

## IV-006 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO SUPERFICIAL: ESTADO DA ARTE

**Thiago Augusto Formentini<sup>(1)</sup>**

Químico Industrial pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM – RS). Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (UFSM – RS).

**Maria do Carmo Cauduro Gastaldini**

Engenheira Civil, Doutora em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Professora Associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM – RS).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal de Santa Maria – Av. Roraima, nº 1000, sala 435, prédio 10 – Cidade Universitária – Bairro Camobi – Santa Maria - RS - CEP: 97105-900 - Brasil - Tel: +55 (55) 3220-9421 - Fax: +55 (55) 3220-8030 - e-mail: [formentini@gmail.com](mailto:formentini@gmail.com)

### RESUMO

O artigo apresenta uma revisão bibliográfica das principais metodologias de determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial  $K_2$  em escoamentos naturais, apresentando a base teórica de cada método, assim como uma discussão sobre a viabilidade, vantagens e desvantagens dos mesmos. As metodologias abordadas são as seguintes: método dos traçadores (radioativos e inertes), método da pressão sonora, método delta, método da sonda solúvel. Foi apresentada, também, uma discussão a respeito das equações de previsão do coeficiente de reaeração superficial. A técnica dos traçadores inertes, especialmente propano e rodamina WT, é considerada a mais bem estabelecida e confiável, e por ter seus mecanismos amplamente discutidos e verificados, serve como base para a avaliação do coeficiente de reoxigenação em escoamentos onde o mesmo não é conhecido. As outras propostas necessitam de comparação com os dados obtidos através de experimentos com traçadores, já que são relativamente novas e seus mecanismos não possuem correlação direta com o mecanismo da reoxigenação. O grande interesse acerca das novas propostas de determinação de  $K_2$  consiste na simplificação do procedimento experimental e na redução dos custos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coeficiente de reaeração, reaeração superficial,  $K_2$ , traçadores.

### INTRODUÇÃO

A reposição de OD nos escoamentos de água naturais ocorre, principalmente, através da absorção física do oxigênio contido na atmosfera em função da movimentação turbulenta na superfície livre do escoamento. Este fenômeno é conhecido como reaeração ou reoxigenação.

O parâmetro que quantifica a velocidade com que o oxigênio atmosférico se dissolve na água é denominado de coeficiente de reaeração ou coeficiente de reoxigenação ( $K_2$ ), ou seja, é a taxa para absorção física do oxigênio da atmosfera pelo escoamento.

O principal uso do coeficiente de reaeração é na quantificação do processo de reaeração atmosférica para utilização em modelos de qualidade da água baseados no oxigênio dissolvido. Se o valor de  $K_2$  utilizado em um modelo de qualidade for menor que o real, o grau de tratamento da água indicado pelo modelo será maior que o necessário, podendo implicar em custos maiores e inclusive impossibilitando determinado projeto. De maneira inversa, ao utilizar um valor de  $K_2$  maior que o real, a indicação do modelo para o tratamento será menor que a demandada pelo corpo d'água, o que pode ocasionar sérios problemas ambientais. De todas as formas, salienta-se a importância do conhecimento real das características de reaeração de um manancial para o auxílio em sua gestão e na tomada de decisão.

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO COM O USO DE TRAÇADORES

A técnica dos traçadores para a determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial –  $K_2$  – baseia-se no princípio da relação constante entre a taxa de absorção de oxigênio atmosférico pela água e a taxa de dessorção de um gás traçador injetado na mesma amostra de interesse, independentemente das condições de agitação e temperatura (Rathbun, 1978). Desta forma:

$$K_2 = K_T / R \quad \text{equação (1)}$$

onde  $K_2$  é o coeficiente de absorção de oxigênio (coeficiente de reaeração),  $K_T$  é o coeficiente de dessorção do traçador gasoso, e R a razão obtida entre os coeficientes.

Embora a relação entre a taxa de dessorção do traçador gasoso e a taxa de absorção do oxigênio atmosférico pela água deva permanecer constante numa faixa de temperatura de trabalho, tanto a solubilidade do oxigênio quanto o coeficiente de reaeração são funções da temperatura e, portanto, comparações só são válidas se ajustadas para uma temperatura de referência especificada (Hampson, 1987).

