com a variação do diâmetro da sonda solúvel. Para escoamentos turbulentos, foi recomendada a utilização de um modelo linear (Equação 8) baseado na área superficial da sonda solúvel esférica (COSTA, 1999).

$$A_{(t)} = A_0 - D_0 \cdot K_S \cdot t \quad (8)$$

Em que, $A_{(t)}$ é a área superficial em algum determinado tempo (m^2), A_0 é a área superficial inicial (m^2), D_0 é o diâmetro inicial do sólido solúvel (m), K_S é o coeficiente de dissolução (s^{-1}) e t é o tempo de dissolução (s).

BELANGER et al. (1999) confeccionaram sondas solúveis de ácido benzoico no formato de pastilhas cilíndricas. Os autores realizaram testes de dissolução em um tanque sob variadas condições de turbulência produzidas pela ação do vento e ondas na superfície do escoamento, e também em um curso de água natural. Os R^2

foram superiores a 0,8 nos testes em laboratório e também no curso de água. Os resultados indicaram que V_S foi um bom preditor de K_2 , e que são necessários testes futuros com sondas solúveis que flutuam estagnadas no escoamento da água sob diferentes condições de turbulência para compreender as principais limitações e potenciais deste método.

Ferreira et al. (no prelo), além de verificarem a correlação entre K_2 e V_S em diferentes aparatos experimentais geradores de turbulência, também avaliaram o efeito da temperatura da água sobre o fenômeno de dissolução da sonda solúvel flutuante de ácido oxálico dihidratado no formato esférico. Os autores utilizaram uma função exponencial (Equação 9) e modelaram V_S em função da temperatura. Os autores determinaram um coeficiente de correção da temperatura (ϕ) para o fenômeno de dissolução da sonda solúvel flutuante.

$$V_S = V_{S(20^\circ\text{C})} \phi^{(T_{\text{água}} - 20)} \quad (9)$$

Em que, V_S é a velocidade de dissolução em determinada temperatura (m.s^{-1}), $V_{S(20^\circ\text{C})}$ é a velocidade de dissolução a 20°C (m.s^{-1}), $T_{\text{água}}$ é a temperatura da água ($^\circ\text{C}$) e ϕ é o coeficiente de correção da temperatura (-) obtido pelos autores, sendo igual a 1,0605.

De acordo com Giorgetti e Schulz (1990), o mecanismo de turbulência que atua sobre o K_2 e V_S é a renovação superficial. Este mecanismo consiste em elementos do fluido (vórtices) incorporados ao meio líquido, que entram em contato com interface ar-água e com o sólido flutuando, e depois são incorporados ao meio líquido novamente. O formato esférico da sonda solúvel flutuante proporciona uma dissolução multidirecional e não unidirecional conforme descrito por Schulz (1989) e apresentado nos trabalhos que utilizaram a sonda solúvel no formato de pastilhas cilíndricas (BICUDO; JAMES, 1989; SCHULZ, 1989; GIORGETTI; SCHULZ, 1990; COSTA, 1999; BELANGER et al., 1999)

Costa (1999) reportou que os fenômenos de reaeração superficial e dissolução do sólido solúvel sofrem diferentes influências de acordo com o aumento de escala de turbulência. Em cursos de água com elevadas turbulências, a sonda solúvel flutuante foi submetida a vórtices menores que o seu próprio tamanho o que

ocasionou maiores V_s , já para menores turbulências os vórtices foram maiores que o tamanho da sonda solúvel flutuante, o que resultou menores valores de V_s .

De acordo com Bicudo e James (1989) e Giorgetti e Schulz (1990), para a estimativa de V_s foram consideradas as seguintes hipóteses: 1 - Nenhum composto presente na água reagiu com o material sólido da sonda solúvel; 2 - A turbulência foi homogênea, desta forma a agitação foi a mesma em todos os pontos da superfície do sólido da sonda solúvel; 3 - A alteração da concentração de sólidos dissolvidos na água foi negligenciada.

A taxa de dissolução da sonda solúvel flutuante (Equação 10), que representa a superfície exposta de tal sonda no meio líquido em função do tempo, apresenta uma dissolução linear até aproximadamente 50% da redução do diâmetro inicial, conforme demonstrado por Rodrigues (1996) e Giorgetti e Schulz (1990). Tal modelo é adequado para a descrição do fenômeno de dissolução da sonda solúvel no formato esférico por meio da mensuração do diâmetro.

$$\frac{dD}{dt} = -V_s \quad (10)$$

Em que dD/dt é a variação do diâmetro da sonda solúvel flutuante em função da variação do tempo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização dos trechos dos riachos

A presente pesquisa foi realizada em cinco trechos de quatro riachos tropicais de pequeno porte localizados no município de São Carlos (SP) (Tabela 5). Para cada riacho, foi selecionado um trecho com extensão que variou entre 20 e 250 m. Em cada trecho foram definidas ao menos seis estações de amostragem para aplicação do método do traçador gasoso (Item 4.4) e caracterização física. Nos trechos também foram realizadas as caracterizações química, hidrológica e hidráulica (Itens 4.2 e 4.3) e a aplicação do método da sonda solúvel flutuante (Item 4.5).

A caracterização física dos trechos e das estações de amostragem (Tabela 5) foi realizada por meio da mensuração *in situ* das seguintes variáveis: largura média da seção do escoamento (L), profundidade média do escoamento (Y), extensão do trecho estudado (X), distância entre as estações de amostragem (Δx) e pressão atmosférica (P_{atm}). O perfil transversal de todos os trechos foi considerado retangular. A profundidade foi mensurada em três pontos ao longo da largura, a largura foi mensurada em cada seção de amostragem no trecho.

Foram realizados oito experimentos em campo durante o período de agosto de 2016 a agosto de 2017, abrangendo estações chuvosas, secas e intermediárias, a fim de contemplar as oscilações naturais das condições climáticas da região.

Tabela 5 - Principais informações sobre os trechos dos riachos, incluindo nome do riacho, coordenadas geográficas, extensão do trecho (X), distância das estações de amostragem (Δx), características principais e fotografia

Riacho/Trecho	Coordenadas geográficas	X (m)	Δx (m)	Principais características	*Fotografia
Espraiado/ESP1	21°58'55,7"S 47°52'26,9"O	240	28	Canal retangular de alvenaria
Espraiado/ESP2	21°58'46,75"S 47°52'23,11"O	127	14	Presença de meandros
Canchim/CAN	21°58'00,73"S 47°50'33,73"O	106	12	Riacho raso
Santa Maria/SMA	22°02'41,34"S 47°58'30,87"O	140	14	Presença de pequenas quedas d'água, elevada velocidade
Fazzari/FZZ	21°58'80,02"S 47°53'80,30"O	30	5	Baixa velocidade, pequena vazão

*Fonte: Autor (2018).

4.2 Variáveis climatológicas, hidrológicas e hidráulicas

Foram compilados dados climatológicos de temperatura média mensal do ar (T_{ar}) e precipitação pluviométrica total no mês (P), oriundos da estação meteorológica A-711 de observação de superfície automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) localizada no município de São Carlos/SP.

A caracterização hidrológica e hidráulica (Tabela 6) dos trechos foi realizada por meio da mensuração da velocidade média do escoamento da água (U) e vazão (Q), além do cálculo dos números de Reynolds (Re) e Froude (Fr) (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo das metodologias que foram utilizadas para caracterização climatológica, hidrológica e hidráulica nos trechos dos riachos que foram estudados

Caracterização	Variável*	Unidade	Método	Instituição/referência/equação**
Climatológica	T_{ar}	°C	Dados secundários	INMET
	P	mm		
Hidrológica	U	$m.s^{-1}$	Solutos conservativos	$U = \frac{X}{t}$ (WEBSTER; VALETT, 2007)
	Q	$m^3.s^{-1}$		$Q = \frac{(C_C - C_R) \cdot Q_T}{(C_P - C_R)}$ (WEBSTER; VALETT, 2007)
Hidráulica	Re	(-)	Equação	$Re = \frac{U \cdot R_H}{\nu}$
	Fr			$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot H_m}}$

* T_{ar} é a temperatura do ar, P a precipitação, U a velocidade média, Q a vazão, Re o número de Reynolds e Fr o número de Froude.

** X é a distância total do trecho, t é o tempo acumulado (s) até a estabilização do *plateau* no curso de água, C_C é a concentração do soluto conservativo no curso de água ($g.m^{-3}$), C_R é a concentração do soluto conservativo existente no riacho antes do lançamento ($g.m^{-3}$), Q_T é a vazão de lançamento da solução do soluto conservativo ($m^3.s^{-1}$), C_P é a concentração do soluto conservativo no *plateau* ($g.m^{-3}$), R_H é o raio hidráulico médio (m) da seção do escoamento, ν é viscosidade cinemática da água ($1,0.10^{-6} m^2.s^{-1}$), g é a aceleração da gravidade ($9,8 m.s^{-2}$) e H_m é a altura hidráulica (m), que é a relação entre a área molhada e a largura da seção.

A mensuração de U e Q foi realizada por meio do lançamento contínuo de um soluto conservativo (WEBSTER; VALETT, 2007). Este método consiste na liberação constante de um soluto (NaCl) com concentração conhecida a montante do trecho

estudado, cujo deslocamento da pluma foi acompanhado por meio de um condutivímetro de campo instalado a jusante do trecho (Figura 1).

O condutivímetro foi programado para registrar a condutividade elétrica da água a partir do início do lançamento do soluto até a estabilização de um patamar (*plateau*) da condutividade. A condutividade foi convertida para concentração do soluto (NaCl , mg.L^{-1}) por meio de uma curva de calibração que foi obtida por soluções com concentrações conhecidas deste traçador.

Figura 1 - Esquema da configuração metodológica do lançamento do soluto conservativo (NaCl) que foi utilizado para medida da vazão e velocidade nos trechos dos riachos

Fonte: Adaptado de Webster e Valett (2007).

4.3 Variáveis da água

A caracterização da qualidade da água dos trechos foi realizada por meio da mensuração *in situ* nos trechos dos riachos de algumas das principais variáveis da água (Tabela 7). As variáveis analisadas foram: temperatura da água ($T_{\text{água}}$), potencial hidrogeniônico (pH), OD, condutividade elétrica (CE) e turbidez (Turb).

Tabela 7 - Resumo das metodologias que foram utilizadas para caracterização das principais variáveis da água, a fim de caracterizar os trechos dos riachos que foram estudados

Variável*	Unidade	Método	Equipamento
T _{água}	°C	Potenciometria	Sonda multiparâmetros Hanna - 9828
pH	-		
C _{OD}	mg.L ⁻¹		
CE	µS.cm ⁻¹	Condutimetria	
Turb	UNT	Nefelometria	

* T_{água} é a temperatura da água, pH o potencial hidrogeniônico, C_{OD} a concentração de oxigênio dissolvido, CE a condutividade elétrica e Turb a turbidez.

