

Francisco Javier Bayo Bernal
Calidad de Aguas
Grado en Ingeniería Civil
Universidad Politécnica de Cartagena

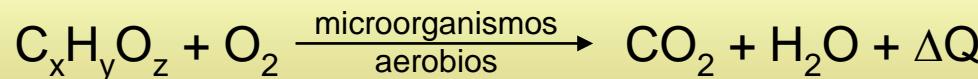
TEMA 4. RÍOS Y CORRIENTES. MODELOS DE OXÍGENO

- 1. Demanda bioquímica de oxígeno**
- 2. Demanda química de oxígeno**
- 3. Ecuación de Streeter-Phelps**
- 4. Parámetros de control. Modelos**



1. Demanda bioquímica de oxígeno

Cantidad de oxígeno necesaria (mg/L) para que los microorganismos aerobios puedan oxidar metabólicamente la materia orgánica presente en la muestra de agua hasta dióxido de carbono y agua



OXIDACIÓN DE
COMPUESTOS ORGÁNICOS
NITROGENADOS

OXIDACIÓN DE
COMPUESTOS ORGÁNICOS
FOSFORADOS

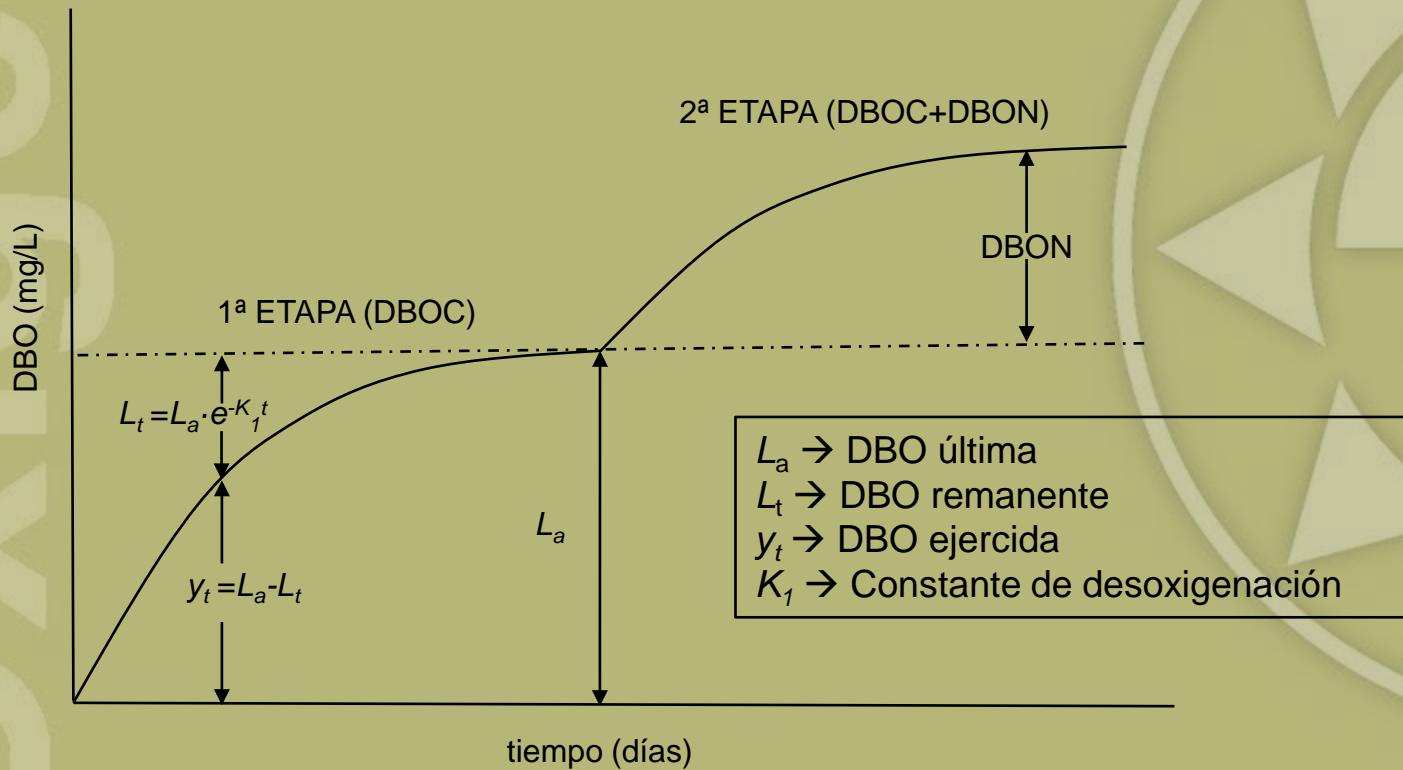
OXIDACIÓN DE
COMPUESTOS ORGÁNICOS
AZUFRADOS



