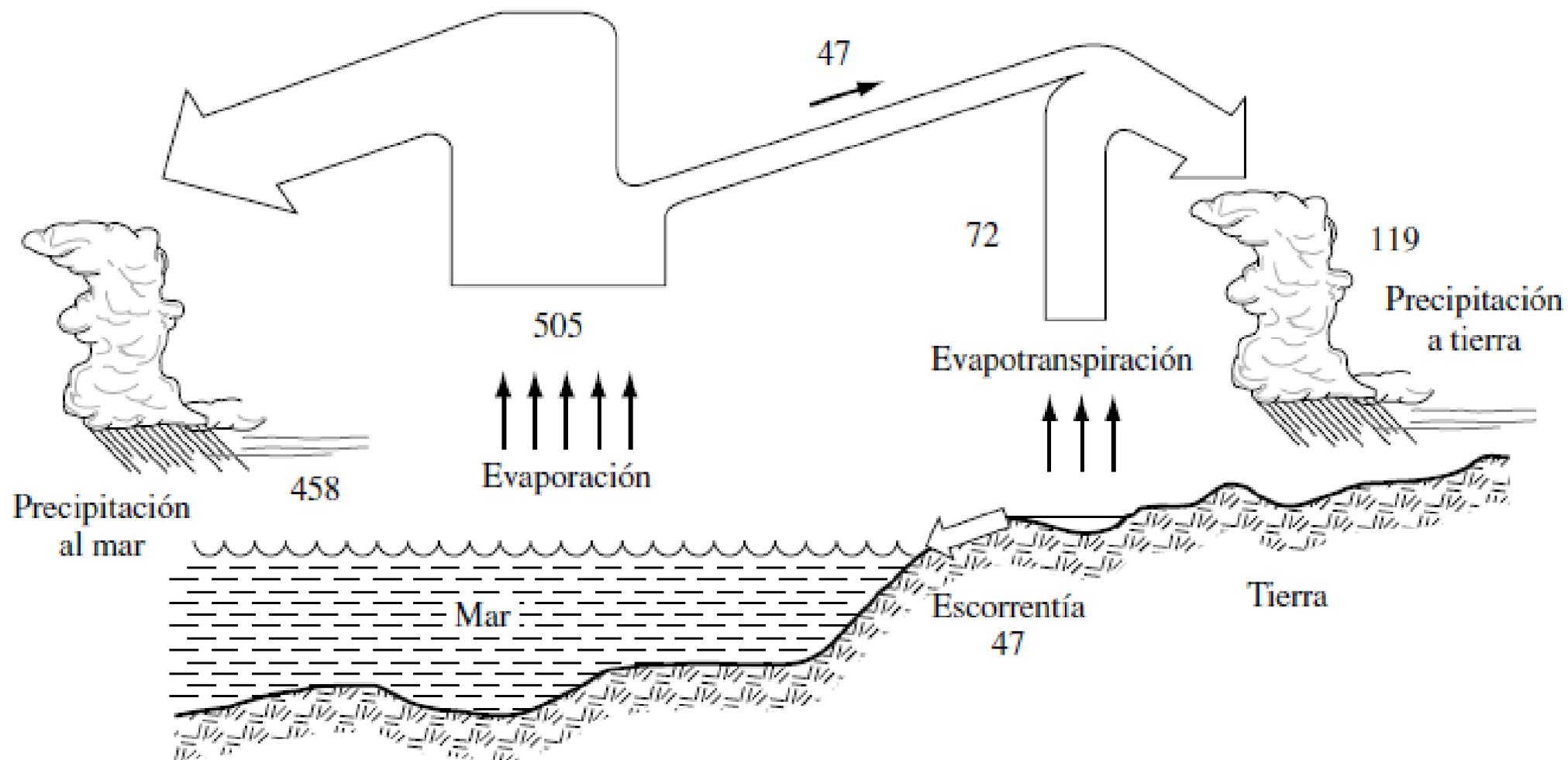


# INGENIERÍA AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS



**FIGURA 5.3.** El ciclo hidrológico. Las unidades son  $10^3 \text{ km}^3/\text{año}$ .  
 (Fuente: basado en Shiklomanov, 1993).