4.4 Aplicação do método do traçador gasoso

4.4.1 Traçadores utilizados

Os traçadores escolhidos (Tabela 8) para a aplicação deste método foram o NaCl, como traçador conservativo, igualmente utilizado na mensuração da vazão e velocidade, e o SF₆ como um gás traçador inerte. A escolha do NaCl foi de acordo com as recomendações de Webster e Valett (2007) e Chen e Huang (2016). O SF₆ foi escolhido, pois possui elevada solubilidade em água, e gerou resultados consistentes em pesquisas prévias desenvolvidas por Wanninkhof, Mulholland e Elwood, (1990), Canale et al. (1995), Bullister, Wisegarver e Menzia, (2002), Riley e Dodds (2013), Benson et al. (2014) e Demars, Thompson e Manson (2015).

Antes da realização dos experimentos no campo, uma solução contendo NaCl e água destilada (238 g.L⁻¹) foi preparada no laboratório BIOTACE (Laboratório de Biotoxicologia de Águas Continentais e Efluentes), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos (EESC-USP).

A solução de NaCl foi inserida em um garrafão dobrável específico para a aplicação do método. O oxigênio existente no interior do garrafão foi removido e o SF₆, inserido. A concentração de gás adicionado na solução de NaCl foi de 60 mL de gás por litro de solução. Este procedimento foi realizado em um período de 12h antecedentes aos experimentos em campo, para garantir uma dissolução uniforme do gás na solução (BULLISTER; WISEGARVER; MENZIA, 2002).

Tabela 8 - Principais informações e propriedades físico-químicas dos traçadores que foram utilizados na aplicação do método do traçador gasoso nos trechos dos riachos

Soluto conservativo	Nome	Cloreto de sódio
	Massa molar	58,5 g.mol ⁻¹
	Fórmula molecular	NaCl
	Solubilidade na água a 25°C	36 g de NaCl/100 g de água
	Densidade	2,16 g.cm ⁻³
	CAS	7647-14-5
Gás conservativo e inerte	Nome	Hexafluoreto de enxofre
	Massa molar	146,1 g.mol ⁻³
	Fórmula molecular	SF ₆
	Solubilidade na água a 25°C	31 mg.L ⁻¹
	Toxicidade	Não tóxico
	Inflamabilidade	Não inflamável
	CAS	2551-62-4

Fonte: Pubchem (2017).

Em campo, a liberação da solução de NaCl e SF₆ ocorreu por meio de uma bomba dosadora (FMI Lab-pump/QBG) a montante do trecho. A jusante do trecho ocorreu o monitoramento da condutividade elétrica da água. A vazão da bomba foi estimada através do método volumétrico em triplicata, e ajustada para a obtenção de um *plateau* de condutividade elétrica após um tempo de viagem da pluma de traçadores pelo escoamento da água de aproximadamente 20 minutos (KILPATRICK; COBB, 1985). Este tempo de viagem visou garantir uma mistura efetiva do traçador conservativo no fluxo da água. A montante de cada trecho foi adotada uma distância mínima de mistura lateral e vertical dos traçadores injetados no escoamento da água (SOARES et al., 2013). A estimativa desta distância foi realizada de acordo com o modelo de mistura proposto por Fischer et al. (1979) expressado pela Equação 11.

$$L_M = 0,1 \frac{U.L^2}{D_L} \quad (11)$$

Em que, L_M é o comprimento de mistura (m) U é a velocidade média do escoamento (m.s⁻¹), L a largura média do leito (m) e D_L corresponde ao coeficiente de dispersão longitudinal (m².s⁻¹). D_L foi estimado para cada trecho estudado de

acordo com a metodologia utilizada por Oliveira et al. (2017), que estimaram o D_L de diversos riachos localizados em Uberaba (MG) por meio do lançamento de soluto conservativo no curso de água (i.e., *slug* de NaCl).

4.4.2 Coleta das amostras de água nos trechos

Para cada trecho, foram selecionadas ao menos seis estações de amostragem para a coleta das amostras de água, assim que o *plateau* de condutividade elétrica foi atingido (Figura 2). A coleta das amostras foi realizada de acordo com Thene e Gulliver (1990) adaptada da USEPA (United States Environmental Protection Agency) com auxílio de frascos de borossilicato (40 mL) com vedação de septos de silicone e teflon (PTFE 0,125" com 22 mm de diâmetro). Cada frasco foi submerso a aproximadamente 10 cm da superfície para coleta da água, e foi certificada visualmente a ausência de bolhas de oxigênio no interior do frasco, e posteriormente vedado.

Figura 2 - Esquema da aplicação do método do traçado gasoso, lançamento dos traçadores, coleta das amostras nas estações de amostragem nos trechos dos riachos e o intervalo ideal para amostragem e coleta das amostras de água

Fonte: Adaptado de Thene e Gulliver (1990) e Webster e Valett (2007).

4.4.3 Análise cromatográfica e estimativa do coeficiente de reaeração superficial

A extração e quantificação do SF₆ foram realizadas por meio de uma parceira com a EMBRAPA – Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos (SP), no laboratório de Química Analítica, com o auxílio do Me. Carlos Eduardo K. M. A. de Campos Jordão e do Dr. Julio C. P. Palhares.

A extração do SF₆ dissolvido na água no interior dos frascos foi realizada através da técnica do *Headspace* utilizando nitrogênio ultrapuro (N₂ up 5.0) (THENE; GULLIVER, 1990). A quantificação do SF₆ existente no *headspace* de cada frasco foi realizada por meio de um cromatógrafo gasoso (Shimadzu GC-2014 “Greenhouse” com automostrador AOC-5000) equipado com seringa para *headspace* de 2,5 mL (CTC Analytics®), detector por captura de elétrons (ECD) e ionização de chama (FID).

As condições cromatográficas de todas as análises foram: temperatura das colunas igual a 80°C, temperatura do injetor igual a 100°C, temperatura do ECD igual a 325°C, temperatura do FID igual a 250°C e a temperatura das duas válvulas de quatro vias foram de 80°C. As vazões do gás de arraste (N₂ up 5.0) foram 24,57 mL.min⁻¹ nas colunas e purga de 0,5 mL.min⁻¹. As colunas utilizadas foram: 1 m HayeSep T® (coluna do *backflush*), 4 m H-D 80/100 (coluna analítica), duas colunas de 1,5 m P-N e uma coluna 0,5 m S-Q.

Foram analisados os cromatogramas (i.e., área do sinal cromatográfico) correspondentes a cada amostra de SF₆ coletada nas estações de amostragem. Para a obtenção do coeficiente de dessorção do gás traçador SF₆ (K_{SF6}) foi utilizado, por meio do ajuste linear entre o logaritmo da área do cromatograma e a distância total dos trechos dos riachos, o coeficiente angular fornecido pela Equação 12 (BENSON et al., 2014; TROMBONI et al., 2017). Para a obtenção do K₂ de cada trecho, foi utilizada a relação existente entre K_{SF6} e K₂ (Tabela 4 e Equação 6).

$$A_{g(x)} = A_{g(0)} \cdot e^{\left(\frac{-K_{SF6}}{U}\right)X} \quad (12)$$

Em que A_{g(x)} é a área do cromatograma (-) na posição X, A_{g(0)} é a área do cromatograma (-) na estação a montante do trecho onde ocorreu o lançamento dos

traçadores ($x = 0$ m), K_{SF_6} é o coeficiente de desorção do SF_6 (dia^{-1}), U a velocidade média do escoamento da água (m.dia^{-1}), X é distância total do trecho (m).

Todos os coeficientes K_2 obtidos em diferentes temperaturas da água foram corrigidos para a temperatura padrão de 20°C (Equação simplificada de Arrhenius, Equação 2).

4.5 Aplicação do método da sonda solúvel flutuante

O composto químico utilizado na confecção das sondas solúveis flutuantes foi o ácido oxálico dihidratado ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e massa molar de $126,07 \text{ g.mol}^{-1}$), devido a sua baixa toxicidade e alta solubilidade em meio líquido. A confecção das sondas no formato esférico (Figura 3) foi realizada por meio da compactação por pressão em prensa de moldagem (prensa hidráulica com capacidade de 100 kN), com auxílio de um molde metálico com formato esférico. As esferas obtidas foram perfurada e fixadas a um suporte flutuante de poliestireno por meio de uma haste metálica de 1 mm de diâmetro (Figura 4).

Figura 3 - Procedimentos utilizados para a confecção da sonda solúvel flutuante no formato esférico. A - Ácido oxálico dihidratado; B - Molde metálico desacoplado; C - Molde metálico acoplado sendo prensado; D - Esferas com hastes metálicas fixadas e suportes flutuantes; E - Vista detalhada de uma esfera e um suporte flutuante e F - Sonda solúvel flutuante no formato esférico pronta para uso

Fonte: Autor (2018).

Figura 4 - Detalhes da sonda solúvel esférica flutuante condicionada com ácido oxálico dihidratado: (A) sonda confeccionada; (B) esquema em corte transversal da sonda solúvel flutuante sobre a água

Fonte: Adaptado de Giorgetti e Giansanti (1983).

Os experimentos de dissolução da sonda solúvel no escoamento da água nos trechos dos riachos ocorreram após a aplicação do método do traçador gasoso, com o intuito de evitar que os íons liberados pela dissolução do sólido solúvel não interferissem na condutividade elétrica da água. Estes experimentos foram realizados por meio da mensuração do tempo total de percurso da sonda solúvel flutuante em função da redução de seu diâmetro (Figura 5).

Figura 5 - Esquema da aplicação da metodologia da sonda solúvel flutuante nos trechos dos riachos estudados

Fonte: Autor (2018).

A sonda foi submergida a dois centímetro da superfície da água, e flutuava no sentido do escoamento. Na estação de mensuração a jusante do trecho, foram

medidos três valores de diâmetros da sonda por meio de um paquímetro, e o tempo total do percurso cronometrado. Este procedimento foi repetido até uma redução de 5 a 10% do diâmetro inicial da sonda, esta redução foi atribuída de acordo com Rodrigues (1996) e Costa (1999), de modo a garantir resultados satisfatórios com a ausência de efeitos de borda.

Devido a não uniformidade da dissolução superficial das esferas, as medidas dos diâmetros foram realizadas em três locais diferentes da sonda, sendo eles, as seções diagonais da sonda solúvel (Figura 5). Esta não uniformidade foi atribuída ao processo de confecção da esfera, em que o ponto de união entre as duas concavidades do molde metálico ocasionou a existência de uma saliência anelar após a compactação.

O modelo matemático (Equação 13) que representa a dissolução da sonda solúvel de ácido oxálico dihidratado no formato esférico foi oriundo da Equação 10. Os coeficientes angulares obtidos dos ajustes lineares (Equação 13) entre as medidas dos diâmetros médios da esfera com relação ao tempo cronometrado para percorrer completamente cada trecho forneceram os valores de V_S para cada trecho dos riachos nos períodos de experimento em campo.

$$D = D_0 - V_S \cdot t \quad (13)$$

Em que D é o diâmetro médio da esfera (m), D_0 é o diâmetro médio inicial (m), V_S é a velocidade de dissolução ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) e t é o tempo (s).