1. Demanda bioquímica de oxígeno

CINÉTICA DE PRIMER ORDEN

$$\frac{dL_t}{dt} = -K_1 L_t$$





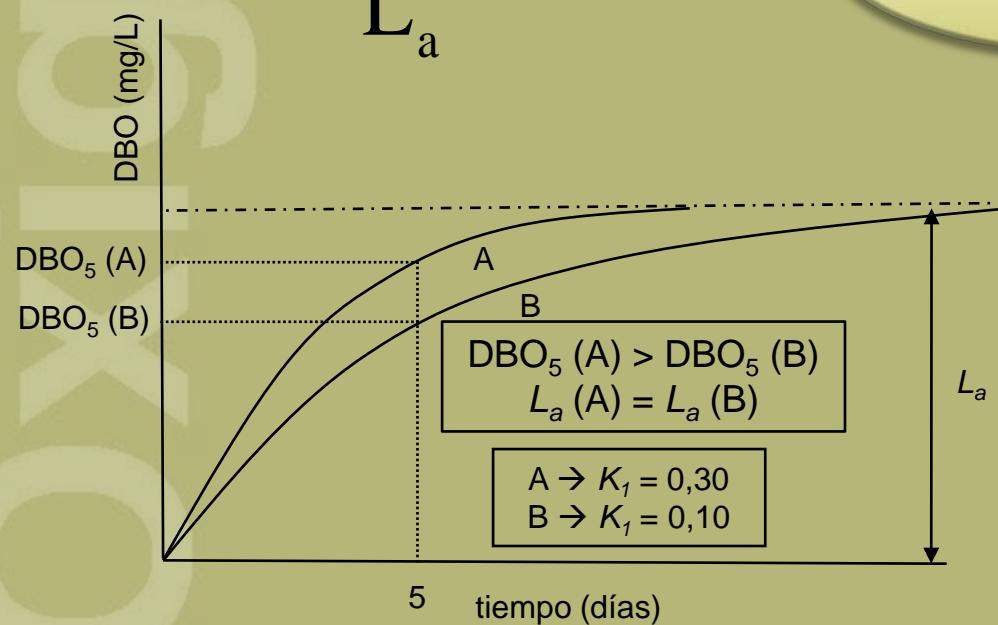
1. Demanda bioquímica de oxígeno

CINÉTICA DE PRIMER ORDEN

$$\frac{dL_t}{L_t} = -K_1 dt \rightarrow \int_{L_a}^{L_t} \frac{dL_t}{L_t} = -K_1 \int_0^t dt \rightarrow \ln \frac{L_t}{L_a} = -K_1 t$$

$$\frac{L_t}{L_a} = e^{-K_1 t} \rightarrow L_t = L_a \cdot e^{-K_1 t}$$

$$K_1 = 2,303 \cdot k_1 \\ k_1 = 0,434 \cdot K_1$$



$$L_t = L_a \cdot 10^{-k_1 t}$$

CÁLCULO K_1

$$K_1 = -\frac{1}{t} \log \frac{L_{a_fin}}{L_{a_inic}}$$

$$k_1 = -\frac{1}{t} \ln \frac{L_{a_fin}}{L_{a_inic}}$$



1. Demanda bioquímica de oxígeno



$$\text{DBO}_5 \text{ (mg/L)} = A \cdot F \cdot D$$

A = Lectura del cabezal el 5º día

F = Factor de corrección

D = Dilución de la muestra

OxiTop® IS 6 → Medida de la disminución en la presión aparecida en el interior de las botellas de incubación, por el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos del agua

Volumen de muestra (mL)	Rango de medida (mg/L)	Factor
432	0-40	1
365	0-80	2
250	0-200	5
164	0-400	10
97	0-800	20
43,5	0-2000	50
22,7	0-4000	100

Definición

2. Demanda química de oxígeno

Determinación DBO → Inconvenientes

PROCESO LENTO (5 días)

SUSTANCIAS NO BIODEGRADABLES

PRESENCIA DE SUSTANCIAS TÓXICAS

Cantidad de oxígeno necesario (mg/l) consumido por las materias reductoras presentes en el agua, sin intervención de organismos vivos

DQOs

Coagulación-flocculación $ZnSO_4$ – filtración ($\varnothing = 0,45 \mu m$)

Fácilmente biodegradable

Ácidos grasos volátiles, hidratos de carbono sencillos, ...

Requiere hidrólisis extracelular antes de ingresar en la célula

Lentamente biodegradable

Inerte

Requiere hidrólisis extracelular antes de ingresar en la célula



2. Demanda química de oxígeno

REFLUJO CON DICROMATO POTÁSICO



350 nm → Hasta 40 mg/l

420 nm → Hasta 150 mg/l

620 nm → Hasta 15.000 mg/l

Interferencia de cloruros
(> 2000 mg/L)



Standard Method (APHA, 1999) → $HgSO_4:Cl$ (10:1) → $HgCl_2$

Relación DBO₅/DQO

$DBO_5 / DQO < 0,2$ (NO BIOD.) ↔ $DBO_5 / DQO > 0,6$ (BIOD.)

