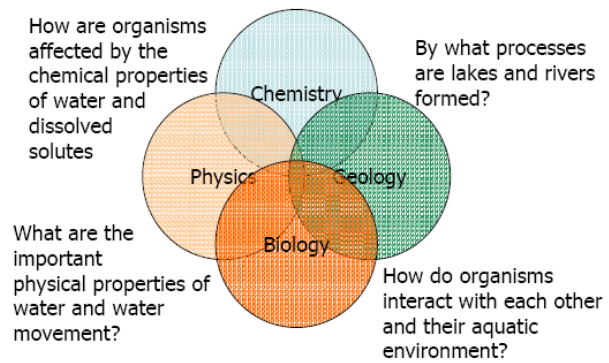


## Capítulo 02

### Balanço de fósforo, nitrogênio, oxigênio em lagos e rios

#### What is Limnology?



## Capítulo 02- Balanço de fósforo, nitrogênio, oxigênio em lagos e rios

### 2.1 Introdução

Em lagos rasos e misturados podemos fazer uma análise simplificada de Oxigênio Dissolvido (OD), fósforo, nitrogênio e poluentes.

Para o caso do fósforo vamos seguir o modelo de Metcalf& Eddy, 1993.

Trataremos de lagos rasos onde há uma mistura facilmente atingida pelo vento, pela vazão de entrada, vazão de saída e pela transferência de calor na interface ar-água.

Em regiões tropicais os lagos são monomíticos ou politimíticos, isto é, a mistura ocorre somente uma vez ou quando a mistura ocorre varias vezes. Tudo vai depender do tempo de residência que é o volume do lago dividido pela vazão de saída.

### 2.2 Fósforo

O fósforo é um dos nutrientes essenciais a vida de todos os organismos. É fundamental no processo da vida como armazenamento e transferência de informações genéticas, metabolismo celular e fornecimento de energia ao sistema de células. Nos lagos o fósforo é usualmente encontrado em pequenas quantidades, mas devido ao impacto das atividades do homem, aumenta a quantidade de fósforo.

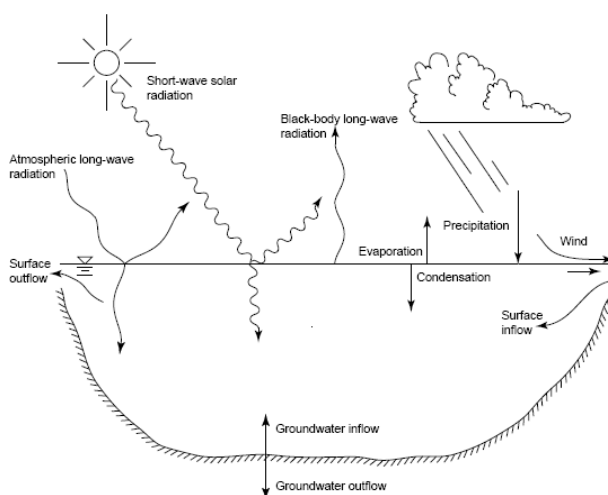


Figura 2.1- Mistura em lagos

O fósforo pode entrar no lago através de sedimentos, fertilizantes de gramados ou jardins, despejos de fossas sépticas ou ainda por rios que carregam fósforo e o depositam nos lagos conforme [http://pearl.maine.edu/windows/community/Water\\_Ed/Phosphorus/phos\\_whatisit.htm](http://pearl.maine.edu/windows/community/Water_Ed/Phosphorus/phos_whatisit.htm)

O fósforo encontrado em lagos pode nos informar como está o crescimento das plantas no mesmo e como estão as atividades humanas ao redor do mesmo. Aumentando o fósforo aumentam as algas.

No aumento das algas surgem florescências (*blooms*) que formam escumas no topo da água que muitas vezes produzem odor e que afastam as pessoas do lago. Outro problema é que o crescimento muito grande das algas pode quebrar o balanço no equilíbrio natural do sistema do lago. Por exemplo, uma consequência da produção das algas é que quando elas morrem, elas caem no fundo do lago como matéria orgânica morta. No processo de decomposição da matéria orgânica por bactérias no fundo do lago é feito com oxigênio dissolvido na água. Muitos lagos com algas pode-se

tornar anóxico no verão, significando que não mais se adequarão as condições de reprodução ou sobrevivência.

Por outro lado em lugares onde os sedimentos recebem luz solar, as algas são encontradas vivendo nos sedimentos. As algas produzem oxigênio, que reduz o escoamento de fósforo do sedimento para a água. As algas podem consumir ainda quantidade grande de fósforo.

A química do lago pode afetar as condições de fósforo no lago. Por exemplo, o pH afeta o transporte de fósforo entre o sedimento e a água. Quando o pH sobe promove a retirada de fósforo dos sedimentos. A produção primária das águas aumenta o pH na água, aumentando a quantidade de fósforo tirada dos sedimentos. O aumento do fósforo aumenta a quantidade de algas tornando a situação cada vez pior.

Uma fonte de poluição como efluente de tratamento de esgotos ou uma fábrica podem aumentar a quantidade de fósforo no lago.

O fósforo varia de 1ppb a 110ppb (parte por bilhão) com média de 14ppb (14µg/L ou 0,014mg/L).

As pesquisas existentes apontam o fósforo e o nitrogênio que são essenciais para o crescimento das algas e cianobactérias e que o limite de quantidade destes elementos é usualmente um fator de controle da taxa de crescimento. As experiências têm demonstrado que não acontecem florescência de algas quando o nível de fósforo é menor que 0,005mg/L conforme Saywer et al, 1994.

Nos esgotos o fósforo inorgânico varia de 2 a 3mg/L enquanto que o fósforo na forma orgânica varia de 0,5 a 1,0mg/L. A quantidade de fósforo lançada é função das proteínas que o ser humano ingere. Nos Estados Unidos é lançado nos esgotos diariamente 1,5g/dia de fósforo por pessoa.

Os polifosfatos que foram feitos para substituir os sabões aumentam também a quantidade de fósforo na água dos rios. Os lodos dos esgotos representam 1% de fósforo e o lodo dos estações de lodos ativados são 1,5% do fósforo. O lodo geralmente é vendido por causa do nitrogênio e não pelo fósforo.

Os polifosfatos são geralmente usados para controle da corrosão.

O limite para o fósforo total nas águas é de 0,025mg/L conforme Conama nº 357/05.

### 2.3 Índice do Estado Trófico (IET)

Através do fósforo, clorofila-a e do IET (Índice do Estado Trófico) de um rio ou lago o mesmo pode ser classificado pela CETESB conforme Tabela (2.1).

**Tabela 2.1-Limites para diferentes níveis de estado trófico segundo o sistema de classificação de Carlson modificado por Toledo, 1990.**

<b>Critério</b>	<b>Estado trófico</b>	<b>Transparência (m)</b>	<b>Fósforo total (mg/L)</b>	<b>Clorofila-a (µg/L)</b>
$IET \leq 24$	Ultraoligotrófico	$\geq 7,8$	$\leq 0,006$	$\leq 0,51$
$24 < IET \leq 44$	Oligotrófico	7,7 a 2,0	0,007 a 0,026	0,52 a 3,81
$44 < IET \leq 54$	Mesotrófico	1,9 a 1,0	0,027 a 0,052	3,82 a 10,34
$54 < IET \leq 74$	Eutrófico	0,9 a 0,3	0,053 a 0,211	10,35 a 76,06
$IET > 74$	Hipereutrófico	$< 0,3$	$> 0,211$	$> 76,06$

Fonte: Lamparelli, 2004

## 2.4 Índice do estado trófico CETESB

Segundo a Cetesb o índice do estado trófico (IET) é a média do índice do estado trófico da produção de fósforo com a clorofila-a.

O índice original foi introduzido por **Carlson e modificado por Toledo**.

$$IET = [IET(P) + IET(\text{Clor-a})] / 2$$

**Sendo:**

$$IET(P) = 10 \{ 6 - [ \ln(80,32 / P) / \ln 2 ] \}$$

$$IET(\text{Clor-a}) = 10 \{ 6 - [ (2,04 - 0,695 \times \ln(\text{Clor-a})) / \ln 2 ] \}$$

P= concentração de fósforo total medida na superfície da água ( $\mu\text{g/L}$ )

Clor-a- concentração de clorofila-a medida na superfície da água ( $\mu\text{g/L}$ )

Ln= logaritmo natural

### Exemplo 2.1

Dados: P=  $13\mu\text{g/L}$  e Chl-a=  $5,03\mu\text{g/L}$ . Calcular o índice do estado trófico.

$$IET(P) = 10 \{ 6 - [ \ln(80,32 / 13) / \ln 2 ] \} = 33,7$$

$$IET(\text{Clor-a}) = 10 \{ 6 - [ (2,04 - 0,695 \times \ln(5,03)) / \ln 2 ] \} = 55,8$$

$$IET = [IET(P) + IET(\text{Clor-a})] / 2 = (33,7 + 55,8) / 2 = 44,75$$

Lamparelli, 2004 propôs uma classificação para o Estado de São Paulo conforme Tabela (2.2).