**TABLA 5.1. Reservas de agua en la tierra**

Localización	Cantidad ( $10^6 \text{ km}^3$ )	Porcentaje de la reserva mundial
Océanos	1.338	96,5
Glaciares y nieves perpetuas	24,1	1,74
Aguas subterráneas	23,4	1,7
Hielo subterráneo/ <i>permafrost</i>	0,30	0,022
Lagos de agua dulce	0,091	0,007
Lagos salados	0,085	0,006
Aguas pantanosas	0,011	0,008
Atmósfera	0,013	0,001
Media en canales	0,002	0,0002
Agua en biomasa viva	0,001	0,0001

*Fuente:* Shiklomanov, 1993.

¿Cómo cuantificar “globalmente” la contaminación orgánica?

Toda materia orgánica es pasible de ser oxidada a  $\text{CO}_2$  y por lo tanto se puede usar la cantidad de oxígeno usada en la oxidación como “equivalente” de la cantidad de materia orgánica.

Si se conoce la fórmula química se puede calcular la demanda de oxígeno a partir de la estequiometría:

**Demanda Teórica de Oxígeno:** Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar totalmente a  $\text{CO}_2$  la materia orgánica.

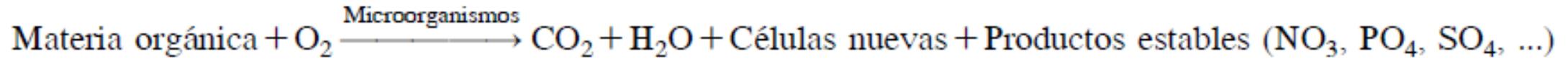
- Calcular la DTO de la glucosa ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ )

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica con un oxidante fuerte.

- Se oxida la materia orgánica con dicromato de potasio en medio ácido y a alta temperatura. El  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{=}$  (de color amarillo en solución) se reduce a  $\text{Cr}^{3+}$  de color verde en solución y puede medirse la absorción en la longitud de onda correspondiente.



# DBO: Tradicionalmente se ha usado un ensayo para determinar el consumo de O<sub>2</sub> por parte de los microorganismos: Demanda Biológica de Oxígeno



$$\text{DBO}_5 = \frac{\text{OD}_i - \text{OD}_f}{P}$$

donde

OD<sub>i</sub> = El oxígeno disuelto (OD) inicial del agua residual diluida.

OD<sub>f</sub> = El oxígeno disuelto (OD) final, cinco días después, del agua residual diluida

$P = \text{La fracción de disolución} = \frac{\text{volumen de agua residual}}{\text{volumen de agua residual} + \text{agua de disolución}}$