$DQO/DBO_5 = 1,5 \Rightarrow$ m.o. ↑↑ degradable

$DQO/DBO_5 = 2,0 \Rightarrow$ m.o. moderadamente degradable

$DQO/DBO_5 = 10,0 \Rightarrow$ m.o. ↓↓ degradable

3. Ecuación de Streeter-Phelps

FUENTES DE OXÍGENO

- Aportación del cauce
- Aportación del vertido
- Reaireación superficial
- Fotosíntesis
- Descenso temperatura
- Dilución por corrientes no contaminadas

SUMIDEROS DE OXÍGENO

- Materia orgánica en suspensión
- Fangos del bentos (DOS)
- Respiración de organismos acuáticos
- Respiración fitoplancton
- Incremento de la temperatura
- Nitrificación
- Materia inorgánica

$$D = \frac{K_1 \cdot L_a}{K_a - K_1} \cdot \left(e^{-K_1 t} - e^{-K_a t} \right) + OD_{di} \cdot e^{-K_a t}$$

ECUACIÓN DE STREETER-PHELPS

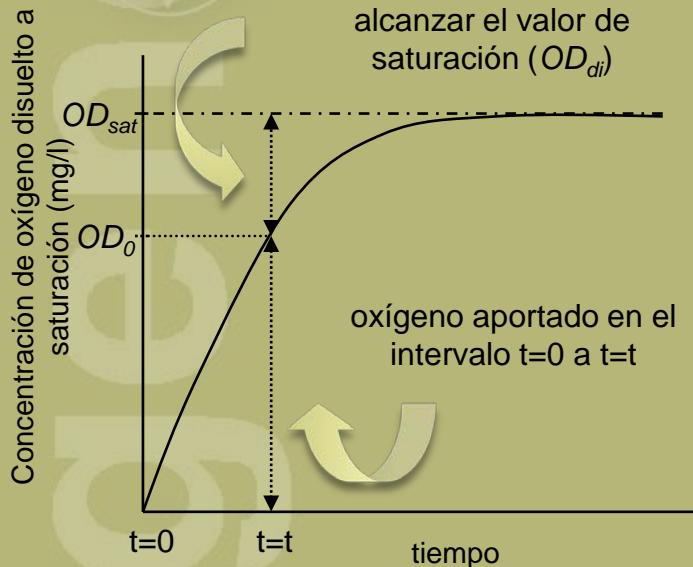
DÉFICIT CRÍTICO DE OXÍGENO

Caudal mínimo (sequía o época de estiaje) – $\uparrow T^a$
 $\rightarrow \downarrow [OD] \rightarrow \uparrow$ actividad microorganismos

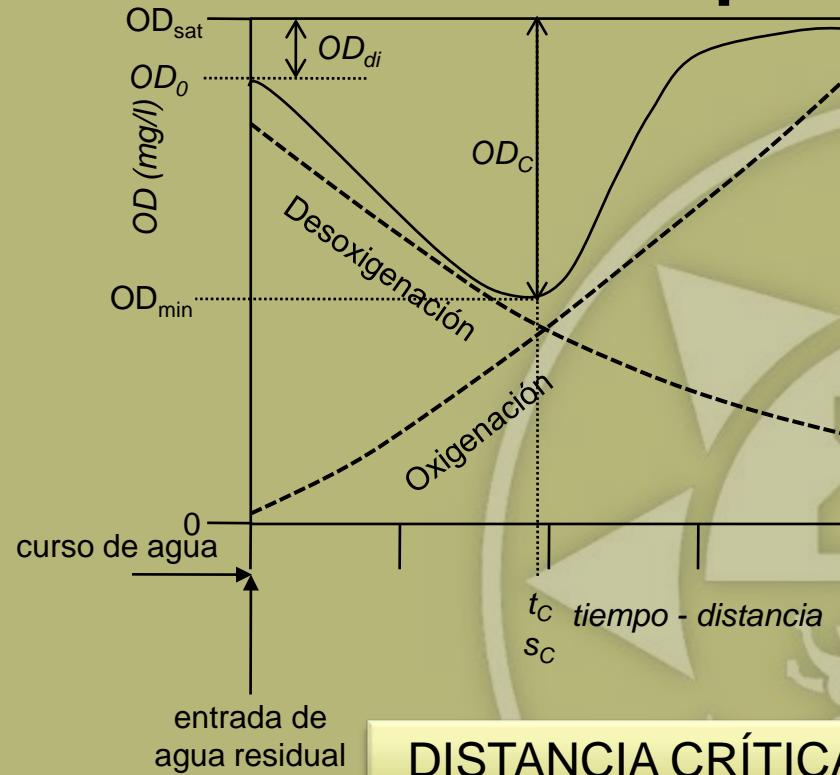
$$f = \frac{K_a}{K_1}$$

$$OD_c = \frac{K_1 \cdot L_a}{K_a} \cdot \left(e^{-K_1 t_c} \right)$$

Modelo



3. Ecuación de Streeter-Phelps



TIEMPO CRÍTICO

$$t_c = \frac{1}{K_a - K_1} \cdot \ln \left[\frac{K_a}{K_1} \left(1 - OD_{di} \frac{K_a - K_1}{K_1 \cdot L_a} \right) \right]$$