A Tabela (2.1) foi feita para lagos sendo usada no Estado de São Paulo também para rios, que causa algumas vezes certas inconsistência de resultados conforme apontado por Lam parelli, 2004 e é por isto que a dra. Marta Lamparelli apresentou uma proposta mais condizente com a realidade que está na Tabela (2.2).

**Tabela 2.2- Proposta para classes tróficas da dra. Marta Lamparelli, 2004 para o Estado de São Paulo**

Ambiente	Classes Tróficas	Clorofila	Fósforo	Ortofostato	Nitrogênio	Transparência	Turbidez
		a	Total		Total	(m)	(UNT)
		$(\mu\text{g.L}^{-1})$	$(\mu\text{g.L}^{-1})$	$(\mu\text{g.L}^{-1})$	$(\mu\text{g.L}^{-1})$		
Rios	Oligo-Mesotrófico	1,1	40	15	700	0,6	6,5
	Meso-Eutrófico	2,1	130	70	1800	0,2	28
	Eutrófico-Hipereutrófico	4,6	230	115	2660	0,1	53
Reservatórios	Oligo-Mesotrófico	3	24	5	850	1,1	
	Meso-Eutrófico	12,5	50	10	1900	0,6	
	Eutrófico-Hipereutrófico	27	90	23	2800	0,5	

### Exemplo 2.2

Calcular o índice do estado trófico para o lago do Nado localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Dados de Bezerra-Neto e Coelho, 2002

Lagoa do Nado, Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais

1500mm por ano de precipitação

Comprimento máximo efetivo ( $C_e$ )= 290m

Vazão média=  $0,006\text{m}^3/\text{s}$

Área da bacia:  $804.535\text{m}^2$

Área da lagoa= 40.562m<sup>2</sup>  
Perímetro=1193m  
Largura máxima efetiva=51,8m  
Profundidade máxima (Zn)= 7,6m  
Z= 2,7m profundidade média (Z)  
Z/ Zn= 0,35  
Fator de envolvimento (Fe)= 53  
Declividade média (alfa)= 2,7%  
Índice de desenvolvimento de perímetro (Dp)= 2,75  
Índice de desenvolvimento de volume (Dv)= 1,07  
Volume= 40.562m<sup>3</sup>  
Clorofila-a= 11 µg/L  
L=NT=1276 µg/L= 1,276mg/L  
PT=50 µg/L  
NT/PT= 1276/50=25,5  
Secchi = 1,00m  
T=tempo de retenção no período chuvoso= 2,1 dias  
T= tempo de retenção no período seco= 78 dias  
Sendo:

$$\begin{aligned} \text{IET (P)} &= 10 \{ 6 - [ \ln (80,32 / P) / \ln 2 ] \} \\ \text{IET (P)} &= 10 \{ 6 - [ \ln (80,32 / 50) / \ln 2 ] \} = 58 \\ \text{IET (cl-aP)} &= 10 \{ 6 - [ (2,04-0,695 \times \ln (Cl-a) / \ln 2 ) ] \} \\ \text{IET (cl-a)} &= 10 \{ 6 - [ (2,04-0,695 \times \ln (11) / \ln 2 ) ] \} = 53 \\ \text{IET} &= [ \text{IET (P)} + \text{IET (Clor-a)} ] / 2 \\ \text{IET} &= (58 + 53) / 2 = 55 \end{aligned}$$

O índice do estado trófico do lago do Nado é IET=55  
Verificando-se a Tabela (2.1) verificamos que o lago é Eutrófico.

## 2.5 Reaeração de lagos

Em lagos geralmente as fórmulas possuem relação com o vento.

Geralmente:

$$K_2 = K_L / H$$

Sendo:

$K_L$  = coeficiente de aeração do lago (m/dia)

H = profundidade média do lago (m)

$K_2$  = coeficiente de reaeração do lago (dia<sup>-1</sup>)

v = velocidade do vento no lago (m/s)

## 2.6 Sazonalidade:

Lamparelli, 2004 concluiu que para o Estado de São Paulo a sazonalidade pode ser feita em duas partes:

- Estação de chuvas (outubro a março)
- Estação de secas (abril a setembro)

## 2.7 Relações

Lamparelli, 2004 pesquisando rios e lagos no Estado de São Paulo propôs algumas relações que podem ser úteis em estimativas.

## 2.8 Relação entre clorofila-a e fósforo total

$$\text{Clorofila-a} = 0,081 \times (\text{PT})^{1,24}$$

Sendo:

Clorofila-a em  $\mu\text{g/L}$

Fósforo total (PT) em  $\mu\text{g/L}$

### Exemplo 2.3

Dado um lago com fósforo total  $\text{PT} = 50 \mu\text{g/L}$ . Calcular a clorofila-a do lago.

$$\text{Clorofila-a} = 0,081 \times (\text{PT})^{1,24}$$

$$\text{Clorofila-a} = 0,081 \times 50^{1,24} = 10,4 \mu\text{g/L}$$

### 2.9 Relação entre clorofila-a e nitrogênio para rios

$$\text{Clorofila-a} = 1,34 \times (\text{NT})^{0,55}$$

Sendo:

NT= nitrogênio total (mg/L)

Clorofila-a em  $\mu\text{g/L}$

### Relação entre clorofila-a e nitrogênio para reservatórios

Observemos que em reservatórios a quantidade de clorofila-a é bem maior do que em rios.

$$\text{Clorofila-a} = 8,60 \times (\text{NT})^{1,47}$$

NT= nitrogênio total (mg/L)

Clorofila-a em  $\mu\text{g/L}$

### Exemplo 2.4

Em um lago o nitrogênio total  $\text{NT} = 1,276 \text{ mg/L}$ . Calcular a clorofila-a.

$$\text{Clorofila-a} = 8,60 \times \text{NT}^{1,47}$$

$$\text{Clorofila-a} = 8,60 \times 1,276^{1,47} = 11,4 \mu\text{g/L}$$

### 2.10 Clorofila-a x transparência S para rios

$$\text{S} = \text{transparência} = 0,613 \times \text{clorofila}^{-1,28}$$

### Clorofila-a x transparência S para reservatórios

$$\text{S} = \text{transparência} = 2,5 \times \text{clorofila}^{-0,33}$$

### Exemplo 2.5

Calcular a transparência S de um lago, sendo a clorofila  $11 \mu\text{g/L}$

$$\text{S} = \text{transparência} = 2,5 \times \text{clorofila}^{-0,33}$$

$$\text{S} = \text{transparência} = 2,5 \times 11^{-0,33} = 1,13\text{m}$$

### 2.10 Equação de Salas e Martino, 2001 in Lamparelli, 2004

$$(\text{PT}) = \text{Pin} \times \text{Tw}^{(3/4)} / (3 \times \text{Z})$$

Sendo:

(PT)= concentração média de fósforo ( $\text{mgP} / \text{m}^3$ )

Pin= carga de fósforo afluyente ( $\text{g}/\text{m}^2 / \text{ano}$ )

Tw= tempo de residência (anos)

Z= profundidade média (m)

Segundo Lamparelli, 2004 esta fórmula foi aplicada no lago Paranoá em Brasília achando-se a concentração média de fósforo (PT) de  $40 \text{ mgP} / \text{m}^3$ .

No Brasil conforme Lamparelli, 2004 a Conama 357/05 estabelece o limite máximo de fósforo de  $0,025 \text{ mg/L}$  das águas doces Classes 1 e 2. Conforme o ambiente lótico ou lântico teremos valores diferentes de fósforo.

## 2.8 Pesquisas de Lamparelli, 2004

A tese de doutoramento da dra. Marta Lamparelli fornece elementos importantes que estão na Tabela (2.3).