Elmore e West (1961, apud Hampson, 1987) desenvolveram a relação dos coeficientes de reaeração ajustados para uma temperatura padrão de 20° C, de acordo com a equação:

$$K_{2,20} = K_2(1,0241)^{20-T} \quad \text{equação (2)}$$

Onde  $K_{2,20}$  = Coeficiente de reaeração ajustado a 20°C;  $K_2$  = Coeficiente de reaeração medido à temperatura T; T = temperatura em que foi realizado o experimento.

O procedimento para obtenção do coeficiente  $K_2$  consiste na injeção simultânea de um traçador gasoso juntamente com um traçador conservativo de referência, que permite o ajuste da concentração do gás em qualquer ponto de coleta, descontando os efeitos de dispersão e diluição que podem ocorrer devido ao incremento de vazão ao longo do trecho em estudo.

Amostras são obtidas em várias seções de coleta a jusante do ponto de injeção dos traçadores e a concentração do traçador gasoso, assim como a diluição e a dispersão podem ser determinados (Rathbun, 1978).

## MÉTODO DO CRIPTÔNIO

A técnica do traçador radioativo consiste na injeção simultânea de um traçador gasoso radioativo –  $^{85}\text{Kr}$ , um traçador conservativo, para a correção dos efeitos de dispersão e diluição –  $^3\text{H}$ , e um traçador fluorescente para o acompanhamento da passagem da nuvem traçadora – Rodamina WT. Por tratar-se de uma injeção instantânea, no mesmo ponto no tempo e espaço, a primeira seção de amostragem pode ser numa distância imediatamente após a injeção. Considera-se a mistura instantânea dos traçadores (Rathbun, 1978).

De acordo com Roldão (1990), os dois conceitos que são a base para a determinação experimental do coeficiente de reaeração ( $K_2$ ) com o emprego de um traçador gasoso radioativo ( $^{85}\text{Kr}$ ) e um traçador de referência ( $^3\text{H}$ ) são expressos matematicamente de acordo com as seguintes equações:

$$K_{Kr} = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\left( \frac{C_{Kr}}{C_H} \right)_j}{\left( \frac{C_{Kr}}{C_H} \right)_m} \quad \text{equação (3)}$$

Onde  $K_{Kr}$  = coeficiente de dessorção do  $^{85}\text{Kr}$ ;  $\Delta t$  = tempo de viagem do traçador entre as estações de amostragem;  $C_{Kr}/C_H$  = razão entre a concentração de  $^{85}\text{Kr}$  e  $^3\text{H}$  na estação de amostragem; j, m = seções de jusante e montante do trecho.

$$\frac{K_{Kr}}{K_2} = 0,83 \pm 0,04 \quad \text{equação (4)}$$

De acordo com a equação 3, a taxa de dessorção de uma nuvem móvel de  $^{85}\text{Kr}$  injetada instantaneamente em um rio é descrita por uma reação com cinética de primeira ordem, na qual foi implementada uma correção, que leva em conta a dispersão. Essa correção é baseada assumindo-se que as características de dispersão de um gás nobre são as mesmas do traçador conservativo (ou de referência)  $^3\text{H}$ , que é injetado simultaneamente. A equação 4, obtida experimentalmente por Tsivoglou e O'Connell, permite a correlação entre os resultados obtidos no caso do criptônio para os desejados para o oxigênio ( $K_2$ ). Essa relação pode ser considerada constante para uma faixa de temperatura entre 10 e 30°C e não é afetada pela turbulência ou poluentes.

### MÉTODO DO PROPANO

Com o intuito de reduzir a utilização de material radioativo em corpos d'água naturais, principalmente nas situações onde o uso de radiotraçadores é restrito, Rathbun *et al* (1975) desenvolveram um método experimental de determinação de  $K_2$  com uso de traçadores inertes. Esta técnica, denominada inicialmente como "técnica de traçadores modificada", é uma derivação da técnica com traçadores radioativos. Consiste basicamente na injeção de um gás hidrocarboneto de leve peso molecular – propano – e a utilização de Rodamina WT como traçador de referência.

Devido à baixa solubilidade de gases hidrocarbonetos em água, a injeção do propano não pode ser feita instantaneamente como o  $^{85}\text{Kr}$ . Geralmente, esta injeção é feita durante algumas horas, borbulhando o gás através de um difusor. Para o método do propano, as equações 1 e 3 são também válidas e aplicáveis. Dependendo da duração da injeção e da distância dos postos de medição, a observação das curvas de passagem pode seguir uma distribuição gaussiana ou atingir um "plateau".