Distancia entre punto de vertido y valor mínimo de oxígeno

$$S_c = v_s \cdot t_c$$



4. Parámetros de control. Modelos

CÁLCULO BÁSICO

VIENTO – VELOCIDAD CORRIENTE – PROFUNDIDAD

$$K_a = 0,782 \cdot \sqrt{v} - 0,317 \cdot v + 0,0372 \cdot v^2$$

Banks and Herrera (1977). Effect of wind and rain on surface reaeration. Journal of Environmental Engineering 103: 489-504.

$$K_a = \frac{3,90 \cdot u^{0,5}}{h^{1,5}}$$

O'Connor and Dobbins (1958). Mechanism of reaeration in natural streams. Transactions of the American Society of Civil Engineers Transaction 123: 641-684.

$$K_a = \frac{5,01 \cdot u^{0,969}}{h^{1,673}}$$

Churchill et al. (1962). The prediction of stream reaeration rates. Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers 88: 1-46.

$$K_a = \frac{5,35 \cdot u^{0,67}}{h^{1,85}}$$

Owens et al. (1964). Some reaeration studies in streams. International Journal of Air and Water Pollution 8: 469-486.

$$K_a = - \frac{\ln \frac{OD_{df}}{OD_{di}}}{\Delta t}$$

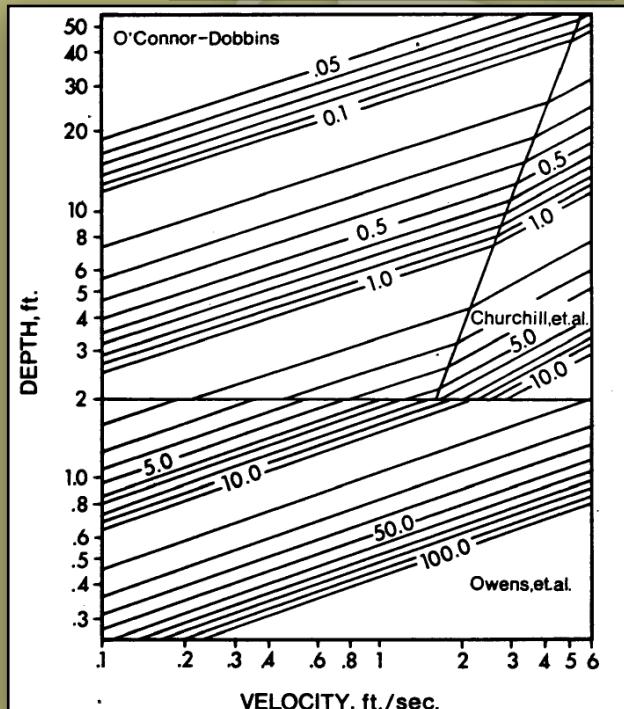


IMAGEN TOMADA DE:

http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/rates_and_constants/Sect3-1.pdf.
03/11/2011



4. Parámetros de control. Modelos

ARRHENIUS

$$K_1^T = K_1^{20} \theta^{(T-20)}$$

$$K_1^{20} \approx 0,1 - 0,5d^{-1} - \theta \approx 1,01(5 - 15^\circ C) - 1,47(15 - 30^\circ C)$$

Tabla ASCE

$$OD_{sat} = 14,652 - 0,41022 \cdot T + 0,0079910 \cdot T^2 - 0,000077774 \cdot T^3$$

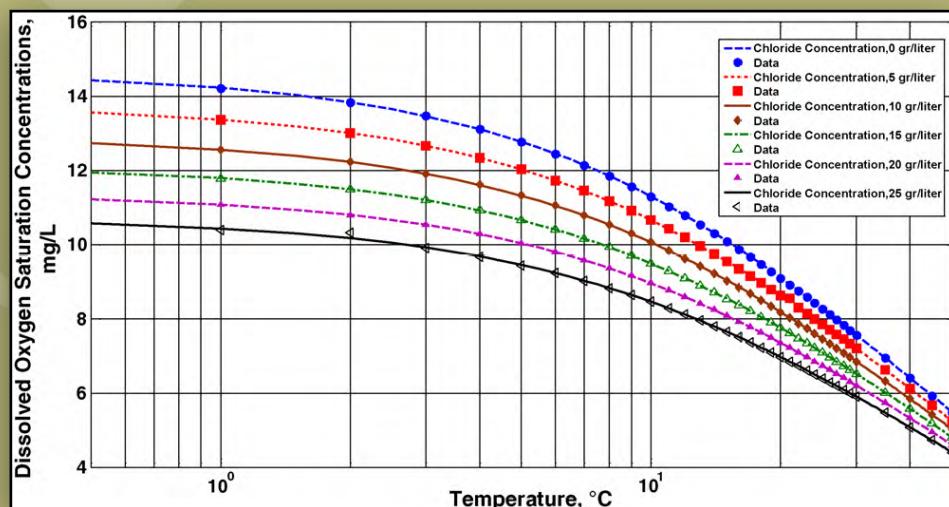


IMAGEN TOMADA DE:
Bahadori and Vuthaluru (2010). Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems.