**Tabela 2.3- Dados das pesquisas de Lamparelli, 2004 para o Estado de São Paulo**

		mg/L	mg/L	mg/L
		Média	Mínimo	Máximo
Fósforo total	rios	0,030	0,070	0,210
	Reservatórios	0,020	0,040	0,090
Ortofósforo solúvel	rios	0,122	0,005	2,55
	Reservatórios	0,024	0,004	0,63
Nitrogênio Total	rios	2,55	0,062	36,48
	Reservatórios	2,18	0,071	57,15
Nitrogênio amoniacal	Rios	1,34	0,01	25,00
	Reservatórios	0,63	0,01	32,00
Nitrato	Rios	0,47	0,01	6,22
	Reservatórios	0,59	0,01	6,10
Nitrogênio orgânico (nitrogênio amoniacal+nitrato+nitrito)	Rios	0,75	0,00	22,00
	Reservatórios	0,88	0,00	56,70
Resíduo total	Rios	140	4,00	801,00
	Reservatórios	116	1,00	417,00
Resíduo fixo	Rios	82	2,00	333,00
	Reservatórios	66	0,00	282,00
Clorofila-a	Rios	3,62	0,05	169,07
	Reservatórios	18,24	0,05	566,57
Temperatura da água	Chuvas (outubro a março)	25,7°C	18,0°C	35°C
	Secas (abril a setembro)	21,4°C	13,0 °C	32°C

A Tabela (2.4) contém as concentrações basais encontrada nos Estados Unidos.

**Tabela 2.4- Concentração basal de nutrientes em riachos nos Estados Unidos conforme USGS**

Nutriente	Concentração basal em riachos (mg/L)
Nitrogênio Total	1,0
Nitrato	0,6
Amônia	0,1
Fósforo total	0,1

Fonte: Lamparelli, 2004

## 2.9 Razão N/P

O conceito de nutrientes limitantes é baseado na Lei do Mínimo proposta por Liebig, a qual estabelece que a produção de um organismo é determinado pela abundância da substância que estiver presente no ambiente na menor quantidade relativa a sua necessidade conforme Wetzel, 1993 in Lamparelli, 2004.

As relações NT/PT segundo Thomann e Muller, 1987 valem **para rios, lagos e estuários para poluição pontual e difusa.**

- Quando NT/PT  $\ll$  10 o fator limitante é o **nitrogênio** e
- Quando NT/PT  $\gg$  10 o fator limitante é o **fósforo**.

Sendo:

NT= nitrogênio total

PT= fósforo total

Os professores da EPUSP do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária PHD2460 dr. Rodolfo Martins e Dra. Mônica Porto alertam em suas aulas o seguinte:

- Quando ocorre a limitação por fósforo o processo de eutrofização estabiliza.
- Quando ocorre a limitação por nitrogênio, o crescimento das algas prossegue com aquelas que conseguem usar  $N_2$ .
- Para N/P  $< 4$  estimula-se o crescimento das águas azuis ou cianofíceas que são tóxicas.
- Alguns limnologistas consideram que apenas o fósforo é limitante; o nitrogênio apenas comanda o tipo de alga que se desenvolve.
- A relação N/P é importante para determinar as medidas de controle.

## 2.10 Teoria sobre carga de fósforo em um lago

Conforme Metcalf e Eddy, 1993 a carga  $M'$  em um lago é dada pela equação:

$$M' = Q_p \times C_p + Q_s \times C_s + Q_r \times C_r + Q_g \times C_g + Q_w \times C_w$$

Sendo:

$M'$  = carga no lago (mg/s)

$Q_p$  = vazão devida a precipitação direta na área

$Q_s$  = vazão de rio que chega ao lago ( $m^3/s$ )

$Q_e$  = vazão devida a evaporação da água na superfície do lago ( $m^3/s$ )

$Q_r$  = vazão devida ao escoamento superficial (*runoff*) que cai no lago ( $m^3/s$ )

$Q_g$  = vazão devida a contribuição das águas subterrâneas ( $m^3/s$ )

$Q_w$  = água que é retirada ( $m^3/s$ )

$Q_{ws}$  = água que é resposta ao lago ( $m^3/s$ ).  $Q_{ws} = aQ_w$  sendo  $a$  a fração da água que retorna ao lago

$Q_o$  = vazão de saída do lago ( $m^3/s$ )

$C_p$  = concentração de fósforo na precipitação água de chuva (mg/L)

$C_r$  = concentração de fósforo devido ao *runoff* (mg/L)

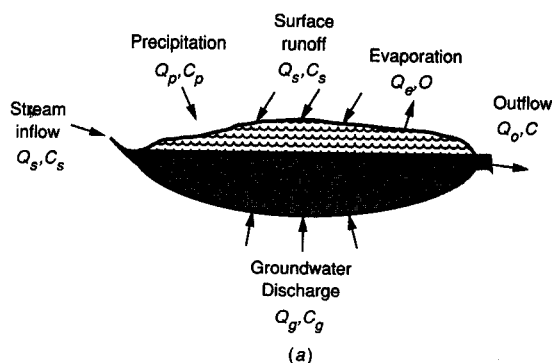
$C_s$  = concentração de fósforo que vem do rio que cai no lago (mg/L)

$C_r$  = concentração de fósforo contido no escoamento superficial (*runoff*) (mg/L)

$C_g$  = concentração de fósforo da água subterrânea (mg/L)

$C_w$  = concentração de fósforo de efluente de estação de tratamento de esgotos lançado no lago (mg/L)





**Figura 2.2- Modelo de lagos e reservatórios totalmente misturado**  
**Fonte: Metcalf&Eddy, 1993**

$$t_o = V/Q_o$$

Sendo:

$t_o$  = tempo de permanência (s) ou tempo de detenção ou tempo de residência

$V$  = volume de água do lago ( $m^3$ )

$Q_o$  = vazão de saída do lago ( $m^3/s$ )

$$\beta = K + Q_o/V = K + 1/t_o$$

Sendo:

$\beta$  = constante do lago para o fósforo

$K$  = constante de fósforo =  $0,003/\text{dia} = 0,003/86400s = 0,000000034/s$

$V$  = volume do reservatório ( $m^3$ ). Geralmente é a área multiplicado pela profundidade média.

$Q_o$  = vazão de saída do lago ( $m^3/s$ )

$$M' = C_c \times \beta \times V$$

Sendo:

$M'$  = carga presente no lago (mg/s)

$C_c$  = concentração de fósforo no lago (mg/L)

$\beta$  = constante do lago para o fósforo

$V$  = volume do reservatório ( $m^3$ ). Geralmente é a área multiplicado pela profundidade média.

### Exemplo 2.6

Elaborar a análise de fósforo em um lago com escoamento superficial médio anual de 125mm, evaporação anual de 700mm e precipitação média anual de 500mm. A área da bacia do lago tem 2300km<sup>2</sup> e a profundidade média do lago é de 15m.

A quantidade de fósforo na água de chuva  $C_p=0,01\text{mg/L}$  e é retirado do lago  $3,8\text{m}^3/\text{s}$  sendo repostado em forma de esgoto tratado 70% da vazão. A água de retorno ao lago possui  $C_w=2,2\text{mg/L}$  de fósforo. A concentração de fósforo medida do lago é de  $C_c=0,09\text{mg/L}$ .

A área da superfície do lago tem  $130\text{km}^2$ .

O volume do lago é a superfície multiplicado pela profundidade média,

$$V = 130\text{km}^2 \times 1000 \times 1000 \times 15 = 1.950.000.000\text{m}^3 = 1,95 \times 10^9\text{m}^3$$

A vazão média  $Q_r$  que chega ao lago causado pelo *runoff* (escoamento superficial):

$$Q_r = \text{Área da bacia} \times (125/1000) / (365 \times 86400\text{s}) = 2300 \times 1000 \times 1000 \times (125/1000) / (365 \times 86400) = 9,1\text{m}^3/\text{s}$$

A vazão causada pela precipitação direta na superfície do lago é:

$$Q_p = \text{Área do lago} \times \text{precipitação anual} = 130 \times 1000 \times 1000 \times (500/1000) / (365 \times 86400) = 2,06\text{m}^3/\text{s}$$

A vazão evaporada da superfície do lago:

$$Q_e = 130 \times 1000 \times 1000 \times (700/1000) / (365 \times 86400) = 2,89\text{m}^3/\text{s}$$

#### A vazão de saída $Q_o$ será:

Adotando as seguintes simplificações:

$$Q_g = 0 \quad \text{vazão devido a águas subterrâneas.}$$

$$Q_s = 0 \quad \text{vazão do rio que chega ao lago}$$

É importante salientar que 70% do volume extraído retorna ao lago e 30% é lançado a jusante do mesmo fazendo parte portanto como  $0,30 \times Q_{ws}$ .