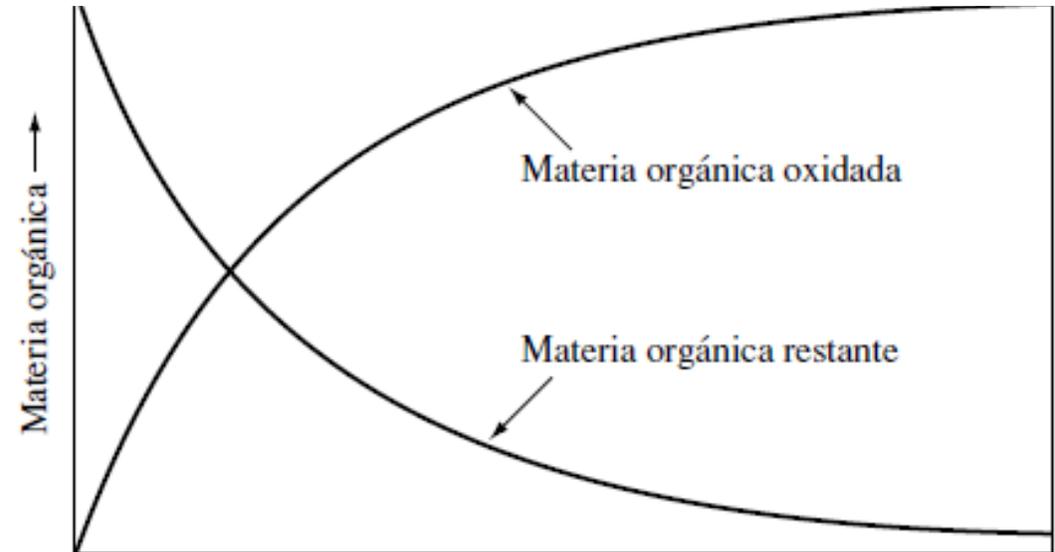
$$\frac{dL_t}{dt} = -kL_t$$

$$L_t = L_0 e^{-kt}$$

$$\text{DBO}_t = L_0(1 - e^{-kt})$$

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

$\theta$  = temperature coefficient. For typical domestic wastewater, this has a value of 1.135 for temperatures between 4 and 20°C and 1.056 for temperatures between 20 and 30°C. (Schroepfer, Robins, and Susag, 1964)



**TABLA 5.8. Valores típicos de la constante de velocidad de DBO a 20 °C**

Muestra	$k$ (día <sup>-1</sup> ) <sup>(a)</sup>	$K$ (día <sup>-1</sup> ) <sup>(b)</sup>
Agua residual sin tratar	0,35-0,70	0,15-0,30
Agua residual tratada	0,12-0,23	0,05-0,10
Agua fluvial contaminada	0,12-0,23	0,05-0,10

<sup>(a)</sup>  $k$  minúscula: velocidad de reacción en base  $e$ .

<sup>(b)</sup>  $K$  mayúscula: velocidad de reacción en base 10.

Fuente: Davis y Cornwell, 1991.

The gold standard for over  
**100 years**

# Standard Methods

for the Examination of  
Water and Wastewater™

23RD EDITION

Edited by

Rodger B. Baird

Andrew D. Eaton

Eugene W. Rice

American Public Health Association®

American Water Works Association®

Water Environment Federation®

## Part 5000 AGGREGATE ORGANIC CONSTITUENTS

5010	INTRODUCTION . . . . .	5-1
	A. General Discussion . . . . .	5-1
	B. Sample Collection and Preservation . . . . .	5-1
5020	QUALITY ASSURANCE/QUALITY CONTROL . . . . .	5-1
	A. Introduction . . . . .	5-1
	B. Quality Control Practices . . . . .	5-2
5210	BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND (BOD) . . . . .	5-5
	A. Introduction . . . . .	5-5
	B. 5-Day BOD Test . . . . .	5-6
	C. Ultimate BOD Test . . . . .	5-11
	D. Respirometric Method . . . . .	5-14
5220	CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD) . . . . .	5-17
	A. Introduction . . . . .	5-17
	B. Open Reflux Method . . . . .	5-18
	C. Closed Reflux, Titrimetric Method . . . . .	5-20
	D. Closed Reflux, Colorimetric Method . . . . .	5-21
5310	TOTAL ORGANIC CARBON (TOC) . . . . .	5-23
	A. Introduction . . . . .	5-23
	B. High Temperature Combustion Method . . . . .	5-26



### 5210 B. 5-Day BOD Test

#### 1. General Discussion

The BOD test is an indirect measurement of organic matter; it measures the change in DO concentration caused by microorganisms as they degrade organic matter in a sample held in a stoppered bottle incubated for 5 d in the dark at 20°C. Analysts measure DO before and after incubation, and compute BOD using the difference between DO measurements. Because initial DO is determined shortly after dilution, all

oxygen uptake occurring after this measurement is included in the BOD measurement.

For sampling and storage procedures, see 5210B.4a.