Com o intuito de verificar a razão entre os fenômenos de dissolução do sólido solúvel e a reaeração superficial, foram obtidos coeficientes K_S para os trechos estudados nos períodos de experimentos em campo. Os K_S corresponderam aos coeficientes angulares obtidos dos ajustes lineares (Equação 14) entre as razões medidas dos diâmetros da esfera com relação ao tempo cronometrado para percorrer completamente cada trecho.

$$\frac{D}{D_0} = 1 - K_S \cdot t \quad (14)$$

Em que D é o diâmetro médio da esfera (m), D_0 é o diâmetro médio inicial (m) K_S é o coeficiente de dissolução (s^{-1}) e t é o tempo (s).

Todos os V_s e K_s obtidos em diferentes temperaturas da água foram corrigidos para a temperatura padrão de 20°C (Equação 9).

4.6 Análises estatísticas

Foram aplicadas análises estatísticas não paramétricas em função da distribuição não normal dos dados. A fim de verificar a existência de variações estatisticamente significativas do ponto de vista espacial (entre os riachos) e temporal (entre diferentes períodos de coleta), foi utilizada a análise Kruskal-Wallis, com um nível de confiança de 95% ($p < 0,05$).

O teste de correlação de Spearman, com coeficientes r variando entre -1,0 e +1,0, também foi utilizado para identificar as correlações positivas e negativas entre as principais variáveis obtidas, em especial as variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas que apresentaram correlação com o K_2 e V_s obtidos nos trechos dos riachos. As análises estatísticas Kruskal-Wallis e correlação de Spearman foram realizadas com auxílio do software Statistica 13[®].

4.6.1 Desenvolvimento de um modelo de predição para o K_2

Para normalização dos dados, as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, e os K_2 e V_s foram logaritmizados (Ln) previamente à elaboração de modelos de predição do K_2 . A elaboração de todos os modelos foi realizada por meio do software Statistica 13[®] com o uso da opção de análise de regressão linear múltipla (RLM) e simples (RLS). As variáveis independentes, adotadas de acordo com levantamento bibliográfico prévio, foram: físicas, hidrológicas, hidráulicas e o V_s . Já a variável dependente adotada foi o K_2 . As relações entre as variáveis dependentes e independentes foram modeladas de acordo a estrutura linear matemática representada pela Equação 15.

$$W = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (15)$$

Em que, W é a variável dependente a ser prevista, X_n são as variáveis independentes, β_0 é o intercepto e β_n são os coeficientes parciais de regressão (parâmetros do modelo).

Seis modelos RLM e um modelo RLS foram construídos (Tabela 9). A cada modelo, uma variável independente adicional foi incluída, com o intuito de verificar a influência desta sobre o K_2 .

Tabela 9 - Resumo das variáveis dependentes e independentes que foram utilizadas para a elaboração de cada modelo RLM e do modelo RLS

Modelo RLM	Variável dependente	Variáveis independentes*
1	K_2	L, Y
2		L, Y, Q
3		L, Y, Q, U
4		L, Y, Q, U, Rey
5		L, Y, Q, U, Rey, Fr
6		L, Y, U, Q, Rey, Fr, V_s
Modelo RLS	Variável dependente	Variável independente
7	K_2	V_s

*L é a largura média do trecho do riacho (m), Y a profundidade média (m), Q a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), U velocidade média ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), Rey o número de Reynolds (-), Fr o número de Froude (-), V_s velocidade de dissolução ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) e o K_2 o coeficiente de reaeração superficial (dia^{-1}).

Gráficos comparativos entre os K_2 modelados (i.e., estimados pelos modelos RLM e RLS desenvolvidos) e os mensurados nos trechos dos riachos foram elaborados. Para cada gráfico uma linha de ajuste foi adicionada, com a intersecção no valor 0 dos eixos x e y (i.e., linha de correspondência teórica 1:1).

A linha de correspondência teórica objetivou verificar se os modelos de predição forneceram valores de K_2 semelhantes, ou iguais, aos mensurados nos trechos dos riachos. Se os K_2 modelados estiveram posicionados acima desta linha, significa que o modelo superestima o valor de K_2 , e se ficarem abaixo, o modelo os subestima. O modelo ideal foi aquele em que os valores apresentarem um R^2 próximo a 1, e posicionados próximos, ou sobre, a linha de correspondência teórica.

5 RESULTADOS

5.1 Variáveis climatológicas e pressão atmosférica

A precipitação total mensal no período de ago/16 a ago/17 foi sempre inferior a 180 mm (Figura 6). Os meses mais chuvosos foram dez/16 e jan/17 (178 mm e 173 mm). Os meses mais secos foram mar/17 e jul/17 (7 mm e 0 mm). Os meses de abr/17 e mai/17 apresentaram precipitações maiores que a média histórica. O período de dez/16 a fev/17 foi caracterizado como período chuvoso, e de mai/17 a ago/17 como período seco.

Figura 6 - Precipitação total mensal (mm) no município de São Carlos (SP), entre ago/16 e ago/17 na estação meteorológica A-711 de observação de superfície automática do INMET, e média histórica (1961 - 1990) dos diferentes meses do ano

Fonte: Adaptado do INMET.

A temperatura do ar variou de 16,7°C a 24,1°C entre ago/16 a ago/17 (Figura 7), com média de 20,7°C, e com valores semelhantes aos da média histórica. O período mais quente foi de dez/16 a fev/17, correspondente ao verão (i.e., períodos chuvosos e com elevadas temperaturas). O período mais frio, correspondente ao inverno, foi de jun/17 a ago/17, com menores lâminas de chuva e temperaturas mais baixas.

Figura 7 - Temperatura média mensal do ar (°C) no município de São Carlos (SP), entre ago/16 e ago/17 na estação meteorológica A-711 de observação de superfície automática do INMET e média histórica (1961 - 1990) dos diferentes meses do ano

Fonte: Adaptado do INMET.

A pressão atmosférica variou de 693,1 mmHg (SMA - ago/16) a 674,2 mmHg (ESP1 - out/16), representando uma variação de 2,7%.

5.2 Variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas

5.2.1 Largura e profundidade

As larguras e profundidades médias dos trechos dos riachos (Figuras 8 e 9) foram influenciadas pela precipitação, com valores elevados nos meses com maior precipitação e reduzidos nos meses com pouca precipitação. Os trechos que tiveram as maiores larguras médias foram SMA (2,85 m) e CAN (1,00 m), seguidos de FZZ (0,96), ESP2 (0,85 m) e ESP1 (0,42 m). Os trechos que tiveram as maiores profundidades médias foram ESP2 (0,37 m) e FZZ (0,18 m), seguidos de ESP1 (0,18 m), SMA (0,15 m) e CAN (0,08 m).

No mês de jan/17, todos os trechos apresentaram as maiores larguras, variando de 0,42 m (ESP1) a 3,20 m (SMA). No mês de ago/17, o CAN apresentou a menor profundidade (0,07 m) e o ESP2, a maior profundidade (0,42 m).

Figura 8 - Largura média dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Fonte: Autor (2018).

Figura 9 - Profundidade média dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Fonte: Autor (2018).

5.2.2 Vazão e velocidade

A vazão e a velocidade média (Figuras 10 e 11) também tiveram influência da precipitação, com valores elevados nos meses com maiores precipitações. O trecho que apresentou a menor velocidade foi o FZZ ($0,01 \text{ m.s}^{-1}$), seguido de ESP2 ($0,04 \text{ m.s}^{-1}$), CAN ($0,04 \text{ m.s}^{-1}$), SMA ($0,14 \text{ m.s}^{-1}$) e ESP1 ($0,19 \text{ m.s}^{-1}$). A menor vazão observada foi no trecho FZZ ($0,001 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), seguido do CAN ($0,003 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), ESP2 ($0,011 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), ESP1 ($0,011 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e SMA ($0,060 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

Os meses de jan/17 e mar/17 apresentaram as maiores vazões com uma variação de $0,006 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (FZZ) a $0,109 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (SMA), e a velocidade média apresentou uma variação de $0,02 \text{ m.s}^{-1}$ (FZZ) a $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ (ESP1) na maioria dos trechos, com exceção do SMA, que apresentou os maiores valores de velocidade e vazão no mês de jun/17.

Figura 10 - Vazão dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Fonte: Autor (2018).

Figura 11 - Velocidade média dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Fonte: Autor (2018).

5.2.3 Números de Reynolds e Froude

Os números de Reynolds e Froude (Figuras 12 e 13) variaram de acordo com a alteração das características físicas e hidrológicas dos trechos, com valores elevados nos meses com maior precipitação. O trecho que apresentou o menor Reynolds foi o FZZ (588), seguido de CAN (3537), ESP2 (7002), ESP1 (14329) e SMA (19415). O menor número de Froude observado foi no trecho FZZ (0,003), seguido do ESP2 (0,025), CAN (0,048), SMA (0,12) e ESP1 (0,19).

Os meses de jan/17 e mar/17 apresentaram os maiores números de Reynolds variando de 4631 (FZZ) a 30996 (ESP1), com exceção do SMA, que apresentou o maior número de Reynolds (34070) nos mês de out/16 entre todos os trechos dos riachos. O maior valor de Froude observado foi 0,36, correspondente ao trecho ESP1 no mês de out/16.

Figura 12 - Número de Reynolds dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Fonte: Autor (2018).

Figura 13 - Número de Froude dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Fonte: Autor (2018).

5.3 Variáveis da água

Para todos os trechos, a temperatura da água (Tabela 10) atingiu valores superiores a 20°C nos mês de jan/17, caracterizado como verão. Os menores valores (inferiores a 16°C) foram obtidos nos meses de ago/16, jun/17 e jul/17, típicos de inverno. As temperaturas mínimas e máximas observadas para o trecho ESP1 foram 15,4°C e 20,8°C, seguidas do ESP2 (14,7°C a 20,5°C), CAN (15,6°C a 20,5°C), SMA (17°C a 24,3°C) e FZZ (17,1°C a 22,1°C).

O pH caracterizou a água como meio ácido a neutro (Tabela 10), com o mínimo valor no trecho ESP2 (4,5) e o máximo também no ESP2 (7,5). Considerando todas as coletas, o trecho SMA apresentou o maior pH médio (6,3), seguido do CAN (6,2), FZZ (5,7), ESP2 (5,6) e ESP1 (5,5).

A máxima concentração de OD foi 8,13 mg.L⁻¹ (SMA) e mínima de 3,31 mg.L⁻¹ (FZZ). As concentrações médias de OD nos trechos foram 3,70 mg.L⁻¹ para FZZ, seguido de 5,15 mg.L⁻¹ (ESP1), 5,84 mg.L⁻¹ (ESP2), 6,53 mg.L⁻¹ (CAN) e 6,79 mg.L⁻¹ (SMA). O trecho SMA apresentou a maior condutividade elétrica (32,2 $\mu\text{s.cm}^{-1}$), seguido do CAN (29,0 $\mu\text{s.cm}^{-1}$), ESP1 (18,0 $\mu\text{s.cm}^{-1}$), ESP2 (15,7 $\mu\text{s.cm}^{-1}$) e FZZ (11,0 $\mu\text{s.cm}^{-1}$). A turbidez apresentou uma variação de 2,6 UNT a 29,4 UNT para o trecho ESP1, 3,0 UNT a 30,0 UNT (ESP2), 2,3 UNT a 24,1 UNT (CAN), 2,6 UNT a 8,5 UNT (SMA) e 2,2 UNT a 5,4 UNT (FZZ).