$$Q_o = Q_r + Q_p - Q_e - 0,30 \times Q_{ws} = 9,1 + 2,06 - 2,89 - 0,30 \times 3,8 = 7,15\text{m}^3/\text{s}$$

$$\beta = K + Q_o/V$$

$$K = \text{constante de fósforo} = 0,003/\text{dia} = 0,003/86400\text{s} = 3,4 \times 10^{-8}/\text{s}$$

$$V = 1.950.000.000\text{m}^3 = 1,95 \times 10^9\text{m}^3$$

$$Q_o = 7,15\text{m}^3/\text{s}$$

$$\beta = K + Q_o/V$$

$$\beta = 3,4 \times 10^{-8}/\text{s} + 7,15/1,95 \times 10^9 = 3,4 \times 10^{-8}/\text{s} + 0,36667 \times 10^{-8} = 3,7667 \times 10^{-8}/\text{s}$$

$$M' = C_c \times \beta \times V = (0,09\text{mg/L} \times 3,7667 \times 10^{-8} \times 1,95 \times 10^9) \times 1000 = 6610,56\text{mg/s}$$

#### A carga da concentração de fósforo devido ao runoff é:

$$M' = Q_p \times C_p + Q_r \times C_r + Q_w \times C_w = 6610,56\text{mg/s}$$

$$Q_w = 0,7 \times 3,8 = 2,66\text{m}^3/\text{s} \quad (\text{retorno})$$

$$6610,56\text{mg/s} = 2,06 \times 0,01 \times 1000 + 9,1 \times C_r \times 1000 + 2,66 \times 2,2 \times 1000$$

$$6610,56\text{mg/s} = 20,6 + 9,1 \times C_r \times 1000 + 5852 = 5872,6 + 9,1 \times C_r \times 1000$$

$$9,1 \times C_r \times 1000 = 6610,56 - 5872,6 = 737,96$$

$$C_r = 737,96 / (9,1 \times 1000) = 0,081\text{mg/L}$$

#### Determinar a carga de fósforo que deve ser lançada no lago para que a concentração de fósforo no lago seja de $0,03\text{mg/L}$ .

$$M' = C_c \times \beta \times V = 0,03\text{mg/L} \times 3,7667 \times 10^{-8}/\text{s} \times 1,95 \times 10^9 = 2204\text{mg/s}$$

#### Quantidade de fósforo no esgoto retornado para o lago.

$$C = 2,2 - (6610,56\text{mg/s} - 2204) / (0,7 \times 3,8 \times 1000) = 2,2 - 1,7 = 0,50\text{mg/L}$$

Metcalf e Eddy, 1993 salientam que a redução de  $2,2\text{mg/L}$  para  $0,50\text{mg/L}$  mostra que o lago é muito sensível às descargas lançadas nele.

### Exemplo 2.7

Determinar a concentração da DBO<sub>5</sub> em um lago que tem chuva escoamento superficial médio anual de 0,356m. A área da bacia do lago tem 25,6km<sup>2</sup> e a profundidade média do lago é de 3,0m conforme exemplo adaptado de Metcalf e Eddy, 1993.

A quantidade de DBO na água de escoamento superficial (runoff) Cp=1,0mg/L. É lançado efluente de esgoto tratado na vazão de Qw=0,0425m<sup>3</sup>/s com DBO=Cw=25mg/L. A área da superfície do lago tem 0,20km<sup>2</sup>.

O volume do lago é a superfície multiplicado pela profundidade média,

$$V = 0,20\text{km}^2 \times 1000 \times 1000 \times 3,0 = 600.000\text{m}^3$$

A vazão média Qr que chega ao lago causado pelo *runoff* (escoamento superficial):

$$Q_r = \text{Área da bacia} \times 0,356\text{m} / (365 \times 86400\text{s}) = 0,20 \times 1000 \times 1000 \times 0,356 / (365 \times 86400) = 0,289\text{m}^3/\text{s}$$

**A vazão de saída Qo será:**

$$Q_o = Q_r + Q_w = 0,289 + 0,0425 = 0,3315\text{m}^3/\text{s}$$

$$\beta = K + Q_o/V$$

$$K = 0,3/\text{dia}$$

$$K = \text{constante da DBO} = 0,3/\text{dia} = 0,3/86400\text{s} = 3,472 \times 10^{-6}/\text{s}$$

$$V = 600.000\text{m}^3$$

$$Q_o = 0,3315\text{m}^3/\text{s}$$

$$\beta = K + Q_o/V$$

$$\beta = 3,472 \times 10^{-6}/\text{s} + 0,3315/600000 = 3,472 \times 10^{-6}/\text{s} + 5,52 \times 10^{-7}/\text{s} = 4,024 \times 10^{-6}/\text{s}$$

$$M' = Q_r \times C_r + Q_w \times C_w$$

$$Q_r = 0,289\text{m}^3/\text{s}$$

$$C_r = 1\text{mg/L DBO}$$

$$Q_w = 0,0425$$

$$C_w = 25\text{mg/L DBO}$$

$$M' = (0,289 \times 1,0 + 0,0425 \times 25) \times 1000 = 1351 \text{ mg/s}$$

$$C_c = M' / \beta \times V = 1351 / (4,024 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^5 \times 10^3) = \mathbf{0,56\text{mg/L DBO}}$$

### Exemplo 2.8

Dada uma área da bacia de 97ha de um lago. O lago tem área superficial de 15.920m<sup>2</sup>, volume de 38.983m<sup>3</sup>. A precipitação média anual na região é de 1,07m. Calcular a carga de fósforo no lago.

Na Tabela (2.5) estão as áreas agrícolas, florestas e urbanas da região, mostrando que 64% da área é agrícola e 21% urbana.

Para cada uso do solo foi estimado o coeficiente de runoff C, assim para a área urbana C=0,73.

A carga de fósforo adotada para a área urbana é de 0,792kg de fósforo por ano por hectare e multiplicando pela área em ha obtemos 16,6kg/ano de fósforo que chegará ao lago.

$$\text{Carga} = 0,792 \text{ kg/ha} \times \text{ano} \times 21\text{ha} = 16,6 \text{ kg/ano de P}$$

**Tabela 2.5- Porcentagem das áreas e coeficientes de runoff e cargas de fósforo**

Uso do solo	Área (ha)	Porcentagem	C. runoff	Carga P (kg/haxano)	Carga P (kg/ano)
Agricultura	64	66%	0,36	1,620	103,7
Floresta	12	12%	0,31	0,027	0,3
Urbana (pavimentada)	21	22%	0,73	0,792	16,6
	97ha	100%			120,6kg/ano

Na Tabela (2.6) vamos calcular o coeficiente de runoff ponderado em relação as áreas e o obtido foi C=0,43.

$$C = (0,66 \times 0,36 + 0,12 \times 0,31 + 0,22 \times 0,73) / 1,00 = 0,43$$

**Tabela 2.6- Calcular o coeficiente de runoff ponderado**

Uso da terra	Área (ha)	fração da área	C. runoff
Agricultura	64	0,66	0,36
Floresta	12	0,12	0,31
Urbana (pavimentada)	21	0,22	0,73
Total=	97	1,00	0,44

Na Tabela (2.7) a precipitação média anual é de 1,07m e considerando o *runoff* ponderado obtido de 0,44 obtemos 456.676m<sup>3</sup>.

$$1,07 \text{ m} \times 0,44 \times 97\text{ha} \times 10000\text{m}^2 = 456.676 \text{ m}^3$$

Considerando o volume do reservatório de 38.982m<sup>3</sup> fazemos a soma do volume total:

$$\text{Volume total} = 456676\text{m}^3 + 38.982\text{m}^3 = 495.658\text{m}^3$$

Conforme Tabela (2.5) a carga total de fósforo que chega ao lago é de 120,6kg/ano, ou seja, 120.600 g/ano.

Como a área da superfície do lago As= 15.920m<sup>2</sup> vamos achar a carga de fósforo em gramas por metro quadrado por ano.

$$120.600 \text{ g/ ano} / 15.920\text{m}^2 = 7,58 \text{ g/m}^2 \text{ ano}$$

A concentração de fósforo será:

$$120.600\text{g/ano} / 495.658\text{m}^3 = 0,24 \text{ g/m}^3 = 0,24\text{mg/L}$$

Nota: este exemplo é muito fácil de ser aplicado. Poderia ser incluso também o efluente de uma ETE e o volume de lançamento no lago deveria ser usado o método da solução para a concentração final fósforo.

Somente consideramos a poluição difusa causada pelo escoamento superficial (*runoff*) e não consideramos as águas subterrâneas, que apresentam grande dificuldade de estimativas.