Como na técnica radioativa, considera-se a perda do traçador gasoso inerte apenas para a atmosfera. A razão entre a taxa de dessorção do propano e o  $K_2$ , determinados experimentalmente por Rathbun a 20, 25 e 30°C e diferentes condições de agitação, similares à equação 4 é:

$$\frac{K_{Pr}}{K_2} = 0,72 \quad \text{equação (5)}$$

Onde  $K_{Pr}$  = taxa de dessorção do propano

### MÉTODO DO PICO E MÉTODO DA ÁREA

Os dois métodos comuns tanto à metodologia de determinação do coeficiente de reaeração tanto pela técnica dos traçadores radioativos quanto pela técnica dos traçadores modificada são o "método do pico" e o "método da área". O "método do pico", originalmente proposto por Tsivoglou *et al* (1868) utiliza o gás de referência para a correção da concentração de pico do gás traçador por dispersão. O "método da área" utiliza a massa total de gás traçador que passa pelas seções de monitoramento para o cálculo do coeficiente de dessorção e, conseqüentemente, de reaeração. No último caso, o traçador de referência serve apenas como indicador da passagem da nuvem traçadora (Hampson, 1987).

O método da concentração de pico é como segue:

$$K_T = \frac{1}{t_j - t_m} \ln \left( \frac{\left( \frac{C_T}{C_D} \right)_j}{\left( \frac{C_T}{C_D} \right)_m} \right) \quad \text{equação (6)}$$

Sendo  $K_T$  = coeficiente de dessorção na base e para o gás traçador;  $t$  = tempo de viagem até o pico de concentração;

$C_T$  e  $C_D$  = concentrações de pico para o gás traçador e o traçador de dispersão- diluição, respectivamente;  $m$  e  $j$  = montante e jusante, respectivamente

Pelo fato de a Rodamina WT, utilizada como traçador de referência e corante no método dos traçadores modificado, não ser um traçador totalmente conservativo, faz-se necessária a medição da quantidade total deste traçador que passa pelas seções de coleta. Calcula-se a perda do traçador de referência para que a quantidade observada na seção de estudo seja corrigida e utilizada na equação anterior (Grant, 1980).

Hren (1984) apresenta o fator de correção para o caso da utilização do método da concentração de pico:

$$J = \frac{Q_m A_m}{Q_j A_j} \quad \text{equação (7)}$$

Onde:  $Q$  = vazão e  $A$  = área sob a curva “concentração X tempo” do traçador. Este termo de correção  $J$  deve ser multiplicado pelo termo  $C_D$  (concentração do traçador de referência) na seção de jusante.

No método da área (ou massa total) o uso de informações do traçador de referência não se faz necessário, já que mede-se toda a área da curva de passagem do traçador gasoso. Neste caso, a Rodamina WT é utilizada apenas para acompanhar a passagem da massa traçadora e auxiliar no momento da coleta (Grant, 1980). Utiliza-se a seguinte equação para determinar o  $K_T$  pelo método da área:

$$K_T = \frac{1}{t_j - t_m} \log_e \frac{A_m Q_m}{A_j Q_j} \quad \text{equação (8)}$$

Onde  $A_m$  e  $A_j$  = áreas sob as curvas de “concentração X tempo” nas seções de montante e jusante, respectivamente;  $Q_m$  e  $Q_j$  = vazões nas seções de montante e jusante, respectivamente

Gleizer (1992), no entanto, salienta a dificuldade na realização do cálculo pelo método da área, principalmente para rios de maior porte (maior vazão), devido à dificuldade experimental na determinação de concentrações muito baixas de propano em água (regiões próximas do início e do final da curva de passagem). Este fato torna o método do pico mais fácil e confiável uma vez que são necessárias determinações de concentração de propano apenas nas regiões máximas das curvas de passagem (ou na região do “Plateau”).

### ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO ATRAVÉS DA PRESSÃO SONORA

Morse *et al* (2007) propôs um método comparativo, pouco oneroso e de rápida resposta para estimar o coeficiente  $K_2$ , baseado na hipótese de que existe uma relação confiável entre a pressão sonora média (ruído) de um trecho de água em escoamento com o coeficiente de reaeração, uma vez que ambos são fortemente dependentes da turbulência. Também foi considerada a hipótese de um aumento na pressão sonora com o aumento da cota, novamente atribuída ao aumento da turbulência gerado pela elevação na cota e consequentemente na vazão.