Tabela 10 - Resultados das variáveis da água nos trechos dos riachos estudados, no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Trechos	mês/ano	*T _{água} (°C)	*pH (-)	*C _{OD} (mg.L ⁻¹)	*CE (µs.cm ⁻¹)	*Turb (UNT)
ESP1	ago/16	16,6	6,3	-	12,4	14,0
	out/16	20,2	5,5	4,61	18,0	29,4
	jan/17	20,3	5,3	5,13	13,0	14,1
	mar/17	20,8	4,9	3,89	10,7	12,5
	mai/17	18,1	5,3	5,44	11,4	5,6
	jun/17	17,2	5,2	-	12,0	7,7
	jul/17	15,4	5,8	-	13,0	4,5
	ago/17	15,4	5,6	6,68	12,0	2,6
ESP2	ago/16	16,8	5,5	-	9,0	14,5
	out/16	20,2	4,8	4,56	15,7	30,0
	jan/17	20,5	6,4	8,53	12,0	7,4
	mar/17	19,8	5,0	4,91	14,2	20,4
	mai/17	18,3	4,5	4,97	11,9	6,9
	jun/17	17,0	6,0	-	12,0	8,2
	jul/17	14,7	7,5	-	11,9	10,6
	ago/17	15,4	5,5	6,1	12,0	3,0
CAN	ago/16	19,0	6,2	-	27,0	7,5
	out/16	19,5	5,8	6,43	25,6	19,0
	jan/17	20,5	6,1	6,26	25,1	24,1
	mar/17	18,9	5,9	5,57	29,0	5,0
	mai/17	18,4	6,1	7,35	24,7	2,0
	jun/17	19,4	6,4	-	29,0	13,9
	jul/17	15,6	6,2	-	26,0	3,2
	ago/17	18,3	6,6	7,08	26,0	2,3
SMA	ago/16	19,0	6,5	8,13	30,0	5,5
	out/16	23,7	6,8	6,78	31,2	8,5
	jan/17	24,3	6,8	6,78	32,1	8,5
	mar/17	21,1	6,1	5,03	30,4	5,1
	mai/17	22,0	4,9	6,52	30,5	2,6
	jun/17	19,3	6,4	-	32,2	7,6
	jul/17	17,0	6,4	-	29,9	7,6
	ago/17	20,1	6,2	7,55	29,5	3,7
FZZ	ago/16	18,8	4,9	4,95	10,9	5,4
	out/16	21,0	5,6	3,52	11,0	3,3
	jan/17	22,1	4,9	4,65	10,4	2,4
	mar/17	20,6	5,4	4,27	9,0	2,6
	mai/17	20,2	5,8	3,31	9,0	3,1
	jun/17	18,7	7,1	-	8,0	2,2
	jul/17	17,1	5,8	-	10,0	5,2
	ago/17	18,8	6,0	4,55	9,0	4,5

- Dados não disponíveis.

*T_{água} é a temperatura da água, pH o potencial hidrogeniônico, C_{OD} a concentração de oxigênio dissolvido, CE a condutividade elétrica e Turb a turbidez.

5.4 Coeficientes de reaeração superficial

Os coeficientes angulares obtidos dos ajustes dos dados ao modelo utilizado para a estimativa do K_{SF6} (Equação 12) estão apresentados nos Apêndices 1 a 8.

O trecho SMA apresentou o maior K_2 (373,79 dia^{-1}), e o ESP2, o menor (16,94 dia^{-1}). Os valores médios de K_2 para os trechos nas diferentes coletas (Tabela 11) foram 215,26 dia^{-1} (ESP1), 30,08 dia^{-1} (ESP2), 141,56 dia^{-1} (CAN), 317,66 dia^{-1} (SMA) e 53,92 dia^{-1} (FZZ).

A variação dos valores de K_2 foram 93,99 dia^{-1} a 358,09 dia^{-1} para o trecho ESP1, representando 73,4% de variação, seguido do ESP2 que variou de 16,94 dia^{-1} a 47,52 dia^{-1} (64,4% de variação), CAN variou de 80,99 dia^{-1} a 180,32 dia^{-1} (55,2% variação), SMA variou 165,12 dia^{-1} a 373,79 dia^{-1} (56,7% de variação) e FZZ que variou de 34,04 dia^{-1} a 118,58 dia^{-1} (71,3% de variação).

Na aplicação do método do traçador gasoso, os comprimentos de mistura para os trechos foram todos inferiores a 5 m, devido ao fato de serem cursos de água de pequeno porte. Para garantir uma mistura homogênea dos traçadores no curso de água os valores L_M foram superestimados, sendo eles: 40 m (ESP1), 20 m (ESP2), 14 m (CAN), 40 m (SMA) e 5 m (FZZ).

Tabela 11 - Coeficientes K_2 , corrigidos para a temperatura padrão de 20°C, dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Trechos	Mês/ano	$K_{2(20^{\circ}\text{C})}$ (dia^{-1})	R^2
ESP1	ago/16	181,45	0,80
	out/16	116,15	0,87
	jan/17	280,19	0,53
	mar/17	358,09	0,93
	mai/17	93,99	0,87
	jun/17	278,72	0,97
	jul/17	287,15	0,73
	ago/17	126,32	0,84
ESP2	ago/16	16,94	0,77
	out/16	27,78	0,78
	jan/17	21,78	0,72
	mar/17	42,68	0,98
	mai/17	47,52	0,80
	jun/17	41,68	0,87
	jul/17	18,82	0,90
	ago/17	31,50	0,80
CAN	ago/16	112,86	0,89
	out/16	155,36	0,95
	jan/17	172,45	0,83
	mar/17	80,99	0,97
	mai/17	164,89	0,75
	jun/17	180,32	0,86
	jul/17	124,79	0,96
	ago/17	140,78	0,91
SMA	ago/16	373,79	0,68
	out/16	315,80	0,99
	jan/17	366,25	0,72
	mar/17	372,20	0,95
	mai/17	345,23	0,41
	jun/17	257,97	0,87
	jul/17	344,92	0,82
	ago/17	165,12	0,92
FZZ	ago/16	118,58	0,78
	out/16	51,74	0,96
	jan/17	39,27	0,76
	mar/17	44,52	0,87
	mai/17	63,62	0,87
	jun/17	37,17	0,99
	jul/17	34,04	0,80
	ago/17	42,46	0,79

5.5 Velocidades de dissolução da sonda solúvel flutuante

Os coeficientes angulares dos ajustes dos dados ao modelo utilizado para a estimativa do V_s (Equação 13) estão apresentados nos Apêndices 1 a 8.

O trecho SMA apresentou o maior V_s ($0,778 \text{ mm.min}^{-1}$), e no FZZ foi observado o menor V_s ($0,079 \text{ mm.min}^{-1}$). Os valores médios das velocidades de dissolução nos trechos foram $0,162 \text{ mm.min}^{-1}$ (ESP1), $0,148 \text{ mm.min}^{-1}$ (ESP2), $0,282 \text{ mm.min}^{-1}$ (CAN), $0,610 \text{ mm.min}^{-1}$ (SMA) e $0,129 \text{ mm.min}^{-1}$ (FZZ).

A variação dos valores de V_s para o trecho ESP1 foi de $0,157 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,168 \text{ mm.min}^{-1}$, representando 6,7% de variação, seguido de ESP2 que variou de $0,130 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,174 \text{ mm.min}^{-1}$ (25,1% de variação), CAN variou de $0,253 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,312 \text{ mm.min}^{-1}$ (19,0% variação), SMA variou $0,548 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,778 \text{ mm.min}^{-1}$ (29,5% de variação) e FZZ variou de $0,079 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,186 \text{ mm.min}^{-1}$ (57,5% de variação).

A variação dos valores de K_s para o trecho ESP1 foi de $7,26 \text{ dia}^{-1}$ a $7,69 \text{ dia}^{-1}$, seguido de ESP2 que variou de $6,12 \text{ dia}^{-1}$ a $7,88 \text{ dia}^{-1}$, CAN variou de $11,64 \text{ dia}^{-1}$ a $14,73 \text{ dia}^{-1}$, SMA variou $24,50 \text{ dia}^{-1}$ a $38,13 \text{ dia}^{-1}$ e FZZ variou de $3,73 \text{ dia}^{-1}$ a $8,46 \text{ dia}^{-1}$.

Tabela 12 - Valores de V_S corrigidos para a temperatura padrão de 20°C, dos trechos dos riachos estudados no período de ago/16 a ago/17 correspondente aos experimentos em campo

Trechos	Mês/ano	$V_{S(20^{\circ}\text{C})}$ (mm.min ⁻¹)	R ²
ESP1	ago/16	0,161	0,99
	out/16	0,160	0,99
	jan/17	0,168	0,99
	mar/17	0,163	0,99
	mai/17	0,161	0,99
	jun/17	0,162	0,99
	jul/17	0,157	0,99
	ago/17	0,168	0,99
ESP2	ago/16	0,141	0,99
	out/16	0,145	0,99
	jan/17	0,174	0,99
	mar/17	0,161	0,99
	mai/17	0,152	0,99
	jun/17	0,146	0,99
	jul/17	0,130	0,99
	ago/17	0,142	0,99
CAN	ago/16	0,312	0,99
	out/16	0,253	0,99
	jan/17	0,302	0,99
	mar/17	0,281	0,99
	mai/17	0,272	0,99
	jun/17	0,309	0,99
	jul/17	0,263	0,99
	ago/17	0,264	0,99
SMA	ago/16	0,566	0,99
	out/16	0,622	0,98
	jan/17	0,548	0,99
	mar/17	0,607	0,99
	mai/17	0,586	0,99
	jun/17	0,614	0,98
	jul/17	0,778	0,97
	ago/17	0,559	0,99
FZZ	ago/16	0,093	0,99
	out/16	0,079	0,99
	jan/17	0,119	0,99
	mar/17	0,139	0,99
	mai/17	0,136	0,99
	jun/17	0,129	0,99
	jul/17	0,156	0,97
	ago/17	0,186	0,99

5.6 Resultados das análises estatísticas

O teste de Kruskal-Wallis, considerando os fatores espacial (trechos dos riachos) e temporal (datas dos experimentos em campo), indicou que todas as variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas, e também os K_2 e V_S , apresentaram variações estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para o fator espacial (Tabela 13).

Tabela 13 - Teste de Kruskal-Wallis realizado para as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, K_2 e V_S , considerando os fatores espacial e temporal. Os casos em que houve diferença significativa ($p < 0,05$) foram destacados em negrito

*Variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, V_S e K_2	Fator espacial	Fator temporal
L (m)	$p < 0,05$	0,931
Y (m)	$p < 0,05$	0,795
Q ($m^3.s^{-1}$)	$p < 0,05$	0,925
U ($m.s^{-1}$)	$p < 0,05$	0,967
Rey (-)	$p < 0,05$	0,963
Fr (-)	$p < 0,05$	0,998
V_S ($mm.min^{-1}$)	$p < 0,05$	0,997
K_2 (dia^{-1})	$p < 0,05$	0,996

*L é a largura média do trecho do riacho, Y a profundidade média, Q a vazão, U velocidade média, Rey o número de Reynolds, Fr o número de Froude, V_S velocidade de dissolução e o K_2 o coeficiente de reaeração superficial.