**De maneira análoga poderíamos fazer aplicar o exemplo para o nitrogênio mudando somente as taxas de aplicação do nitrogênio.**

**Tabela 2.8- Estimativa da carga total de nitrogênio baseado no uso do solo**

<b>Uso do solo</b>	<b>Carga total de nitrogênio (kg/ha x ano)</b>
Agricultura	20,0
Floresta	1,9
Area urbana	10,9

### **Exemplo 2.9**

Para o exemplo anterior vamos supor que exista uma ETE que produz 756m<sup>3</sup>/dia de esgotos que são lançados no lago com 0,30mg/L de fósforo total PT.

Por ano teremos: 365dias x 756m<sup>3</sup>/dia=**275.940m<sup>3</sup>/ano**

O volume anual devido ao *runoff* foi de 456.676m<sup>3</sup> que acrescido aos 275.940m<sup>3</sup> resultará em:  
456.676m<sup>3</sup> + 275.940 m<sup>3</sup>= 732.616 m<sup>3</sup>

A carga anual de fósforo da ETE será:

$$275.940 \text{ m}^3/\text{ano} \times 0,30\text{g/ m}^3 = \mathbf{82.782\text{g/ano de fósforo}}$$

A carga total será a soma da carga da poluição difusa mais a carga concentrada da ETE.

$$82.782 \text{ g/ano} + 120.600\text{g/ano}=203.382\text{g/ano}$$

Dividindo pela área do lago de 15.920m<sup>2</sup> teremos:

$$203.382\text{g/ano/ } 15.920\text{m}^2=\mathbf{12,8 \text{ g/m}^2 \text{ x ano}}$$

A concentração de fósforo será:

$$203.382 \text{ g/ano} / 732.616\text{m}^3 = \mathbf{0,28 \text{ mg/L de fósforo total}}$$

## 2.11 Cálculo do oxigênio dissolvido em LAGO e RESERVATÓRIOS

Conforme Thomann e Mueller, 1987:

$$C = \left( \frac{Q}{Q + K_L \times A} \right) \times c_{in} + \left( \frac{K_L \times A}{Q + K_L \times A} \right) \times c_s - \left( \frac{V \times K_d}{Q + K_L \times A} \right) \times L + \left( \frac{Wc}{Q + K_L \times A} \right)$$

Sendo:

C= concentração de oxigênio dissolvido (DO) na lagoa (mg de O<sub>2</sub>/ L x dia)

Q=vazão de descarga (m<sup>3</sup>/s)

K<sub>d</sub>=K<sub>1</sub>= coeficiente devido deoxidação referente a DBO

L= DB0 existente nas lagoas no início

A=área da superfície do lago (m<sup>2</sup>)

V= volume do lago (m<sup>3</sup>)

c<sub>in</sub> = concentração de OD na água que entra no lago (mg/L)

$$K_L = 0,728 \times U^{0,5} - 0,317 \times U + 0,0372 \times U^2$$

$$K_r = K_{sed} + K_d = K_{sed} + K_1$$

O valor K<sub>r</sub> é a soma da deposição de DBO no fundo do lago que denominaremos de K<sub>sed</sub> e da taxa de desoxigenação da DBO chamado de K<sub>1</sub> ou K<sub>d</sub>.

Wc= é a carga de outras origens e consumo de OD podendo ser positivo ou negativo (+fotossíntese, - respiração, -consumo de oxigênio pelo sedimento)

Para um lago completamente misturado em condições de equilíbrio vale:

$$L = DBO = W / (Q + K_r \times V)$$

### Exemplo 2.10- Fonte: Thomann e Mueller, 1987

Seja um lago com profundidade média H=1,3m e superfície A=15000m<sup>2</sup>, onde a vazão de entrada e saída são de 0,04m<sup>3</sup>/s. A temperatura que queremos é 23°C. A velocidade do vento é V=4,5m/s e a taxa de oxigênio na entrada do lago é c<sub>in</sub>=8,00mg/L e a DBO de entrada L<sub>in</sub>=0.

A taxa de consumo de oxigênio pelo sedimento S<sub>B</sub>=0,5 g/m<sup>2</sup> x dia que denominamos também de K<sub>s</sub>.

O coeficiente K<sub>r</sub>=0,3/dia a 23° C e K<sub>d</sub>=K<sub>1</sub>=0,2/dia a 23°C. A carga de DBO lançado por dia é W=120 kg DBO/dia.

Achar a concentração de OD da mistura.

### Resolução do problema:

#### Cálculo do volume do lago V

$$V = A \times H = 15000m^2 \times 1,3m = 19.500m^3$$

#### Vazão de entrada e de saída

$$Q = 0,04m^3/s \times 86400s = 3460m^3/dia$$

#### Tempo de detenção ou tempo de residência

$$td = V/Q = 19500m^3 / 3460m^3/dia = 5,6 \text{ dias}$$

#### Coeficiente K<sub>L</sub> para o lago

$$K_L = 0,728 \times U^{0,5} - 0,317 \times U + 0,0372 \times U^2$$

Sendo:

U= velocidade do vento a 10m de altura (m/s)

U=4,5m/s

$$K_L = 0,728 \times 4,5^{0,5} - 0,317 \times 4,5 + 0,0372 \times 4,5^2 = 0,87m/dia \text{ (0,6m/dia a 0,9m/dia) OK.}$$

#### Concentração de saturação cs

Podemos achar a saturação do oxigenio usando uma tabela ou calculando.

Cs= 8,58mg/L para temperatura de 23°C.

#### Concentração de DBO no lago

$$L = W / (Q + K_r \times V) = (120 \text{ kg/dia} \times 1000 \text{ g/dia}) / (3560 \text{ m}^3/\text{dia} + 0,3 \times 19500 \text{ m}^3) = 12,89 \text{ mg/L}$$

Portanto, a concentração de DBO no lago é 12,89mg/L

### Cálculo da concentração de OD no lago

$$C = (Q / (Q + K_L \times A)) \times c_{in} + (K_L \times A / (Q + K_L \times A)) \times c_s - (V \times K_d / (Q + K_L \times A)) \times L + -(W_c / (Q + K_L \times A))$$

Como temos consumo de oxigênio pelo sedimento:

$$W_c = S_B \times A$$

$$Q + K_L \times A = 3460 \text{ m}^3/\text{dia} + 0,87 \times 15000 \text{ m}^2 = 16500 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$C = (3460 / 16500) \times 8,00 + (0,87 \times 15000 / 16500) \times 8,58 - (19500 \times 0,2 / 16500) \times 12,89 - S_B \times A / 16500$$

$$C = (1,68 + 6,79 - 3,05 - 0,5 \times 15000 / 16500)$$

$$C = (1,68 + 6,79 - 3,05 - 0,45) = 4,97 \text{ mg/L}$$

### Exemplo 2.11 Lago dos Patos em Guarulhos

#### Consumo de oxigênio dissolvido (OD) no lago dos Patos

A concentração de oxigênio dissolvido OD é dado pelas parcelas referentes a córrego tributário, saturação do OD, consumo de oxigênio devido a DBO e consumo de oxigênio devido a sedimentos no fundo do lago.

Adotaremos modelo de Thomann e Mueller, 1987.

$$C = (Q / (Q + K_L \times A)) \times c_{in} + (K_L \times A / (Q + K_L \times A)) \times c_s - (V \times K_d / (Q + K_L \times A)) \times L - (W_c / (Q + K_L \times A))$$

Como temos consumo de oxigênio pelo sedimento:

$$W_c = S_B \times A$$

Sendo:

C= concentração de oxigênio dissolvido (OD) na lagoa (mg de O<sub>2</sub> / L x dia)

Q=vazão de descarga= 184m<sup>3</sup>/dia

K<sub>1</sub>= coeficiente devido deoxidação referente a DBO= 0,58/dia

L= DB0 existente nas lagoas no início = 2mg/L

A=área da superfície do lago= 18.800m<sup>2</sup>

V= volume do lago= 21.390m<sup>3</sup>

K<sub>s</sub>= S<sub>B</sub>=demanda de oxigênio pelo sedimento= 1,056g/m<sup>2</sup>/dia (adotado)

c<sub>in</sub> = concentração da água que entra no lago com OD=7,0mg/L (vaira de 80% a 90% da Ods)

c<sub>s</sub>= saturação do OD a 20°C na altitude 760,00m de Guarulhos =8,3mg/L

T= 20°C

#### Resolução do problema:

##### Cálculo do volume do lago V

$$V = 21.390 \text{ m}^3$$

##### Vazão de entrada e de saída

$$Q = 184 \text{ m}^3/\text{dia}$$

##### Tempo de detenção ou tempo de residência

$$t_d = V/Q = 21.390 \text{ m}^3 / 184 \text{ m}^3/\text{dia} = 116 \text{ dias}$$

##### Coefficiente K<sub>L</sub> para o lago

$$K_L = 0,728 \times U^{0,5} - 0,317 \times U + 0,0372 \times U^2$$

Sendo:

U= velocidade do vento a 10m de altura (m/s)

U=3,5m/s (média de Guarulhos na Estação Climatológica da UNG)

$$K_L = 0,728 \times 3,5^{0,5} - 0,317 \times 3,5 + 0,0372 \times 3,5^2 = 0,71 \text{ m/dia (0,6m/dia a 0,9m/dia) OK.}$$

### Concentração de saturação $c_s$

Podemos achar a saturação do oxigênio usando a Tabela (5.12) ou calculando.