Os valores de pressão sonora foram expressos transformando as leituras do aparelho medidor de nível de pressão sonora, usualmente expressas em Decibéis, para Pascal, utilizando-se a seguinte relação:

$$P = P_0 \left[ 10^{(SL / 20)} \right] \quad \text{equação (9)}$$

Onde  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa;  $SL$  = nível sonoro (dBA)

Para cada avaliação, os autores mediram o comprimento, o nível sonoro e o ruído de background em cada trecho de característica geomórfica distinta dentro de um trecho mais amplo em estudo. Esses dados foram utilizados para computar a pressão sonora de cada trecho característico e ponderá-los de acordo com o a fração do comprimento total do trecho que a característica geomórfica representa. A classificação geomórfica dos escoamentos foi feita em: *pools*, *runs*, *chutes*, *riffles* e *cascades*, sendo que o primeiro termo “*pools*” refere-se a um trecho com ausência de turbulência, aumentando a mesma gradativamente até “*cascades*”,

termo que representa um escoamento com mais que 30% da superfície coberta por “água branca”, decorrente da forte turbulência e conseqüente oxigenação.

Os autores encontraram uma relação linear significativa entre os dados obtidos de pressão sonora ponderada e o coeficiente de reaeração medido através da bem estabelecida técnica de dessorção do traçador gasoso propano. O valor de  $r^2$  ficou em 0,94, considerado satisfatório, já que o coeficiente de reaeração variou entre zero e  $300 \text{ d}^{-1}$ , para análises feitas em 3 anos distintos.

A concordância entre as medidas de pressão sonora e cota variou significativamente para diferentes trechos do mesmo rio, sugerindo a dependência de outros fatores geomórficos e características físicas. De um modo geral, o aumento na cota gerou aumento nos níveis de pressão sonora, devido ao aumento na turbulência.

Por tratar-se de uma proposta nova, ainda há bastante a ser desenvolvido e testado. Os primeiros resultados foram satisfatórios à medida que comprovaram a relação existente entre o coeficiente de reaeração e os níveis de pressão sonora. Até que seja estabelecida uma relação teórica confiável entre os processos específicos de turbulência e pressão sonora, experimentos com gases traçadores serão necessários para fins de calibração. Assim, os autores sugerem que a técnica seja encarada como um complemento à técnica dos traçadores gasosos e não, por hora, uma substituição.

Se a relação entre os valores de pressão sonora ponderada e coeficiente de reaeração for conhecida para diferentes vazões, há a possibilidade da criação de curvas de taxa de reaeração, possibilitando a medição da reaeração em intervalos de tempos comparáveis à leitura de OD e temperatura, por exemplo.

### MÉTODO DELTA NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO

Trata-se de um método originalmente proposto por Chapra e Di Toro (1991), a partir de uma proposta de Di Toro (1981), que utilizou um procedimento orientado graficamente para estimar a taxa fotossintética baseado na variação diária de oxigênio dissolvido num corpo d'água.

O método Delta baseia-se na estimativa da taxa de reaeração, produção primária e taxa de respiração basicamente através de medições diurnas do oxigênio dissolvido, utilizando três características desta curva para obtenção dos resultados: o tempo de déficit mínimo de oxigênio (relativo ao meio-dia solar) é usado para estimar a taxa de reaeração. Uma vez obtido o coeficiente de reaeração, a variação de déficit  $\Delta$  é utilizada para prever a produção fotossintética. Finalmente, o déficit médio pode ser utilizado em conjunto com as taxas de reaeração e produção para computar a respiração. A função de Chapra e Di Toro possui forma transcendental implícita, não permitindo uma expressão analítica simples. Por isso, foram avaliadas numericamente e os resultados apresentados na forma de gráficos.

Para simplificar a abordagem, McBride e Chapra (2005) fizeram uma proposta a qual chamaram de “método delta aproximado”, evitando a necessidade de solução numérica dos gráficos propostos originalmente por Chapra e Di Toro. Trata-se de uma aproximação através da relação entre parâmetros do modelo original e manipulação de equações para construção de curvas semelhantes. A solução encontrada é:

$$k_a = 7,5 \left( \frac{5,3\eta - \phi}{\eta\phi} \right)^{0,85}$$

onde

$$\eta = \left( \frac{f}{14} \right)^{0,75}$$

$\eta$  = fator de correção do fotoperíodo (adimensional)

$f$  = duração do fotoperíodo (h)

$\Phi = t^* - f/2$  = tempo entre o mínimo déficit de oxigênio e o meio-dia solar (h)

Mc Bride e Chapra obtiveram valores muito semelhantes aos encontrados por Chapra e Di Toro no método delta tradicional, porém com a limitação de seu modelo ser adequado apenas para escoamentos com coeficiente de reaeração baixo a moderado ( $K < 10d^{-1}$ ) e fotoperíodos moderados (10 – 14h). Segundo os autores, esta limitação é puramente matemática, uma vez que não foi encontrada uma equação de forma simples que se adaptasse a curva original.