Os coeficientes K_2 apresentaram, em geral, correlação positiva e significativa (Tabela 14) com Fr ($r = 0,74$), V_S ($r = 0,70$), U ($r = 0,68$), entre outras. Porém, apenas com a variável Y o K_2 apresentou correlação negativa e significativa ($r = -0,47$). Os V_S apresentaram a maior correlação positiva e significativa com Fr ($r = 0,58$) e U ($r = 0,53$) e correlação significativa negativa com Y ($r = -0,55$).

Tabela 14 - Correlações de Spearman entre as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, V_s e K_2 dos trechos dos riachos. Os coeficientes estatisticamente significativos foram destacados em negrito

*	L	Y	Q	U	Rey	Fr	V_s	K_2
L	1,00	-0,03	0,26	-0,16	0,08	-0,16	0,50	0,28
Y		1,00	0,24	-0,19	0,14	-0,38	-0,55	-0,47
Q			1,00	0,74	0,95	0,64	0,52	0,49
U				1,00	0,89	0,97	0,53	0,68
Rey					1,00	0,80	0,52	0,60
Fr						1,00	0,58	0,74
V_s							1,00	0,70
K_2								1,00

*L é a largura média do trecho do riacho (m), Y a profundidade média (m), Q a vazão ($m^3.s^{-1}$), U velocidade média ($m.s^{-1}$), Rey o número de Reynolds (-), Fr o número de Froude (-), V_s velocidade de dissolução ($mm.min^{-1}$) e o K_2 o coeficiente de reaeração superficial (dia^{-1}).

Sobre os modelos desenvolvidos para predição do K_2 (Tabela 15), o modelo RLM1 apresentou o menor coeficiente de determinação (0,38). Ao adicionar a variável Q no RLM2, o R^2 aumentou para 0,71, representando um aumento de aproximadamente 46,5% em relação ao RLM1. A adição da variável U no RLM3 não contribuiu para o aumento do coeficiente R^2 (0,71). Porém, a adição da variável Rey no RLM4 contribuiu para o aumento do coeficiente R^2 (0,74), um aumento de 4,05% em relação ao RLM3. A adição da variável Fr no RLM5 contribuiu para a redução do coeficiente R^2 (0,73), mas adição do V_s no RLM6 contribuiu para o aumento do coeficiente R^2 (0,75), em aproximadamente 1,33%. O modelo RLS7 ($R^2 = 0,43$) apresentou um R^2 superior ao modelo RLM1, porém ambos foram considerados não adequados.

As variáveis Q, U, Rey e o V_s exerceram influência significativa nos modelos de predição do K_2 desenvolvidos, de acordo com a probabilidade de significância ($p < 0,05$) das variáveis nos modelos.

Tabela 15 - Modelos RLM e RLS, de predição do K_2 , desenvolvidos com os dados logaritimizados e baseados nas variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas, e também V_s dos trechos dos riachos

Modelo de regressão	Variável dependente	Variáveis independentes*	β	SE	p	R^2
1	K_2	β_0	2,69	0,45	0,00	0,38
		L	0,46	0,19	0,02	
		Y	-1,08	0,24	0,00	
2	K_2	β_0	-1,28	0,68	0,07	0,71
		L	0,03	0,15	0,82	
		Y	-1,41	0,17	0,00	
		Q	0,48	0,07	0,00	
3	K_2	β_0	-1,26	0,69	0,08	0,71
		L	0,36	0,39	0,36	
		Y	-1,02	0,46	0,03	
		Q	0,10	0,43	0,81	
		U	0,38	0,42	0,37	
4	K_2	β_0	-10,98	4,15	0,01	0,74
		L	-1,26	0,77	0,11	
		Y	-5,13	1,79	0,01	
		Q	0,44	0,43	0,31	
		U	-5,30	2,43	0,04	
		Rey	5,50	2,32	0,02	
5	K_2	β_0	-14,78	13,36	0,28	0,73
		L	-1,31	0,80	0,11	
		Y	-5,36	1,96	0,01	
		Q	0,46	0,44	0,30	
		U	-5,11	2,54	0,05	
		Rey	5,59	2,37	0,02	
		Fr	-0,29	0,96	0,77	
6	K_2	β_0	-20,79	13,49	0,13	0,75
		L	-0,64	0,87	0,47	
		Y	-5,49	1,91	0,01	
		Q	0,51	0,43	0,24	
		U	-4,15	2,54	0,11	
		Rey	5,06	2,33	0,04	
		Fr	-0,57	0,95	0,55	
		V_s	-0,84	0,50	0,10	
7	K_2	β_0	5,87	0,25	0,00	0,43
		V_s	1,07	0,19	0,00	

*L é a largura média do trecho do riacho (m), Y a profundidade média (m), Q a vazão ($m^3.s^{-1}$), U a velocidade média ($m.s^{-1}$), Rey o numero de Reynolds (-), Fr o número de Froude (-), V_s a velocidade de dissolução ($m.dia^{-1}$), K_2 o coeficiente de reaeração superficial (dia^{-1}), β_0 o intercepto, β o coeficiente angular, p a probabilidade de significância (-) e SE é o erro padrão.

Os coeficientes de determinação das correspondências teóricas entre os K_2 mensurados e modelados foram todos superiores a 0,20 (Figura 14). A correspondência teórica entre os K_2 mensurados e os modelados pelo modelo RLM1 apresentou um R^2 igual a 0,38, seguido de 0,64 (K_2 modelados pelo RLM2), 0,65 (K_2 modelados pelo RLM3), 0,72 (K_2 modelados pelo RLM4), 0,73 (K_2 modelados pelo RLM5) e 0,75 (K_2 modelados pelo RLM6). A correspondência teórica entre os K_2 mensurados e os modelados pelo RLS7 apresentou um R^2 igual a 0,20. Os modelos RLM1 e RLS7 foram considerados inadequados para a predição do K_2 , pois ambos possuíram os menores valores de R^2 .

Figura 14 - Gráficos comparativos entre os K_2 modelados e mensurados. (A) K_2 modelado pelo RLM1; (B) K_2 modelado pelo RLM2; (C) K_2 modelado pelo RLM3; (D) K_2 modelado pelo RLM 4; (E) K_2 modelado pelo RLM5; (F) K_2 modelado pelo RLM6 e (G) K_2 modelado pelo RLS7

Fonte: Autor (2018).

6 DISCUSSÃO

6.1 Variação espacial e temporal do K_2

A variação dos valores de K_2 foi superior à variação obtida em cursos de água localizados no Hemisfério Norte (Tabela 16). Aproximadamente 80% dos K_2 dos cinco trechos dos riachos estudados foram superiores aos K_2 encontrado por Jin et al. (2012), que realizaram uma amostragem durante oito meses em riachos norte-americanos, com características hidrológicas (U e Q) distintas dos cinco trechos estudados nesta presente pesquisa (Tabela 16).

Tabela 16 - Comparação entre trabalhos que estimaram a reaeração superficial de cursos de água com diferentes faixas de vazão (Q) e velocidade do escoamento da água (U), e utilizaram o método do traçador gasoso

Local	U (m.s ⁻¹)	Q (m ³ .s ⁻¹)	K_2 (dia ⁻¹)	Referência
São Carlos/São Paulo/ Brasil	0,01 - 0,33	0,001 - 0,109	16,9 - 373,8	Presente pesquisa
Tübingen/ Alemanha	0,00 - 0,05	0,005 - 0,020	40 - 70	Knapp, Osenbrück e Cirpka (2015)
Sierra Nevada/ California/EUA	0,09 - 0,29	0,043 - 0,057	47 - 66	Benson et al. (2014)
Santa Catarina/ Brasil	0,05 - 0,52	0,019 - 4,485	25,8 - 367,7	Soares et al. (2013)
Manhattan/ Kansas/EUA	0,01 - 0,08	0,0005 - 0,0062	2 - 130	Riley e Dodds (2013)
Tennessee/EUA	0,02 - 0,09	0,0051 - 0,0785	5,4 - 40	Jin et al. (2012)

O trecho FZZ foi o que apresentou a menor vazão, velocidade e concentração de OD, e também forneceu valores elevados de K_2 (34,04 dia⁻¹ a 118,6 dia⁻¹), assim como observado por Riley e Dodds (2013), que obtiveram valores de K_2 elevados (2 dia⁻¹ a 130 dia⁻¹) em riachos norte-americanos com pequenas vazões e velocidades (Tabela 16). As baixas concentrações de OD no trecho FZZ podem estar associados ao déficit de OD existente no meio líquido, e isso consequentemente resulta uma maior taxa de reaeração. De acordo com von Sperling (2014), quanto o maior o déficit existente entre a C_{sat} e a concentração de OD existente no meio líquido, maior é taxa de reaeração deste curso de água natural.

Knapp, Osenbrück e Cirpka (2015) obtiveram uma variação de K_2 pequena (Tabela 16). Embora os autores tenham estimado o K_2 em quatro seções de um mesmo riacho localizado na Alemanha, foi possível verificar que a presença de quedas de água no curso de água influenciou diretamente a reaeração superficial destes cursos. Assim como Knapp, Osenbrück e Cirpka (2015), Benson et al. (2014) reportaram que riachos turbulentos caracterizados pela presença de quedas de água contribuem para a obtenção de elevados K_2 e concentrações de OD, o que ocorreu com o trecho SMA, que apresentou o maior K_2 ($373,8 \text{ dia}^{-1}$) e elevados valores de OD ($5,02 \text{ mg.L}^{-1}$ a $8,13 \text{ mg.L}^{-1}$).

Benson et al. (2014), que estudaram dois riachos norte-americanos (Tabela 16), observaram que ambos os riachos foram similares em termos de morfologia (e.g., presença de cascatas, pequenos lagos e declividades similares) e hidrologia (contribuições de águas subterrâneas durante o verão, larguras e profundidade médias similares). Isso contribuiu para uma menor variação nos coeficientes K_2 (47 dia^{-1} a 66 dia^{-1}). Na presente pesquisa, os cinco trechos estudados tiveram características morfológicas (e.g., largura, profundidade, rugosidade do leito) e hidrológicas (e.g., vazão e velocidade) distintas, pois a maioria deles se encontrava em bacias hidrográficas diferentes, com exceção dos trechos ESP1 e ESP2. Essa diferença certamente contribuiu para a obtenção de uma ampla faixa de variação do K_2 em comparação às obtidas por Benson et al. (2014) e Knapp, Osenbrück e Cirpka (2015).