$C_s = 8,30 \text{ mg/L}$  para temperatura de  $20^\circ\text{C}$  altitude 760m em Guarulhos.

### Cálculo da concentração de OD no lago

$$C = \left( \frac{Q}{Q + K_L \times A} \right) \times c_{in} + \left( \frac{K_L \times A}{Q + K_L \times A} \right) \times c_s - \left( \frac{V \times K_d}{Q + K_L \times A} \right) \times L - \left( \frac{W_c}{Q + K_L \times A} \right)$$

$$Q + K_L \times A = 184 \text{ m}^3/\text{dia} + 0,71 \times 18.800 \text{ m}^2 = 13.532 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$W_c = S_B \times A$$

$$S_B = K_s = 1,056 \text{ g/m}^2/\text{dia} \text{ (adotado)}$$

$$W_c = 1,056 \times 18.800 \text{ m}^2 = 19853$$

$$C = \left( \frac{1840}{13.532} \right) \times 7,00 + \left( \frac{0,71 \times 18.800}{13.532} \right) \times 8,30 - \left( \frac{21.390 \times 0,58}{13.532} \right) \times 2,0 - \left( \frac{19853}{13532} \right)$$

$$C = 0,95 + 8,19 - 1,83 - 1,47 = \mathbf{5,84 \text{ mg de } O_2/\text{L x dia}}$$

Vamos supor para efeito de exemplo que o lago não possa ter menos que  $5,0 \text{ mg/L x dia}$  de oxigênio dissolvido.

**Portanto, a concentração de oxigenio no Lago dos Patos é de  $5,84 \text{ mg } O_2/\text{L x dia}$ .**



## 2.12 Cálculo do oxigênio dissolvido durante o dia devido ao fitoplâncton.

Devido a energia solar, a fotossíntese só ocorre durante o dia.

$$pa = ps \times G(Ia)$$

Sendo

pa= oxigênio dissolvido durante o dia em mg O<sub>2</sub>/ L x dia

ps= produção de luz que produz o oxigênio dissolvido saturado.

ps=aop x P

aop= 0,25 razão em mg de DO / µg de clorofila a que varia de 0,1 a 0,3. Vamos adotar aop=0,25 que é a taxa de luz que produz demanda de oxigênio saturado.

P= clorofila a em µg/L= 10 µg/L (admitido: é uma quantidade grande)

$$ps = 0,25 \times P = 0,25 \times 10 = 2,5 \text{ µg/L} = 2,5 \text{ mg O}_2/\text{L x dia}$$

G (Ia)= fator de atenuação da luz de acordo com a profundidade e em um dia

$$G(Ia) = 2,718 \times f (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0}) / (K_e \times H)$$

$$G(Ia) = 2,718 \times 0,6 (e^{-0,55} - e^{-1,42}) / (1,04 \times 1,87) = 0,29$$

$$pa = ps \times G(Ia) = 2,5 \times 0,29 = 0,73 \text{ mg O}_2/\text{L x dia}$$

Sendo:

$$\alpha_0 = Ia / Is = 500/350 = 1,42$$

H= 1,87m = profundidade média (adotado)

K<sub>e</sub>= 1,04 adotado

K<sub>e</sub> = 1,7 / D<sub>s</sub> sendo D<sub>s</sub>= profundidade obtida com o disco de Secchi (m)

z= profundidade de atividade da fotossíntese (m) =0,914m

$$\alpha_1 = \alpha_0 \times e^{-K_e \times z} = 1,42 \times e^{-1,04 \times 0,914} = 0,55$$

Sendo:

K<sub>e</sub>= coeficiente de extinção da luz (1/m) = 1,04/dia

Ia= média da radiação solar durante o dia em Langley/dia=500 Langleys/dia.

Nota: Langley/dia (Ly – 1caloria/cm<sup>2</sup>=2,06 w/m<sup>2</sup>)

Is= luz no qual o fitoplâncton cresce ao máximo em Langley/dia e que varia de 250 a 500 = 350 Langley/dia

f= foto período (fração da duração da luz do dia) =0,6 dia

### 2.13 Estimativa da variação diurna do oxigênio devido a fotossíntese (fitoplâncton)

Conforme [http://www.mde.state.md.us/assets/document/TMDL/adkins/adkins\\_main\\_final.pdf](http://www.mde.state.md.us/assets/document/TMDL/adkins/adkins_main_final.pdf)  
acessado em 26 de dezembro de 2006:

$$\frac{\Delta}{P_{av}} = \frac{(1 - e^{-K_a f T})(1 - e^{-K_a T(1-f)})}{f K_a (1 - e^{-K_a T})}$$

**f= 0,6dias**

**T=1dia**

**Ka=0,5/dia**

pa=0,73 mg O<sub>2</sub>/ L x dia

$$\Delta c/pa = \frac{[(1 - e^{-K_a \times f \times T}) \times (1 - e^{-K_a \times T \times (1-f)})] / [f \times K_a \times (1 - e^{-K_a \times T})]}{[(1 - e^{-0,5 \times 0,6 \times 1 \text{dia}}) \times (1 - e^{-0,5 \times 1 \times (1-0,6f)})] / [0,6 \times 0,5 \times (1 - e^{-0,5 \times 1 \text{dia}})]}$$
$$\Delta c/0,73 = 0,39$$

$$\Delta c = 0,39 \times 0,73 = 0,29 \text{ mg O}_2/\text{L x dia}$$

O valor  $\Delta c$  achado mostra que durante o dia oxigênio dissolvido aumenta ou diminui de 0,29mg O<sub>2</sub>/ L x dia.

Supondo que o oxigênio dissolvido no lago é de 5,95mg/L poderá haver variação de oxigênio de 5,95-0,29=5,66 até 5,95+0,29=6,24mg/L de O<sub>2</sub>.

### 2.14 Coeficiente de extinção da luz Ke

Pesquisas efetuadas por Lee e Rast, 1997 concluíram que com 13% de erros temos:

**Coeficiente de extinção de luz:**

$$K_e = 2,78 + 0,007 \times \text{Cor em uH} + 0,036 \times \text{turbidez em UT}$$

Ke varia de 2,49 /m a 7,93 /m conforme as pesquisa

A profundidade eufótica z em metros pode ser estimada pela relação:

$$z = 4,6/ K_e$$

que varia de 0,61m a 1,85m conforme as pesquisas efetuadas

#### Exemplo 2.12

Calcular o coeficiente de extinção de luz e a profundidade eufótica do lago dos Patos em Vila Galvão, Guarulhos sabendo que através de análise de água a cor foi maior que 150 uH e que a turbidez foi de 83 uT.

$$\text{Coeficiente de extinção de luz (Ke ou } \eta) = 2,78 + 0,007 \times \text{Cor} + 0,036 \times \text{turbidez}$$

$$K_e = 2,78 + 0,007 \times 150 + 0,036 \times 83 = 6,8/\text{m}$$

$$Z = 4,6/ K_e = 4,6/ 6,8 = 0,67\text{m}$$

### 2.15 Cálculo da variação de oxigênio para rios devido somente ao fitoplâncton

No capítulo 5 fizemos um cálculo da respiração e produção de oxigênio devido as algas segundo Rutherford, 2005 para rios, mas vamos usar modelo de Thomann e Muller, 1987 página 450.

Acima fizemos os cálculos da variação de oxigênio devido a lagos e agora vamos ver a variação de oxigênio devido ao fitoplâncton devido em rios.

Faremos a explicação juntamente com um exemplo.