O método delta aproximado possui a notoriedade de ser um método de simples aplicação, especialmente por necessitar de apenas uma seção para realização das medições. Incertezas na estimativa da reaeração podem ser compensadas por outros ajustes dentro do próprio método, que ainda leva em consideração a determinação da produção primária de oxigênio e a respiração, de modo a manter fixos os valores de déficit de oxigênio.

Não há nenhum tipo de alusão à comparação com outros métodos experimentais de determinação de  $K_2$ , desencorajando que seja utilizado puramente para este fim, sem levar em consideração a inter-relação entre os parâmetros produção primária e respiração. Apesar da facilidade de obtenção e tratamento dos dados, não apresenta característica de medição em tempo real, já que o perfil diário de OD deve ser analisado.

### **MÉTODO DA SONDA SOLÚVEL**

Originalmente descrito por Giorgetti e Giansanti (1983, apud Bicudo, 1991), o método da sonda solúvel baseia-se no mesmo princípio que o método indireto de determinação do coeficiente de reaeração superficial pela pressão sonora, ou seja, a correlação entre dois parâmetros que são funções diretas da movimentação turbulenta sofrida pela água em escoamento. Neste caso, o fator que se relaciona com a reaeração é a taxa de dissolução de uma pastilha fina de ácido benzóico.

Bicudo e James (1991) trataram de identificar os principais fatores que controlam os processos de reaeração superficial e dissolução. Para um sistema sólido-líquido, particularmente a dissolução e distribuição de um sólido em um líquido sob agitação, considera-se os seguintes fatores como principais:

- A agitação do líquido em contato com a superfície sólida;
- A temperatura, que afeta a cinética da reação;
- O coeficiente de difusão do sólido para um determinado líquido;
- A concentração do sólido dissolvido já em solução;
- A natureza química do sólido e do líquido.

Para os estudos experimentais, Bicudo e James (1991) utilizaram um canal circular, proporcionando uma ampla variedade de condições de agitação, pela modificação da profundidade e da potência de circulação da bomba. Além disso, padrões de rugosidade foram adicionados às paredes do canal. As pastilhas de ácido benzóico foram preparadas por compressão em um molde metálico de 6,5cm de diâmetro e 0,5cm de espessura e depois fixadas em uma bóia de polipropileno sobre a água. O coeficiente de reaeração superficial foi avaliado pelo método dos traçadores modificado.

Embora os autores não considerassem a correlação entre a reaeração atmosférica e a dissolução de um sólido em água o principal objetivo do trabalho, e sim a descrição dos processos que controlam a dissolução, uma forte correlação entre estes parâmetros foi encontrada ( $r = 0,957$ ).

No entanto, ao contrário da simples relação que é obtida entre a taxa de fuga do gás propano e a taxa de penetração do gás oxigênio através da superfície líquida, para o método dos traçadores modificado, a relação entre o coeficiente de transferência de oxigênio e a velocidade de dissolução de um sólido em água não é constante nem independente das condições de turbulência e misturamento. Essa relação é fortemente controlada pela velocidade do escoamento e a turbulência dentro do sistema.

Apesar das limitações citadas, os autores destacam o baixo custo do procedimento e a possibilidade da realização de testes em escoamentos em regimes não unidirecionais.

Costa (2000) verificou a linearidade dos dados de variação de massa das sondas de ácido oxálico em função do tempo, para experimentos de laboratório e de campo. Porém, os dados de campo estão transladados em relação aos laboratoriais, sugerindo a existência de um coeficiente multiplicativo entre os conjuntos de dados.

A autora concluiu que “os dois processos de transferência de massa (reaeração e dissolução do sólido) sofrem influências diferentes a partir do aumento da escala física e conseqüente mudança na estrutura da turbulência e na macro-estrutura do escoamento (turbilhões e estrutura correlatas)”.