Process Safety and Environmental Protection 88: 335-340.

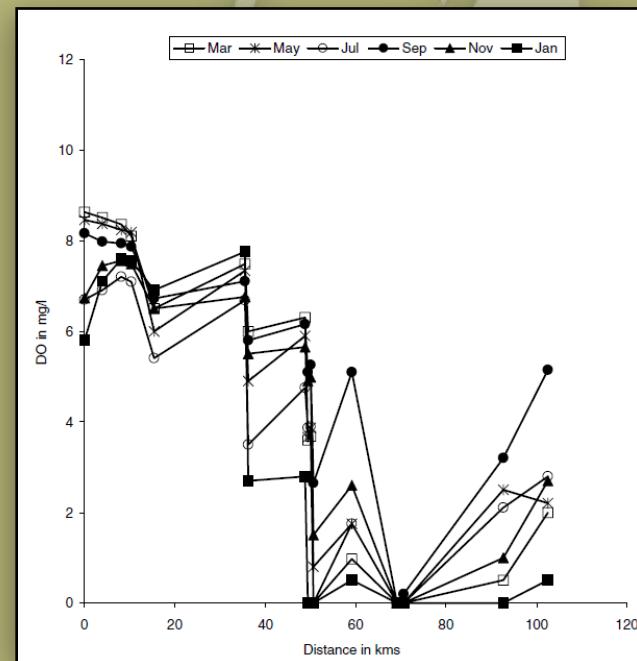


IMAGEN TOMADA DE:
Jha et al. (2001). Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river. Hydrological Processes 15: 1047-1060.

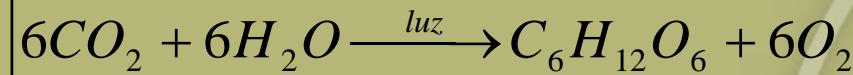


4. Parámetros de control. Modelos

Producción primaria

VELOCIDAD DE LA CORRIENTE

TEMPERATURA



LUZ SOLAR

PROFUNDIDAD

NUTRIENTES

Variación en la producción diaria → Entre 0,5 g/m² y 60 g/m²

Correlacionada con la clorofila "a" → $F = 0,25 Cl'a$

Lake (1)	Mean depth (m) (2)	Maximum depth (m) (3)	Surface area (km ²) (4)	Secchi depth ^a (m) (5)	Chlorophyll a concen- tration ^b (µg/L) (6)	Trophic status (7)
Thrush	6.9	14.6	0.07	7.5	1	Oligotrophic
Cathoun	10	24.0	1.71	2.5	11	Eutrophic

^aMean value in summer.
^bMean value in surface layer during summer.

ESTADO TRÓFICO DE
DOS LAGOS SEGÚN
NIVELES DE CL-A

IMAGEN TOMADA DE:
Fang and Stefan (1995). Interaction between oxygen transfer mechanisms in lake models. *Journal of Environmental Engineering* 121: 447-454.



4. Parámetros de control. Modelos

Consumo de oxígeno

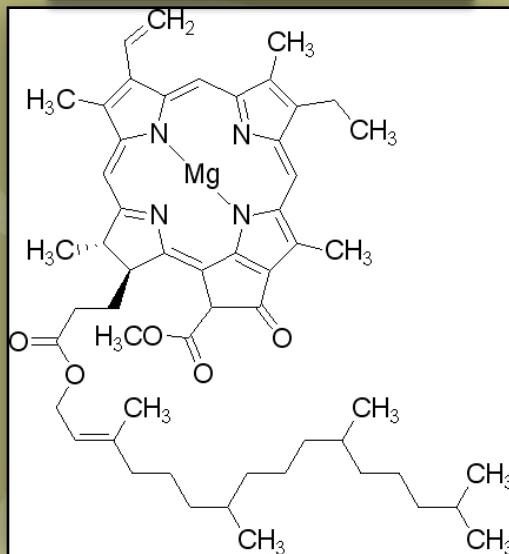
$\text{Cl"}\text{a}'' \sim \text{biomasa fitoplancton}$

ESTIMACIÓN

$$R = 0,1 \text{ Cl"}\text{a}'' \text{ Fitop } 1,08^{\text{T}-20}$$

$$R = 0,0025 \text{ Cl"}\text{a}''$$

CLOROFILA A



<u>Tasa de respiración (g O₂/m²·d)</u>	<u>Lugar</u>	<u>Referencia</u>
4,59	Río Támesis (primavera)	Kowalczewski and Lack (1971)
0,09	Río Támesis (otoño)	Kowalczewski and Lack (1971)
2,02 – 2,30	Río Búfalo (Pennsylvania)	McDiffett <i>et al.</i> (1972)
1,00 – 5,00	Valores para modelización	Jørgensen (1979)
2,00	Valor para modelización	Bonnet and Wessen (2001)
1,50	Valor para modelización	Lopes <i>et al.</i> (2008)

Kowalczewski and Lack (1971). Primary production and respiration of the phytoplankton of the Rivers Thames and Kennet at Reading. *Freshwater Biology* 1: 197-212.