Nos riachos investigados, todas as variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas apresentaram variação espacial significativa. Entre as variáveis físicas, a profundidade da lâmina d'água foi correlacionada negativamente com o K_2 , o que confirma a análise feita por Chapra (1997) e Queiroz, Matos e von Sperling (2015). Segundo esses autores, cursos de água rasos e com elevadas velocidades possuem elevados K_2 devido a maiores turbulências na interface ar-água do escoamento.

A variação dos valores de K_2 relatada na presente pesquisa foi semelhante à obtida por Soares et al. (2013), em riachos localizados no Sul do Brasil. As vazões dos cursos de água estudados pelos autores foram aproximadamente 40 vezes superior a do trecho SMA (trecho que possuiu a maior vazão - $0,109 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Isto indicou que, se analisada apenas a influência da variável hidrológica Q sobre o K_2 , esta variável não exerceu grande alteração sobre a variação de tal coeficiente.

Cursos de água de grande porte, em relação aos trechos dos riachos estudados, geralmente possuem elevadas profundidades e larguras, estas características físicas correlacionam-se negativamente com o K_2 , pois dificultam o desenvolvimento da turbulência na interface ar-água do escoamento (QUEIROZ, MATOS, von SPERLING, 2015).

Os elevados valores de K_2 reportados por Soares et al. (2013) estiveram correlacionados positivamente com a velocidade dos cursos d'água estudados pelos autores. As maiores velocidades ($0,52 \text{ m.s}^{-1}$) contribuíram para a obtenção de elevados K_2 ($367,7 \text{ dia}^{-1}$). O mesmo ocorreu nesta presente pesquisa, os trechos ESP1 e SMA possuíram as maiores velocidades e também os maiores valores de K_2 , esta correlação foi comprovada por meio da análise estatística dos resultados, que indicou uma forte correlação positiva entre K_2 e U (Spearman, $r > 0,68$).

6.2 Variação espacial e temporal do V_s

A não variação temporal, e variação espacial, significativa das variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água influenciaram a variação do V_s . Estas variáveis apresentaram correlação positiva (Spearman, $r > 0,5$) e negativa (Spearman, $r > -0,5$) com o V_s , e contribuíram para a variação temporal não significativa e espacial significativa de tal variável nos cinco trechos dos riachos. Até o momento nenhum trabalho realizou uma comparação espacial e temporal dos V_s obtidos em cursos de água com uma sonda solúvel flutuante no formato esférico constituída de ácido oxálico dihidratado.

O composto químico utilizado na confecção da sonda solúvel flutuante provavelmente influenciou os V_s . Schulz (1989) estudou diversos tipos de compostos, e concluiu que os principais utilizados são o ácido benzoico e o oxálico dihidratado, e que o ácido benzoico foi menos solúvel no meio líquido do que o ácido oxálico dihidratado. Constatou-se que a variação dos valores de V_s obtidos por trabalhos que utilizaram ácido benzoico foi inferior ao de trabalhos que utilizaram o ácido oxálico dihidratado (Tabela 17).

Tabela 17 - Comparação entre geometria, composto solúvel e variação de V_s obtidos em trabalhos que utilizaram o método da sonda solúvel flutuante em diferentes escalas e velocidades do escoamento da água (U)

Escala	U ($m.s^{-1}$)	Geometria	Composto solúvel	V_s ($mm.min^{-1}$)	Referência
Riachos naturais	0,01 - 0,33	Esférica	Ácido oxálico dihidratado	0,08 - 0,77	Presente pesquisa
Tanque retangular agitado por jatos	0,014 - 0,026	Esférica	Ácido oxálico dihidratado	0,114 - 0,186	Ferreira et al. (No prelo)
Canal hidráulico circular	0,22 - 0,65	Esférica	Ácido oxálico dihidratado	0,066 - 0,144	Ferreira et al. (No prelo)
Tanque retangular agitado pelo vento	*	Cilíndrica	Ácido benzoico	0,00116 - 0,00350	Belanger et al. (1999)
Tanque retangular agitado por ondas e pelo vento	*	Cilíndrica	Ácido benzoico	3,18 - 12,72	Belanger et al. (1999)
Rio natural	0,03 - 2,01	Cilíndrica	Ácido benzoico	0,0013 - 0,0060	Belanger et al. (1999)
Tanque cilíndrico com agitação hidrodinâmica	*	Cúbica	Ácido oxálico dihidratado	0,031 - 0,358	Costa (1999)
Rios naturais	0,33 - 0,75	Cúbica	Ácido oxálico dihidratado	0,017 - 0,284	Costa (1999)
Tanque cilíndrico com agitação hidrodinâmica	*	Esférica	Ácido benzoico	0,00053 - 0,00450	Rodrigues (1996)
Tanque cilíndrico com agitação hidrodinâmica	*	Cilíndrica	Ácido oxálico dihidratado	0,036 - 0,270	Giorgetti e Schulz (1990)
Canal hidráulico circular	0,23 - 0,39	Cilíndrica	Ácido benzoico	0,00088 - 0,00209	Bicudo e James (1989)

*Os autores representaram o nível de turbulência através de variáveis que não estão descritas na presente pesquisa, tais como: velocidade do vento, frequência (Hz), entre outras.

Os valores de V_s do ácido benzoico em diferentes trabalhos (Tabela 17) tiveram ordem de grandeza menor (10^{-2}) em comparação àqueles com ácido oxálico dihidratado (10^{-1}). A exceção foi o trabalho desenvolvido por Belanger et al. (1999) em um tanque de agitação hidrodinâmica, no qual os valores de V_s ($3,18 mm.min^{-1}$ a $12,72 mm.min^{-1}$) foram elevados com relação a outros trabalhos (Tabela 17). Nesse caso, os autores concluíram que esses elevados valores provavelmente estiveram associados à elevada turbulência gerada pelo efeito combinado de dois sistemas mecânicos (ventos a $10,4 m.s^{-1}$ e formação de ondas na água) fornecidos pelo aparato experimental.

O formato geométrico da sonda solúvel flutuante também influenciou os V_s , principalmente devido ao efeito de borda presente no sólido e a área superficial em

contato com o meio líquido. Costa (1999) verificou o efeito de borda no formato cilíndrico, que causou maior dissolução do sólido nas laterais das pastilhas, e reduziu desproporcionalmente a massa do sólido devido a uma maior dissolução nas laterais, com consequente aumento dos valores de V_S . Na presente pesquisa, o formato esférico resultou em um efeito de borda que atuou no centro da esfera sólida, e impediu que o diâmetro fosse medido nessa região, devido a uma saliência anelar de aproximadamente 2 mm. O diâmetro do sólido esférico foi medido na diagonal do sólido solúvel (Figura 5), onde o efeito de borda não atuou, o que resultou em valores de V_S mais confiáveis.

O diâmetro inicial das sondas solúveis flutuantes esféricas utilizadas nesta pesquisa foi de aproximadamente 31,5 mm, e o modelo que representou o decréscimo do diâmetro com relação ao tempo (Equação 13) foi linear (Apêndices 1 a 8), com valores de R^2 sempre superiores a 0,97. Rodrigues (1996) utilizou três diferentes diâmetros de sondas solúveis (16 mm, 23 mm e 30 mm) e observou que quanto maior a área superficial do sólido que foi exposto à dissolução, maior foi o V_S . A autora concluiu que após a redução de 50% do diâmetro inicial, a relação do diâmetro da sonda pelo tempo apresentou um modelo não linear. A não linearidade foi atribuída à supersaturação do meio líquido com o composto químico solúvel que foi utilizado na confecção do sólido (ácido benzoico). Conforme também observado por Belanger et al. (1999) e Costa (1999) em seus trabalhos, nesta presente pesquisa, como os cursos de água naturais estiveram sempre em fluxo contínuo e com constante renovação da água, o fenômeno de supersaturação por ácido oxálico não ocorreu.

A utilização do ácido oxálico dihidratado como composto químico solúvel para a confecção de sólidos no formato de pastilhas cilíndricas foi destacada por Giorgetti e Schulz (1990), que por meio diversos experimentos controlados, obtiveram curvas distintas de dissolução para cada intensidade de turbulência testada. Os autores concluíram que o ácido oxálico dihidratado foi um material adequadamente sensível para representar as variações nos níveis de intensidade de turbulência (e.g., U , Q , Re e Fr) em escala laboratorial.

Na presente pesquisa, o trecho SMA forneceu os maiores valores de V_S (0,54 mm.min^{-1} a 0,77 mm.min^{-1}). Este trecho teve elevadas vazões e velocidades, além da presença de diversas pequenas quedas d'água, o que contribuiu com valores elevados de V_S , porém não foram tão elevados quanto aos de Belanger et al. (1999)

(Tabela 17). Apesar da existência de ondas e quedas d'água no trecho SMA, o riacho não teve a influência de ventos em altas velocidades, que poderiam agir sobre o suporte flutuante e interferir no percurso da sonda solúvel flutuante.

A elevada variação do V_S ($0,08 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,77 \text{ mm.min}^{-1}$) entre os diferentes trechos estudados foi influenciada, principalmente, pelo fator espacial significativo (Tabela 13). Belanger et al. (1999) obtiveram V_S menores ($0,006 \text{ mm.min}^{-1}$ a $0,0013 \text{ mm.min}^{-1}$) no Rio Kissimmee (EUA) com velocidades média de escoamento da água elevadas (até 2 m.s^{-1}). Os baixos valores de V_S obtidos pelos autores podem ser atribuídos ao composto químico utilizado, que foi o ácido benzoico.

A variável hidráulica Fr apresentou a maior correlação positiva (Spearman, $r = 0,58$) com V_S e a variável física Y apresentou a maior correlação negativa (Spearman, $r = -0,55$) (Tabela 14). Bicudo e James (1989) verificaram que a velocidade média e a profundidade média do escoamento da água foram as variáveis que mais influenciaram positivamente e negativamente os V_S , respectivamente. Esta diferença de correlação obtida entre a presente pesquisa e o trabalho desenvolvido por Bicudo e James (1989) pode ser atribuída à influência da velocidade do escoamento sobre o número de Fr .

Ficou evidente por meio da comparação entre diferentes trabalhos (Tabela 17) que esta pesquisa foi a primeira em que o V_S foi estimado por meio do diâmetro do sólido solúvel, constituído de ácido oxálico dihidratado e com um formato esférico. Todos os valores dos coeficientes de determinação dos V_S foram superiores a 0,97, indicando uma adequada correlação entre a variação do diâmetro com o tempo, desconsiderando o efeito de borda e considerando a padronização para a temperatura de 20°C . Resultados semelhantes a estes foram obtidos por Ferreira et al. (no prelo), que utilizaram o mesmo tipo de sonda solúvel flutuante, porém em escala laboratorial. Devido à sensibilidade e aplicabilidade do método, os autores recomendaram a utilização deste método em cursos de água naturais de diferentes portes.

6.3 Correlação entre K_2 e V_S

No fenômeno da reaeração superficial, o aumento da turbulência produz um aumento da área da superfície livre do curso de água em contato com o ar atmosférico, devido à deformação da própria superfície, enquanto que, no caso da

dissolução da sonda solúvel flutuante, o aumento da turbulência diminui o diâmetro e consequentemente a área superficial do sólido solúvel (FERREIRA et al., NO PRELO). A importância da quantificação da deformação da superfície livre na estimativa da K_2 foi destacada nos trabalhos de Nguyen e Tan (2013) e Gonçalves et al. (2017) por meio de variáveis que auxiliam na caracterização da turbulência na superfície, tais como a raiz média quadrática da velocidade na superfície e também o V_s .