Iniciamos primeiramente com o cálculo da respiração R pelo fitoplâncton.

$$R = aop \times Gp \times P$$

Sendo:

R= respiração pelo fitoplâncton (mg O<sub>2</sub>/ L x dia)

P= clorofila-a (µg/L)

Gp= fator de atenuação da luz de acordo com a profundidade e em um dia

f= foto período = 0,5 (dado do problema)

H= 0,90m= profundidade do rio (dado do problema)

Ke= 1,1/m

$$G(I) = 2,718 \times f (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0}) / (Ke \times H)$$

$$G(I) = 2,718 \times 0,5 (e^{-1,49} - e^{-4,00}) / (1,1 \times 0,90) = \mathbf{0,284}$$

Temperatura= 23° C

Crescimento e morte de fitoplâncton.

$$G(T) = Gmax \times 1,066^{(T-20)}$$

Os valores de Gmax variam de 1,5/dia a 2,5/dia. Adotamos Gmax=1,8/dia que é um misto da população do fitoplancton.

$$\text{Mas } G(T) = 1,8 \times 1,066^{(23-20)} = 2,18/\text{dia}$$

$$Gp = G(I) \times G(T) = 0,284 \times 2,18/\text{dia} = \mathbf{0,619/\text{dia}}$$

**Dp= respiração endógena**

$$Dp = \mu_R \times 1,08^{(T-20)}$$

O valor de  $\mu_R$  varia de 0,05/dia a 0,25/dia. Adotamos  $\mu_R = \mathbf{0,1/\text{dia}}$

$$Dp = 0,1 \times 1,08^{(23-20)} = \mathbf{0,126/\text{dia}}$$

$$pa = aop \times Gp \times P = 0,133 \times 0,619/\text{dia} \times P = \mathbf{0,082 \times P} \quad (\text{mg O}_2/\text{L} \times \text{dia})$$

O valor de R será:

$$R = aop \times Dp \times P$$

$$R = \mathbf{0,133 \times 0,126 \times P = 0,0168 \times P} \quad (\text{mg O}_2/\text{L} \times \text{dia})$$

Sendo:

P=clorofila-a (µg/L)

Is= 300 ly/dia (dado do problema)

Radiação solar diária It= 600 ly/dia (dado do problema)

f=foto período=0,5 (dado do problema)

$$\alpha_0 = I_a / I_s = (600/0,5)/300 = \mathbf{4,00}$$

H= 0,90m = profundidade média (adotado)

Ke= 1,1 dado do problema

$$\alpha_1 = \alpha_0 \times e^{-Ke \times H} = 4,00 \times e^{-1,1 \times 0,9} = \mathbf{1,49}$$

aop= 0,25 razão em mg de OD / µg de clorofila a que varia de 0,1 a 0,3. Vamos adotar aop=0,133 que é a taxa de luz que produz demanda de oxigênio saturado para o exemplo que faremos..

**Tabela 2.9- Estimativa do oxigênio dissolvido no rio devido ao fitoplâncton**

Trecho do rio	clorofila Cl-a	pa	R	pa-R	Temp		Déficit D	delta c=	Déficit +Deltac/2	Déficit - deltac/2
		(mgO <sub>2</sub> /L x dia)	(mgO <sub>2</sub> /L x dia)		(dias)	Do no início		pa/2		
Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10	Coluna 11
1	27	2,25	0,45	1,80	0,50	<b>0,02</b>	-0,58	<b>2,46</b>	0,64	-1,81
2	34	2,83	0,57	2,26	0,50	<b>-0,58</b>	-0,98	<b>2,46</b>	0,25	-2,21
3	41	3,41	0,69	2,73	0,50	<b>-0,98</b>	-1,29	<b>2,46</b>	-0,07	-2,52
4	50	4,16	0,84	3,33	0,50	<b>-1,29</b>	-1,62	<b>2,46</b>	-0,39	-2,84
5	59	4,91	0,99	3,92	0,44	<b>-1,62</b>	-1,92	<b>2,46</b>	-0,69	-3,15

$K_a = K_2 =$  coeficiente de aeração

Usando equação de O'Connor nas unidades SI temos:

$$K_a = 3,73 \times V^{0,5} / H^{1,50}$$

V= velocidade=0,15m/s=velocidade média do rio, dado do problema

H= profundidade média do rio (m)=0,90m

$$K_a = 3,73 \times 0,15^{0,5} / 0,90^{1,50} = 1,69/\text{dia}$$

Como o valor de  $K_a$  ou  $K_2$  é para a temperatura de 20°C, para 23° temos

$$K_a = K_2 = 1,69 \times 1,024^{(23-20)} = 1,81/\text{dia}$$

A média diária de déficit de oxigênio dissolvido OD em (mg/L) é dada pela equação:

Da equação de Streeter-Phelps do capítulo 5 deste livro temos:

$$D = D_o \times e^{-K_2 \times t} + \left\{ \left[ \frac{K_1}{(K_2 - K_1)} \right] \times (e^{-K_1 \times t} - e^{-K_2 \times t}) \right\} \times L_o + \left\{ \left[ \frac{K_N}{(K_2 - K_N)} \right] \times (e^{-K_N \times t} - e^{-K_2 \times t}) \right\} \times L_{oN} - (1 - e^{-K_2 \times t}) \times (pa - R - K_s/H) / K_2$$

Considerando  $K_s=0$  e não o resto da equação e sim somente a parte que está nos interessando agora que é a produção e o consumo de oxigênio pelo fitoplâncton temos a equação. Substituímos o valor  $K_2$  por  $K_a$

$$D = D_o \times \exp(-K_a \times \Delta t) - ((pa-R)/K_a) \times (1 - \exp(-K_a \times \Delta t)) \quad (\text{Equação 2.1})$$

Sendo:

D= déficit (mg/L)

Di= déficit inicial (mg/L)

$K_a =$  coeficiente =1,81/dia no exemplo

$\Delta t =$  horas no trecho

Para o primeiro trecho iniciamos com  $D_o = 0,02 \text{ mg/L}$  de déficit de OD. O déficit no fim de cada trecho será o início do trecho seguinte.

O déficit diário será a média diária mais ou menos  $\Delta c/2$  sendo:

Para  $K_a < 2/\text{dia}$  então:

$$\Delta c = pa/2 = 4,91/2 = 2,46 \text{ mg/L} \quad (\text{Tomamos o maior valor de "pa", ou seja, 4,91 a favor da segurança})$$

O resumo dos cálculos estão na Tabela (2.9).

Vamos explicar coluna por coluna da Tabela (2.9).

Coluna 1: estão os trechos do rio, variando de 1 a 5

Coluna 2: estão os valores a clorofila-a conforme amostra extraída de cada trecho.

Coluna 3: estão os valores do oxigênio consumido durante o dia  $pa$  de cada trecho devido as algas

Coluna 4: está a respiração das algas de cada trecho

Coluna 5: estão os valores de  $pa-R$  de cada trecho

Coluna 6: estão os tempos em dias de cada trecho, geralmente de 0,50 dias e somente o ultimo é de 0,44dia.

Coluna 7: Na primeira linha está o valor da demanda de oxigênio no início de 0,02mg/L. Nas demais linhas o valor de Do é o valor calculado na linha anterior da coluna 8.

Coluna 8: Aplicação da equação (2.1) sendo o Do o do cálculo anterior.

Coluna 9: São os valores de  $\Delta c$  de 2,46mg/L considerando o maior valor da coluna 3 que é  $4,91/2=2,46$ .

Coluna 10: São os valores da coluna 8 +  $2,46/2$

Coluna 11: São os valores da coluna 8 -  $2,46/2$

### 2.16 Lançamento de poluentes em um lago.

Vamos explicar dando um exemplo seguindo modelo de Thomann e Muller, 1987.