McDiffett *et al.* (1972). An estimate of primary productivity in a Pennsylvania trout stream using a diurnal oxygen curve technique. *The American Midland Naturalist* 87: 564-570.

Jørgensen (1979). *Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters*. Pergamon Press: New York.

Bonnet and Wessen (2001). ELMO, a 3-D water quality model for nutrients and chlorophyll: first application on a lacustrine ecosystem. *Ecological Modelling* 141: 19-33.

Lopes *et al.* (2008). Validation of a water quality model for the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Environmental Modelling & Software* 23: 479-494.

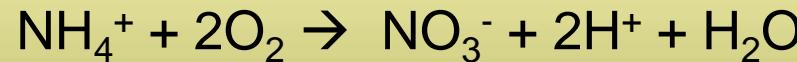
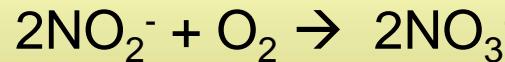
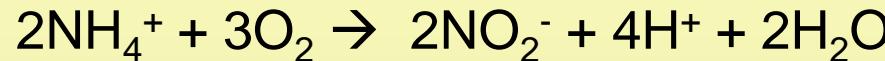


en

el

2O₂: 1N → 4,57 gO : 1 gNNITRIFICACIÓN
TEÓRICA

4. Parámetros de control. Modelos

O₂: 2N → 1,14 gO : 1 gN

$$\begin{aligned} \text{DBON} &= 4,57 (\text{N-org} + \text{N-NH}_3) + 1,14 (\text{N-NO}_2^-) = \\ &= 4,57 \text{ NTK} \end{aligned}$$

STREETER-PHELPS AMPLIADA

$$\frac{dD}{dt} = K_1 \cdot L_t + K_N \cdot L_N - K_a \cdot D$$



4. Parámetros de control. Modelos

MODELOS DE TRANSFERENCIA DE N₂ EN CANAL ABIERTO

Turbulencia bética

$$\frac{\vec{u}}{z} > 0,03 s^{-1}$$

$$K_N \left(\text{min}^{-1} \right) = \frac{K_a (d^{-1})}{24 \cdot 60} \left(\frac{580}{530} \right)^{-\frac{2}{3}}$$

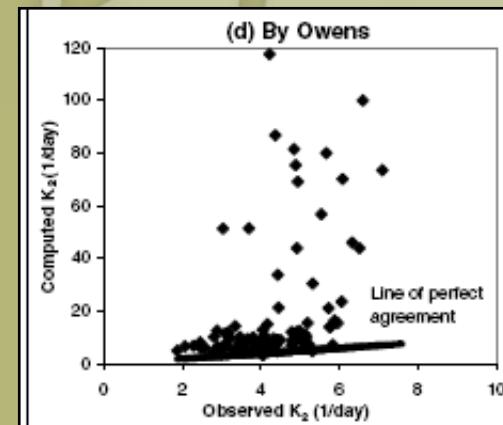
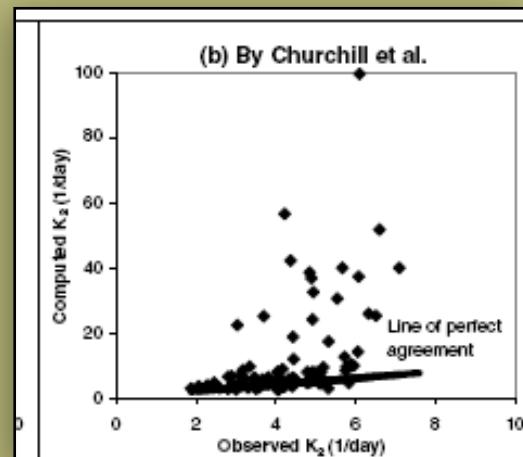
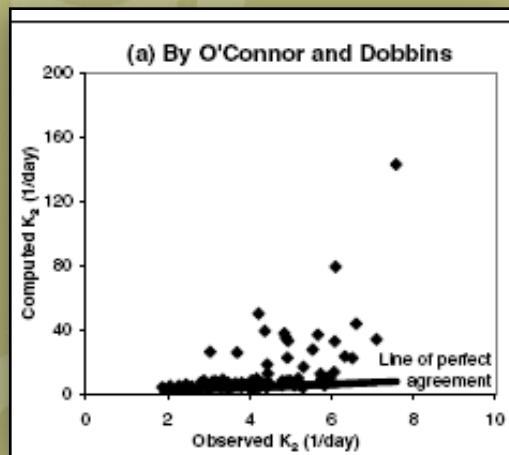
O'Connor & Dobbins (1958)

Churchill *et al.* (1962)

Owens *et al.* (1964)

Modelo de viento

$$\vec{v} > 8 \text{ m / s}$$



IMÁGENES TOMADAS DE:

Jha *et al.* (2001). Refinement of predictive reeration equations for a typical Indian river. *Hydrological Processes* 15: 1047-1060.