Por meio dos modelos RLM (Tabela 15), foi possível observar que algumas das variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água, especialmente Y , Q , U e Rey , foram as mais significativas ($p < 0,05$). A maioria dos trabalhos que desenvolveram modelos de predição do K_2 (Tabela 2) utilizaram a razão entre U e Y (e.g., JHA; OJHA; BHATIA, 2004; KALBURGI et al., 2015).

De acordo com o modelo RLM3, 71% da variabilidade de K_2 puderam ser explicados pela variabilidade das características físicas e hidrológicas do escoamento da água. Resultados semelhantes foram encontrados por Jha, Ojha e Bhatia (2001) que obtiveram um elevado R^2 (0,96) para uma modelo de predição de K_2 baseado na razão U/Y do Rio Kali (Índia) com U variando de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ a $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ e Y variando de $0,1 \text{ m}$ a 1 m , semelhantes aos trechos dos riachos estudados.

A influência da variável V_s nos modelos RLM de predição do K_2 foi verificada no modelo RLM6, que forneceu um R^2 (0,75), e foi superior aos R^2 dos modelos RLM2 ($R^2 = 0,71$), RLM3 ($R^2 = 0,71$), RLM4 ($R^2 = 0,74$) e RLM5 ($R^2 = 0,73$). Ficou evidenciado que as variáveis Fr e V_s não foram estatisticamente significativas ($p > 0,05$) em todos os modelos RLM desenvolvidos. Entretanto as variáveis L , Y , Q e Rey foram estatisticamente significativas para todos os modelos desenvolvidos. Conforme reportado por Arora e Keshari (2017) a velocidade é uma variável que afeta decisivamente a turbulência em curso de água, visto que ela altera as demais variáveis físicas e hidráulicas (L , Y , Rey e Fr) (JHA; OJHA; BHATIA, 2004; KALBURGI et al., 2015; ARORA; KESHARI, 2017).

Os valores dos R^2 dos modelos RLM1 ($R^2 = 0,38$) e RLM2 ($R^2 = 0,71$) e RLM3 ($R^2 = 0,71$) foram superiores se comparados com os R^2 dos ajustes dos K_2 modelados e mensurados (Figura 14). O R^2 fornecido pelo ajuste da linha de correspondência teórica indicou que estes modelos não foram adequados para estimar o K_2 , visto que os R^2 foram 0,38 (gráfico A – RLM1), 0,64 (gráfico B – RLM2) e 0,65 (gráfico C – RLM3). A melhor relação entre K_2 mensurado e modelado foi

obtida pelo modelo RLM6, que envolveu todas as variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas, além do V_S , e forneceu o maior R^2 (0,75) de acordo com a o ajuste da linha teórica entre os K_2 modelados e mensurados.

De acordo com o modelo RLS7, aproximadamente 43% da variabilidade de K_2 foram explicados por V_S . O R^2 fornecido pelo ajuste da linha de correspondência teórica indicou que o RLS7 não foi adequado para estimar o K_2 , visto que o R^2 foi 0,20 (Figura 14 - gráfico G). Ferreira et al. (no prelo) obtiveram dois modelos do tipo RLS, e relacionaram apenas K_2 com V_S . Os modelos desenvolvidos pelos autores forneceram valores de R^2 iguais 0,80 e 0,90, em dois aparatos experimentais distintos. Os autores observaram que para cada estrutura geradora de turbulência, os modelos apresentaram coeficientes angulares diferentes, representando um efeito da escala de turbulência.

O efeito da escala de turbulência, foi reportado por Rodrigues (1996), em que na escala laboratorial não há influência de fatores naturais (e.g., irregularidades físicas do leito do escoamento, presença de obstáculos no escoamento da água, entre outros). Esses fatores naturais influenciam diretamente o V_S devido a presença de caminhos preferenciais no trajeto da sonda, zonas de preferenciais de dissolução do sólido.

Os K_2 e V_S foram influenciados por diversas variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas, de acordo com as correlações de Spearman obtidas (Tabela 14). Entre elas, a velocidade média do escoamento da água apresentou uma elevada correlação positiva com K_2 e V_S . A razão entre K_2 e V_S não foi constante e foi dependente da turbulência representada pela velocidade do escoamento (Figura 16). Para que o método da sonda solúvel flutuante no formato geométrico esférico e constituída de ácido oxálico dihidratado seja válido, Bicudo e James (1989) reportaram que esta razão dever ser constante, semelhante à razão existente entre o K_T e o K_2 , que fornece a acurácia e validade do método do traçador gasoso.

Figura 15 - Razão entre K_2 e K_S e a relação com a velocidade média do escoamento da água nos trechos dos riachos estudados

Fonte: Autor (2018).

De maneira geral, nota-se que a razão entre K_2 e K_S é crescente com relação à velocidade média, indicando que K_2 é mais sensível a U do que K_S , e que este fato pode estar relacionado à dinâmica de áreas superficiais. A área superficial do curso de água em contato com o ar atmosférico é muito maior que a área superficial do sólido solúvel em contato com o meio líquido. O aumento da área superficial do sólido solúvel, e a utilização de um composto químico mais solúvel que o ácido oxálico, podem ser possibilidades para transformar a razão entre K_2 e K_S constante e independente da turbulência. (BICUDO; JAMES, 1989).

Também foi possível verificar que a razão entre K_2 e K_S forneceu resultados de forma agrupada para cada trecho de riacho estudado. Alguns dos trechos apresentaram uma relação aparentemente constante (SMA e ESP2), outros se mostraram crescentes (ESP1 e CAN) e o FZZ mostrou-se decrescente com relação a velocidade do escoamento. Esses agrupamentos confirmam a hipótese de que o método da sonda solúvel flutuante, no formato esférico e constituída de ácido oxálico dihidratado, ainda possui potencial para ser utilizada em cursos de água naturais com diferentes características físicas, hidrológicas e hidráulicas.

7 CONCLUSÃO

A análise da variação espacial e temporal do K_2 nos trechos dos riachos, e as metodologias utilizadas na estimativa de tal coeficiente, permitiram que fossem estabelecidas as seguintes conclusões e recomendações acerca desta pesquisa:

i. Os K_2 e V_S dos trechos foram caracterizados por uma variação espacial significativa ($p < 0,05$) e temporal não significativa ($p > 0,05$). Os cinco trechos apresentaram valores de K_2 compatíveis com estudos de rios e riachos brasileiros, com coeficientes frequentemente maiores que os reportados na literatura para regiões localizadas no Hemisfério Norte. Além disso, as variáveis físicas, hidrológicas e hidráulicas do escoamento da água correlacionaram-se positivamente ($0,50 < r < 0,74$) e negativamente ($-0,38 < r < -0,55$) com os K_2 e V_S dos trechos dos riachos, respectivamente;

ii. Diversos modelos para predição do K_2 foram desenvolvidos, um ajuste não satisfatório foi do RLM1 ($R^2 = 0,38$), baseado apenas nas variáveis físicas dos trechos dos riachos estudados. Um ajuste adequado ($R^2 = 0,75$) foi do RLM6, baseado em todas as variáveis físicas, hidrológicas, hidráulicas e a velocidade de dissolução da sonda solúvel flutuante. Nos modelos, a vazão e profundidade dos foram as principais variáveis preditoras do K_2 , provavelmente devido ao efeito do aumento da área interfacial ar-água com o aumento da vazão e diminuição da profundidade. Eventos extremos de precipitação ou variações na disponibilidade hídrica, relacionadas a fatores naturais ou antrópicos podem, portanto, interferir no fenômeno da reaeração superficial, e consequentemente, na concentração de oxigênio dissolvido no curso de água;

iii. No método do traçador gasoso, a injeção de longa duração dos traçadores no curso de água, e a pré-dissolução do gás traçador antes dos experimentos de campo, mostraram-se eficientes devido à mínima perda de gás para a atmosfera. Recomenda-se que, pesquisas futuras estudem a viabilidade do uso de novos gases traçadores (e.g., óxido nitroso e xenônio), que sejam mais solúveis em água;

iv. Sobre o método da sonda solúvel flutuante, recomenda-se que, pesquisas futuras estudem a viabilidade do uso de novos compostos químicos, diferentes tamanhos e formatos geométricos, além de buscarem aprimoramentos no processo de confecção das sondas para minimizar o problema do efeito de borda. Também é recomendada a aplicação do método em cursos de água de maiores portes em relação aos trechos estudados nesta pesquisa;

v. Reforça-se a importância de pesquisas que aprimorem modelos e métodos de estimativa do K_2 . Especialmente em estudos de autodepuração de cursos de água receptores de águas residuárias. Se o K_2 for incorretamente estimado, os resultados poderão conduzir a conclusões equivocadas sobre a qualidade da água, refletindo especialmente sobre a concentração de oxigênio dissolvido, em resposta às cargas orgânicas lançados no curso de água, e trazer prejuízos de natureza financeira (e.g., elevados investimentos em tratamento de águas residuárias, devido ao K_2 subestimado) e danos ao meio ambiente (e.g., excesso de cargas orgânicas lançadas no curso de água receptor, devido ao K_2 superestimado).

REFERÊNCIAS

ADENEY, W. E.; BECKER, H. G. The Determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water. Part I. **Philosophical Magazine Series** 6, v. 38, n. 225, p. 317–338, 1919.

ARORA, S.; KESHARI, A. K. Estimation of re-aeration coefficient using MLR for modelling water quality of rivers in urban environment. **Groundwater for Sustainable Development**, p. 0–1, 2017.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Uso de traçadores na determinação de parâmetros de qualidade em escoamento naturais da água**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

BARROS, F. M. et al. Balanço de oxigênio no Rio Turvo Sujo-Mg em diferentes épocas do ano. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 1, p. 72–80, 2011.

BELANGER, T. V. et al. A simple field technique for accurate reaeration estimates in aquatic systems. **Lake and Reservoir Management**, v. 15, n. 3, p. 185–199, 1999.

BENNETT, J. P.; RATHBUN, R. E. Reaeration in open-channel flow. **U.S. Geological Survey Professional Paper No 737**, Washington, 1972.

BENSON, A. et al. Quantifying reaeration rates in alpine streams using deliberate gas tracer experiments. **Water**, v. 6, n. 4, p. 1013–1027, 2014.

BICUDO, J. R.; JAMES, A. Measurement of reaeration in streams: Comparison of techniques. **Journal of Environmental Engineering**, v. 115, n. 5, p. 992–1010, 1989.

BULLISTER, J. L.; WISEGARVER, D. P.; MENZIA, F. A. The solubility of sulfur hexafluoride in water and seawater. **Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 49, n. 1, p. 175–187, 2002.

CANALE, R. P. et al. Validation of water-quality model for Seneca River, N.Y. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 121, n. 3, p. 241–250, 1995.

CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling**. McGraw-Hill, 844 p., 1997.

CHAPRA, S. C.; DI TORO, D. M. Delta method for estimating primary productios, respiration, and reaeration in streams. **Journal of Environmental Engineering**, v. 117, n. 5, p. 640–655, 1991.

CHEN, L. FEI; HUANG, Y. Experimental study and characteristic finite element simulation of solute transport in a cross-fracture. **Geoscience Frontiers**, v. 7, n. 6, p. 963–967, 2016.

CHURCHILL, W. E.; ELMORE, H. L.; BUCKINGHAM, R. A. Prediction of stream reaeration rates. **Journal of Sanitary Engineering Division**, v. 88, n. 4, p. 1–46, 1962.

CLARK, JORDAN. F. et al. SF₆-³He Tracer release experiment: A new method of determining longitudinal dispersion coefficients in large rivers. **Environmental Science & Technology**, v. 30, n. 5, p. 1527–1532, 1996.

COSTA, O. S. **Contribuição à metodologia para determinação indireta do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais de água com emprego do método da sonda solúvel**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São carlos, 1999.

COX, B. A. A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. **The Science of the Total Environment**, v. 314–316, n. 3, p. 303–334, 2003a.

COX, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. **The Science of the Total Environment**, v. 314–316, n. 3, p. 335–377, 2003b.

DEMARS, B. O. L.; MANSON, J. R. Temperature dependence of stream aeration coefficients and the effect of water turbulence: A critical review. **Water Research**, v. 47, n. 1, p. 1–15, 2013.

DEMARS, B. O. L.; THOMPSON, J.; MANSON, J. R. Stream metabolism and the open diel oxygen method: Principles, practice, and perspectives. **Limnology and Oceanography: Methods**, v. 13, n. 7, p. 356–374, 2015.

EPA, United States Environmental Protection Agency. Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling. 2 ed. Athens, 455 p., 1985.

FERREIRA, M. S. et al. Estimativa do coeficiente de transferência de massa de oxigênio com o uso da técnica das sondas solúveis flutuantes: Um estudo de laboratório. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2018 (No prelo).

FISCHER, H. B. et al. **Mixing in inland and coastal waters**. San Diego: Academic Press, 483 p., 1979.

GIORGETTI, M. F.; GIANANTI, A. E. Avaliação do nível de turbulência em águas correntes e sua correlação com o coeficiente de reaeração superficial. **Anais do XII Congresso da ABES**, Camboriú, 1983.

GIORGETTI, M. F.; SCHULZ, H. E. Sobre o método da sonda solúvel flutuante para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial.

Anais do III Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Itapema, 1990.

GONÇALVES, J. C. S. I. et al. Reaeration coefficient estimate: new parameter for predictive equations. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 8, p. 307, 2017.

GUALTIERI, C.; DORIA, G. P. Gas-transfer at unsheared free surfaces. In: **Fluid Mechanics of the Environmental Interfaces**. Second edition, p. 145–179, 2008.

HIBBS, D. E.; PARKHILL, K. L.; GULLIVER, J. S. Sulfur hexafluoride gas tracer studies in streams. **Journal of Environmental Engineering**, v. 124, n. 9, p. 752–760, 1998.

HUISMAN, J. L.; WEBER, N.; GUJER, W. Reaeration in sewers. **Water Research**, v. 38, n. 5, p. 1089–1100, 2004.

JANZEN, J. G.; SCHULZ, H. E.; LAMON, A. W. Medidas da concentração de oxigênio dissolvido na superfície da água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 278–283, 2008.

JHA, R.; OJHA, C. S. P.; BHATIA, K. K. S. Refinement a predictive reaeration equations for a typical Indian river. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 6, p. 1047–1060, 2001.

JHA, R.; OJHA, C. S. P.; BHATIA, K. K. S. A supplementary approach for estimating reaeration rate coefficients. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 1, p. 65–79, 2004.

JIN, H. S. et al. Mixed tracer injection method to measure reaeration coefficients in small streams. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 223, n. 8, p. 5297–5306, 2012.

KALBURGI, P. B. et al. Evaluation of re-aeration equations for river Ghataprabha, Karnataka, India and development of refined equation. **Environmental Technology**, v. 36, n. 1, p. 79–85, 2015.

KILPATRICK, F. A.; COBB, E. D. Measurement of discharge using tracers. **Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey**, Book 3, Chap. A16, 52 p., 1985.

KNAPP, J. L. A.; OSENBRÜCK, K.; CIRPKA, O. A. Impact of non-idealities in

gas-tracer tests on the estimation of reaeration, respiration, and photosynthesis rates in streams. **Water Research**, v. 83, p. 205–216, 2015.

MATEUS, M. V. et al. Análise de incerteza e modelagem de qualidade da água do rio Uberaba, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 37, p. 1–15, 2015.

MELCHING, C. S.; FLORES, H. E. Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database. **Journal of Environmental Engineering**, v. 125, n. 5, p. 407–414, 1999.

MENEZES, J. P. C. et al. Deoxygenation rate, reaeration and potencial for self-purification of a small tropical urban stream. **Revista Ambiente e Água**, v. 10, n. 4, p. 748–757, 2015.

MOOG, D.; JIRKA, G. Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. **Journal of Environmental Engineering**, v. 124, n. 2, p. 104–110, 1998.

MORSE, N. et al. Using sound pressure to estimate reaeration in streams. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 26, n. 1, p. 28–37, 2007.

NGUYEN, M. T.; TAN, S. K. Effect of waves on reaeration. **AIChE Journal**, v. 59, n. 12, p. 4839–4845, 2013.

O'CONNOR, D. J.; DOBBINS, W. E. Mechanism of reaeration in natural streams. **Transaction of the American Society of Civil Engineers**, v. 123, n. 1, p. 641–666, 1958.

OWENS, S.; EDWARDS, R. W.; GIBBS, J. W. Some reaeration in natural streams. **Journal of Air Water Pollution**, v. 8, n. 819, p. 469–486, 1964.

OLIVEIRA, V. V. et al. Prediction of the longitudinal dispersion coefficient for small watercourses. **Acta Scientiarum-Technology**, v. 39, n. 3, p. 291–299, 2017

PARRA, B. G. et al. Uncertainty of discharge estimation in high-grade Andean streams. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 48, p. 42–50, 2016.

PATIL, S. et al. Intrastream variability in solute transport: Hydrologic and geomorphic controls on solute retention. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 118, p. 413–422, 2013.

PINHEIRO, A.; FAHT, G.; SILVA, M. R. DA. Determinação do coeficiente de reaeração em rios através do uso do traçador gasoso GLP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 107–116, 2012.

PUBCHEM. **Compound**. Disponível em: <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>>.

Acesso em: 19 dez. 2017.

QUEIROZ, F. M.; MATOS, A. T.; von SPERLING, M. Estimativa do coeficiente de reaeração da água em canal raso de fundo deslizante. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 79–88, 2015.

RATHBUN, R. E. et al. Laboratory studies of gas tracer for reaeration. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v. 104, n. 2, p. 215–229, 1978.

REID, S. E.; MACKINNON, P. A.; ELLIOT, T. Direct measurements of reaeration rates using noble gas tracers in the River Lagan, Northern Ireland. **Water and Environment Journal**, v. 21, n. 3, p. 182–191, 2007.

RILEY, A. J.; DODDS, W. K. Whole-stream metabolism: strategies for measuring and modeling diel trends of dissolved oxygen. **Freshwater Science**, v. 32, n. 1, p. 56–69, 2013.

RODRIGUES, I. C. **Determinação do coeficiente de reaeração superficial de um corpo d'água com o uso de sondas solúveis esféricas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

SALLA, M. R. et al. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105–114, 2013.

SCHULZ, H. E. **Investigação do mecanismo de reaeração da água em escoamento e sua correlação com o nível de turbulência junto a superfície**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

SILVEIRA, A. **Influência da umidade atmosférica sobre o mecanismo de transferência de gases através da interface água-atmosfera**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SOARES, P. A. et al. Determination of reaeration-rate coefficient by modified tracer gas technique. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 19, p. 2710–2720, 2013.

STREETER, H. W.; PHELPS, B. A Study of the pollution and natural purification of the Ohio River. **U.S. Public health Service bulletin**. n.146, 75 p. 1925.

THENE, J. R.; GULLIVER, J. S. Gas-transfer measurements using headspace analysis of propane. **Journal of Environmental Engineering**, v. 116, n. 6, p. 1107–1124, 1990.

TROMBONI, F. et al. Heterogeneity and scaling of photosynthesis, respiration, and nitrogen uptake in three Atlantic Rainforest streams. **Ecosphere**, v. 8, n. 9, 2017.

TSIVOGLIOU, E. C.; WALLACE, J. R. Characterizing stream reaeration capacity. **U. S. Environmental Protection Agency Report**, 317 p., 1972.

TYROLLER, L. et al. Application of the gas tracer method for measuring oxygen transfer rates in subsurface flow constructed wetlands. **Water Research**, v. 44, n. 14, p. 4217–4225, 2010.

von SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizont: Editora UFMG, 2014.

WANNINKHOF, R.; MULHOLLAND, P. J.; ELWOOD, J. W. Gas exchange rates for a first-order stream determined with deliberate and natural tracers. **Water Resources Research**, v. 26, n. 7, p. 1621–1630, 1990.

WEBSTER, J. R.; VALETT, H. M. Solute Dynamics. In: **Methods in Stream Ecology**. 2. ed. Elsevier, 2007. p. 169–185.

WILCOCK, R. J. Methyl chloride as a gas-tracer for measuring stream reaeration coefficients-I Laboratory studies. **Water Research**, v. 18, n. 1, p. 47–52, 1984a.

WILCOCK, R. J. Methyl chloride as a gas-tracer for measuring stream reaeration coefficients - II Stream studies. **Water Research**, v. 18, n. I, p. 53–57, 1984b.

WILLIAMS, R. J. et al. Temporal and small-scale spatial variations of dissolved oxygen in the Rivers Thames, Pang and Kennet, UK. **Science of the Total Environment**, v. 251–252, p. 497–510, 2000.

APÊNDICE 1

Figura 16 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês ago/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 17 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de ago/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 2

Figura 18 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês out/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 19 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de out/16. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 3

Figura 20 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês jan/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 21 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de jan/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 4

Figura 22 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês mar/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 23 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de mar/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 5

Figura 24 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês mai/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 25 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de mai/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 6

Figura 26 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês jun/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 27 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de jun/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 7

Figura 28 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês jul/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 29 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de jul/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

APÊNDICE 8

Figura 30 - Gráficos representando o decaimento da área do cromatograma e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular do traçador gasoso (K_{SF6}) nos cinco trechos estudados no mês ago/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).

Figura 31 - Gráficos representando o decaimento do diâmetro da sonda solúvel flutuante e o ajuste linear utilizado na obtenção do coeficiente angular (V_s) nos cinco trechos estudado no mês de ago/17. (A) ESP1; (B) ESP2; (C) CAN; (D) SMA e (E) FZZ

Fonte: Autor (2018).