Seja um lago misturado de proporções moderadas:

$$W = Q_e \times S_e + Q_r \times S_r + Q_T \times S_T + P \times A_s \times S_p + S_d \times V$$

**Sendo:**

W= entrada de massa

$Q_e \times S_e$  = transferência de massa de esgotos de um efluente

$Q_r \times S_r$  = devido a um rio que entra no lago

$Q_T \times S_T$  = devido a um tributário

$P \times A_s \times S_p$  = devido a precipitação da água de chuva

$S_d \times V$  = devido ao sedimento

$Q_e$  = vazão efluente

$Q_r$  = vazão do rio que entra no lago

$Q_t$  = vazão do tributário

P = quantidade de precipitação

$A_s$  = área da superfície do lago

V = volume do lago

$S_e$  = concentração do efluente

$S_r$  = concentração do rio

$S_T$  = concentração do tributário

$S_p$  = concentração nas águas de chuvas

$S_d$  = concentração do poluente que sai dos sedimentos

$$td = V/Q$$

Sendo:

td = tempo de detenção no lago

$$S' = W / (Q + KV) = (W/Q) / (1 + Ktd)$$

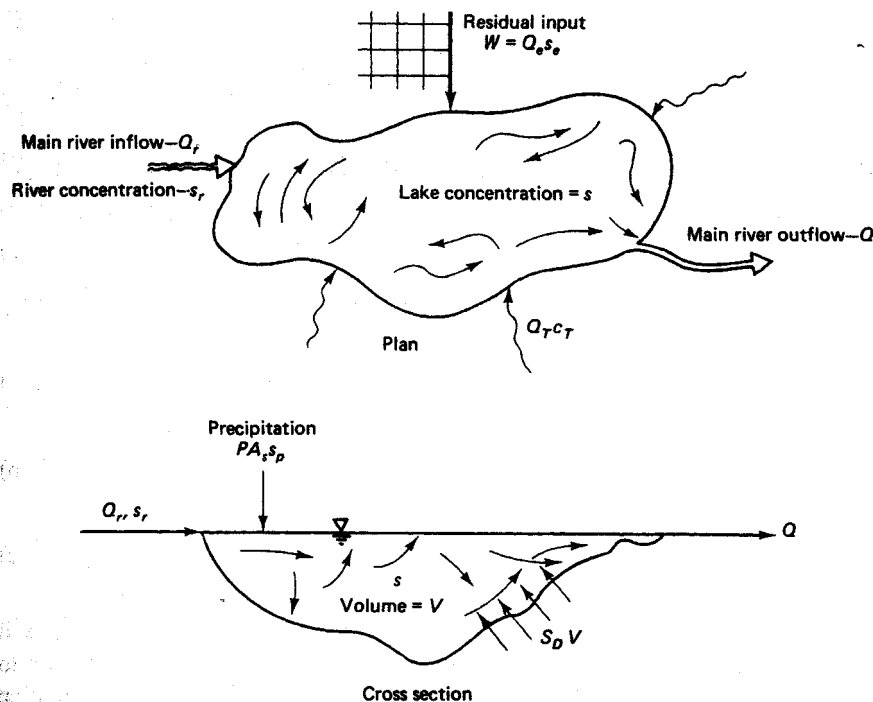
Sendo:

S = concentração no tempo t

t = tempo em ano

K = 0,23/ano

$$S = S' \times \{ 1 - \exp([ -(1 + K \times td) \times (t/td) ])\}$$



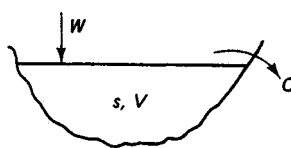
**Figura 2.2- Esquema de lago misturado**

**Exemplo 2.13 Adaptado de Thomann e Muller, 1987.**

Seja um lago com durante 1,5anos vem recebendo um pesticida (Triallate) com 518,4 kg/dia e depois termina. O volume do lago é de  $V= 89.145.000 \text{ m}^3$ . O valor  $K=0,23/\text{ano}$  e a vazão média anual da saída do lago é de  $2,83\text{m}^3/\text{s}$ .

Nota: O triallate é um pesticida usado para matar vegetação daninha. É tóxica para peixes e outros organismos aquáticos. Não é tóxico para passarinhos e é um pouco tóxico para o ser humano.

- Achar a concentração de equilíbrio?
- Achar a máxima concentração?



**Figura 2.3- Esquema do lago**

Primeiramente vamos determinar o tempo de detenção  $t_d$

$$t_d = V/Q = (89154.000\text{m}^3 / 2,83\text{m}^3/\text{s}) / (365\text{dias} \times 86400) = \mathbf{1,0\text{anos}}$$

O valor de S

$$S' = W / (Q + kV) = (W/Q) / (1 + K \times t_d) = (528,4\text{kg} \times 1000 \times 1000) / (2,83 \times 1000) / (1 + 0,23 \times 0,95) = 1,4\text{mg/L}$$

$$S' = 1400 \mu\text{g/L}$$

Portanto, a concentração de equilíbrio é **1.400μg/L**

Para 1,5 anos quando acaba o poluente repentinamente teremos:

$$S = S' \times \{ 1 - \exp([ -(1 + k \times t_d) \times (t/t_d) ])\}$$

$$S(t=1,5\text{anos}) = 1400 \{ 1 - \exp([ -(1 + 0,23 \times 1,00) \times (1,5\text{anos}/1,00\text{anos}) ])\} = 1178 \mu\text{g/L}$$

A máxima concentração do poluente é **1.178 μg/L**

### 2.17 Tipo de análises

No Lago do Nado em Belo Horizonte foram feitas análises longitudinais e mensais ao lago em profundidade:

- 0
- 1m
- 3m
- 5m

Nestes pontos foram retiradas com retiradas amostras com a garrafa de Van Dorn de 2 litros:

1. Fósforo total pelo método de Murphy e Reley
2. Nitrogênio total usando autoclave e persulfato de potássio
3. Clorofila-a pelo método espectrofotométrico usando acetona como solvente orgânico;
4. Oxigênio dissolvido
5. Temperatura
6. Disco de Secchi



## 2.18 Bibliografia e livros recomendados

-BEZERRA NETO, JOSE FERNANDES e COELHO, RICARDO MOTTA PINTO. *A morfologia e o estado trófico de um reservatório urbano: lago do Nado, Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais*, 2002 Universidade Federal de Minas Gerais, 6páginas. Acessado em 23 de dezembro de 2006.

-FERREIRA, ALDO PACHECO et al. *Contribuições para o desenvolvimento da capacidade de previsão de um modelo de qualidade da água*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos volume 11 número, ano 2006

[http://www.ppg.uem.br/Docs/ctf/Biologicas/2002/02\\_245\\_01\\_Jose%20Bezerra-Neto%20e%20outro\\_A%20morfometria.pdf](http://www.ppg.uem.br/Docs/ctf/Biologicas/2002/02_245_01_Jose%20Bezerra-Neto%20e%20outro_A%20morfometria.pdf)

-HUBER, WAYNE C. *Contaminant transport in surface water*. In *Handbook of Hydrology* de David R. Maidment, 1993.

### -INTERNET

[http://www.mde.state.md.us/assets/document/TMDL/adkins/adkins\\_main\\_final.pdf](http://www.mde.state.md.us/assets/document/TMDL/adkins/adkins_main_final.pdf) acessado em 26 de dezembro de 2006:

-LAMPARELLI, MARTA CONDÉ: *Graus de trofia em corpos de água no Estado de São Paulo*, 2004, 238, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da USP.

-LEE, ROGER W. E RAST, WALTER. *Ligth attenuation in a shallow, turbid reservoir, lake Houston, Texas*. U.S. Geological Survey, Austin, Texas, 1997. US Department of the Interior

-METCALF & EDDY. *Wastewater engineering*. Mcgraw-Hill, 3ª ed, 1991, ISBN- 0-07-100824-1., 1334páginas.

-THOMANN, ROBERT V. MUELLER, JOHN A. *Principles of surface water quality modeling and control*. Editora Harper Collins, 1987. 644 páginas, ISBN 0-06-046677-4

### Apêndice A: fonte USEPA, 1985 página 63

The measurement units in surface heat transfer calculations do not follow any consistent units system. For heat flux, the English system units are BTU/ft<sup>2</sup>/day. In the metric system, the units are either Kcal/m<sup>2</sup>/hr or watt/m<sup>2</sup> (1 watt = 1 joule/sec). The Langley (abbreviated Ly), equal to 1 cal/cm<sup>2</sup>, also persists in usage. The following conversions are useful in this section:

1 BTU/ft <sup>2</sup> /day	= 0.131 watt/m <sup>2</sup>	= 0.271 Ly/day	= 0.113 kcal/m <sup>2</sup> /hr
1 watt/m <sup>2</sup>	= 7.61 BTU/ft <sup>2</sup> /day	= 2.07 Ly/day	= 0.86 kcal/m <sup>2</sup> /hr
1 Ly/day	= 0.483 watt/m <sup>2</sup>	= 3.69 BTU/ft <sup>2</sup> /day	= 0.42 kcal/m <sup>2</sup> /hr
1 kcal/m <sup>2</sup> /hr	= 1.16 watt/m <sup>2</sup>	= 2.40 Ly/day	= 8.85 BTU/ft <sup>2</sup> /day
1 kilopascal	= 10 mb	= 7.69 mm Hg	= 0.303 in Hg
1 mb	= 0.1 kilopascal	= 0.769 mm Hg	= 0.03 in Hg
1 mm Hg	= 1.3 mb	= 0.13 kilopascal	= 0.039 in Hg
1 in Hg	= 33.0 mb	= 25.4 mm Hg	= 3.3 kilopascal