4. Parámetros de control. Modelos

CINÉTICA DE ORDEN CERO

$$DOS = \frac{3,28 \cdot G_{DOS} \cdot t}{H}$$

Corrección Arrhenius ($\theta = 1,046$)

G_{DOS}

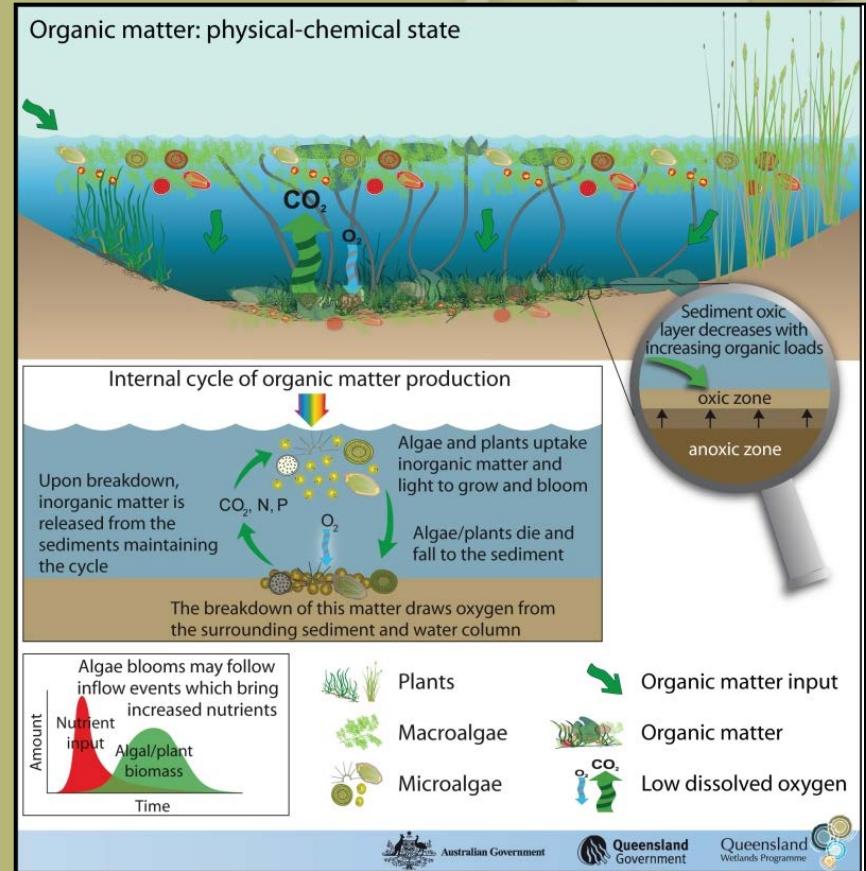
Entre 0,05 – 10 g/m² d

$$\frac{DOS}{DOS_1} = OD^{0,28}$$

Zonas de ↑ invertebrados benthicos

IMAGEN TOMADA DE:
<http://wetlandinfo.derm.qld.gov.au>.
 09/03/2012

Demanda de oxígeno por los sedimentos del cauce, lago, fangos de depuradora, ...





4. Parámetros de control. Modelos

DEPÓSITO DE FANGO ORGÁNICO

$$L_{acum} = \frac{L_{añad}}{K_1} \left(1 - e^{-K_1 t} \right)$$

$$L_{acum} = \frac{L_{añad}}{2,303k_1} \left(1 - 10^{-k_1 t} \right)$$

FORMULACIÓN UNIDIMENSIONAL EN ESTADO NO ESTACIONARIO PARA UN LAGO

$$\frac{\partial OD}{\partial t} = \frac{\partial}{A \partial z} \left(AK_z \frac{\partial OD}{\partial z} \right) + P_{\max} \cdot \min(L) \cdot Cl'' a'' - k_b \theta_b^{T-20} L_t - \frac{k_r \theta_r^{T-20}}{Y_{Cl'' a'' - O_2}} \cdot Cl'' a'' - \frac{DOS}{A} \frac{\partial A}{\partial z}$$

Difusión vertical Fotosíntesis DBO₅ Respiración DOS

Fang and Stefan (1995). Interaction between oxygen transfer mechanisms in lake models. Journal of Environmental Engineering 121: 447-454.