### **EQUAÇÕES DE PREVISÃO DO COEFICIENTE DE REAERAÇÃO $K_2$**

Existem na literatura técnica inúmeras equações de previsão do coeficiente de reaeração  $K_2$ , baseadas em dados hidrodinâmicos, principalmente velocidade e profundidade do escoamento. O problema consiste na grande discrepância entre os valores obtidos entre as diversas equações propostas. Isto se deve principalmente ao fato de que estas equações foram propostas para faixas bastante reduzidas de valores para os parâmetros hidrodinâmicos.

Um dos objetivos da determinação experimental de  $K_2$  é a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores advindos das diversas equações de previsão disponíveis. Uma vez identificadas as equações que melhor se adaptam ao trecho em estudo, tem-se maior confiabilidade na adoção de valores para diferentes condições de escoamento no rio.

### **CONCLUSÕES**

O método dos traçadores mostra-se o mais confiável na determinação experimental do coeficiente de reaeração superficial. Trata-se de uma medida direta, na qual o fenômeno envolvido na realização dos experimentos é o mesmo que rege o próprio mecanismo de reoxigenação superficial, ou seja, a transferência gasosa através de uma superfície líquida.

As metodologias de determinação de  $K_2$  por pressão sonora e sonda solúvel, apesar de simples, pouco onerosas, e de caráter praticamente instantâneo, necessitam de um parâmetro de comparação e calibração. Esse parâmetro, invariavelmente, passa por uma avaliação prévia através do próprio método dos traçadores. Entretanto, são metodologias ainda em desenvolvimento que podem tornar-se bastante úteis para estudos de modelação qualitativa.

As equações de previsão de  $K_2$ , assim como o método delta, consistem em modelos que, como tal, igualmente dependem de uma verificação experimental de sua proposição. Possuem características que não as conferem universalidade. Apesar da elevada discrepância entre os valores obtidos pelas equações propostas na literatura técnica, esta pode ser uma valiosa ferramenta para a estimativa de  $K_2$  quando não se necessita uma exatidão elevada e as avaliações de campo são impraticáveis.

O principal estímulo e importância do estudo e pesquisa de novas metodologias para a avaliação da reoxigenação em rios estão justamente no ponto fraco da metodologia dos traçadores: o aparato experimental sofisticado e a necessidade de uma numerosa equipe de trabalho, implicando em um custo elevado.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. RATHBUN, R.E., and GRANT, R.S. Comparison of the radioactive and modified technique for measurement of stream reaeration coefficients: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 78-68, 57 p. 1978.
2. HAMPSON, P. S; COFFIN, J. E. Measurements of Reaeration Coefficients for Selected Florida Streams. U. S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report 87-4020. 1987.
3. TSIVOGLIOU, E.C., COHEN, J.B., SHEARER, S.D., and GODSIL, P.J. Field studies, Part II of Tracer measurement of stream reaeration: Journal Water Pollution Control Federation, v. 40, no. 2, p. 285-305. 1968.

4. Grant, R. S., and Skavroneck, S. Comparison of tracer methods and predictive equations for determination of stream reaeration on three small streams in Wisconsin. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 80-19, 41 p. 1980.
5. GLEIZER, S. Determinação Experimental do Coeficiente de Reaeração em Rios, com o Uso de Traçador Inerte Gasoso. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Maio de 1992.
6. MORSE, N; BOWDEN, W. B.; HACKMAN, A.; PRUDEN, C.; STEINER, E.; BERGER, E. Using sound pressure to estimate reaeration in streams. Journal of The North American Benthological Society, 2007, 26(1):28–37.
7. HREN, J. Determination of Reaeration Coefficients for Ohio Streams. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4139. 1984.
8. MCBRIDE, G. B.; CHAPRA, S. C. Rapid Calculation of Oxygen in Streams: Approximate Delta Method. Journal of Environmental Engineering (ASCE), março 2005.
9. CHAPRA, S. C.; DI TORO, D. M. Delta Method for Estimating Primary Production, Respiration and Reaeration in Streams. Journal of Environmental Engineering. 117(5), 640–655. 1991.
10. BICUDO, J. R.; JAMES, A.: Measurement of reaeration in streams: comparison of techniques. Journal of Environmental Engineering, Vol. 115, No. 5, September/October 1989, pp. 992-1010.
11. COSTA, O. S. Determinação Indireta do Coeficiente de Reaeração Através de Dissolução Unidimensional de Sondas de Ácido Oxálico. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.