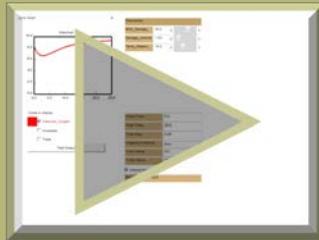


SOME ENGLISH TERMS TO BE FAMILIAR WITH

- ✓ Clorofila → Chlorophyll
- ✓ Curva de déficit de oxígeno → Oxygen sag curve
- ✓ DBO última → Ultimate BOD
- ✓ Demanda bioquímica de oxígeno → Biochemical oxygen demand (BOD)
- ✓ Demanda de oxígeno por sedimentos → Sediment oxygen demand (SOD)
- ✓ Demanda química de oxígeno → Chemical oxygen demand (COD)
- ✓ Fotosíntesis → Photosynthesis
- ✓ Fuente de oxígeno → Oxygen source
- ✓ Oxígeno disuelto → Dissolved oxygen
- ✓ Producción primaria → Primary production
- ✓ Sumidero de oxígeno → Oxygen sink
- ✓ Turbulencia del bentos → Benthic turbulence

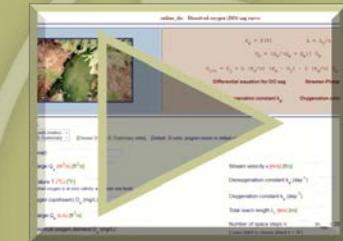
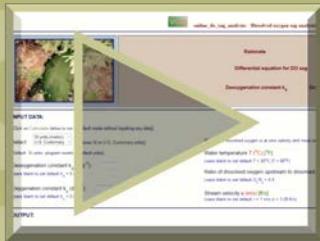


ACTIVIDADES ON LINE



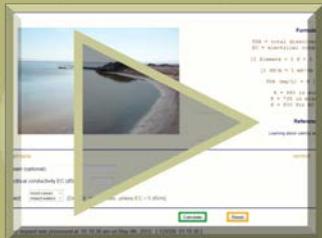
CSERD: MODELO DE OXÍGENO DISUELTO

CÁLCULO DE LA CURVA DE DÉFICIT DE OXÍGENO



ANÁLISIS DE LA CURVA DE DÉFICIT DE OXÍGENO

CÁLCULO DE LA CONSTANTE DE REAIREACIÓN



CÁLCULO DE LOS SD_T EN FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD



One step beyond!

WATER QUALITY
EXAMPLE FOR CIVIL
ENGINEERS

QUAL2K MODEL

SEDIMENTS IN
STREAMS I

RESTORING THE
DANUBE RIVER

SEDIMENTS IN
STREAMS II

SEDIMENTS IN
STREAMS III



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bahadori, A., Vuthaluru, H.B. (2010). Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems. *Process Safety and Environmental Protection* 88: 335-340.
- Banks, R.B., Herrera, F.F. (1977). Effect of wind and rain on surface reaeration. *Journal of Environmental Engineering* 103: 489-504.
- Bonnet, M.P., Wessen, K. (2001). ELMO, a 3-D water quality model for nutrients and chlorophyll: first application on a lacustrine ecosystem. *Ecological Modelling* 141: 19-33.
- Churchill, M.A., Elmore, H.L., Buckingham, R.A. (1962). The prediction of stream reaeration rates. *Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers* 88: 1-46.
- Fang, X., Stefan, H.G. (1995). Interaction between oxygen transfer mechanisms in lake models. *Journal of Environmental Engineering* 121: 447-454.
- Jha, R., Ojha, C.S.P., Bhatia, K.K.S. (2001). Refinement of predictive reaeration equations for a typical Indian river. *Hydrological Processes* 15: 1047-1060.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Jørgensen, S.E. (1979). *Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters*. Pergamon Press: New York.
- Kowalczewski, A., Lack, T.J. (1971). Primary production and respiration of the phytoplankton of the Rivers Thames and Kennet at Reading. *Freshwater Biology* 1: 197-212.
- Lopes, J.F., Silva, C.I., Cardoso, A.C. (2008). Validation of a water quality model for the Ria de Aveiro lagoon, Portugal. *Environmental Modelling & Software* 23: 479-494.
- McDiffett, W.F., Carr, A.E., Young, D.L. (1972). An estimate of primary productivity in a Pennsylvania trout stream using a diurnal oxygen curve technique. *The American Midland Naturalist* 87: 564-570.
- O'Connor, D.J., Dobbins, W.E. (1958). Mechanism of reaeration in natural streams. *Transaction of the American Society of Civil Engineers* 123: 641-684.
- Owens, M., Edwards, R.W., Gibbs, J.W. (1964). Some reaeration studies in streams. *International Journal of Air and Water Pollution* 8:469-486.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Streeter, H.W., Phelps, E.B. (1925). *A Study of Pollution and Natural Purification of the Ohio River. III. Factors Concerned in the Phenomena of Oxidation and Reaeration.* (Reprinted by U.S. Department of Health, Education, & Welfare. Vol 146. 1958. Public Health Bulletin).