#### 2. Apparatus

*a. Incubation bottles:* Use 60-mL glass bottles or larger (300-mL bottles with a flared mouth and ground-glass stopper are preferred). Clean bottles with a detergent, rinse thoroughly,

and drain before use. Alternatively, use disposable plastic BOD bottles that are capable of meeting all method quality-control (QC) checks.

*b. Air incubator or water bath,* thermostatically controlled at  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Exclude all light to prevent the possibility of photosynthetic production of DO.

*c. Oxygen-sensitive membrane electrode,* polarographic or galvanic, or *oxygen-sensitive optical probe* with appropriate meter.

#### 3. Reagents

Discard reagents if there is any sign of precipitation or biological growth in the stock bottles. Commercial equivalents of these reagents are acceptable, and different stock concentrations

dence of contamination is indicated (e.g., growth occurs in the stock bottle or GGA test results are consistently low).

*i. Ammonium chloride solution:* Dissolve 1.15 g  $\text{NH}_4\text{Cl}$  in about 500 mL reagent-grade water, adjust pH to 7.2 with NaOH solution, and dilute to 1 L. Solution contains 0.3 mg N/mL.

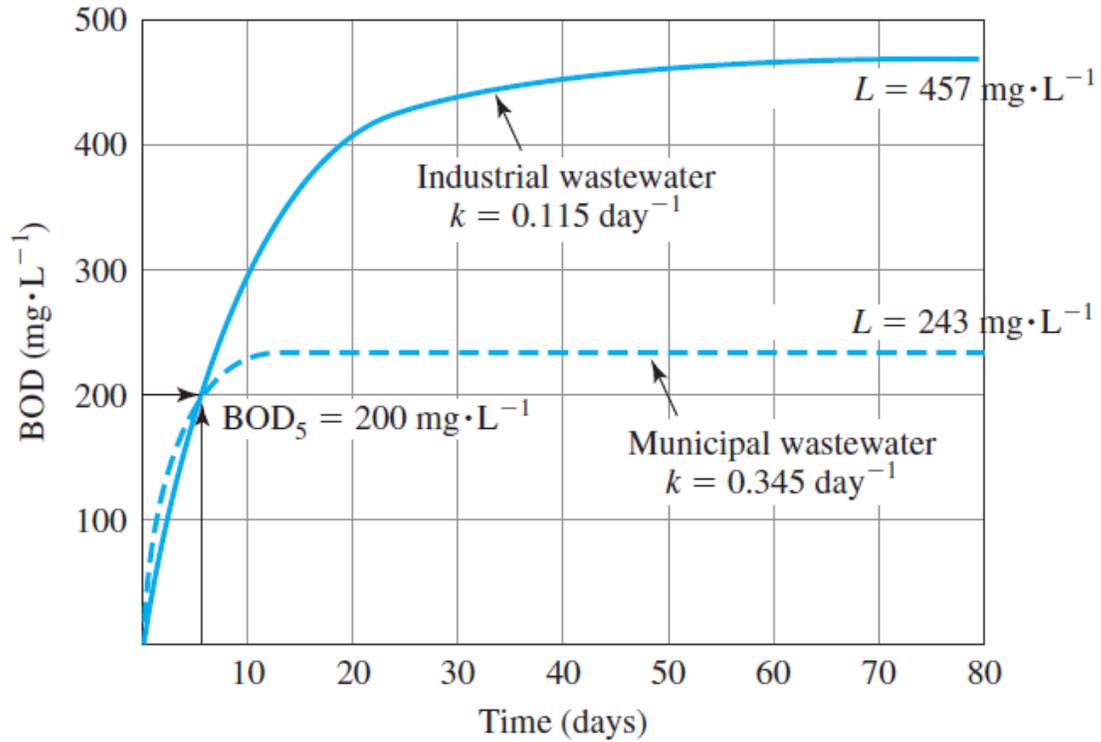
*j. Source water for preparing BOD dilution water:* Use demineralized, distilled, or equivalent reagent-grade water, tap, or natural water to make sample dilutions (see 5210B.4c).

#### 4. Preparatory Procedures

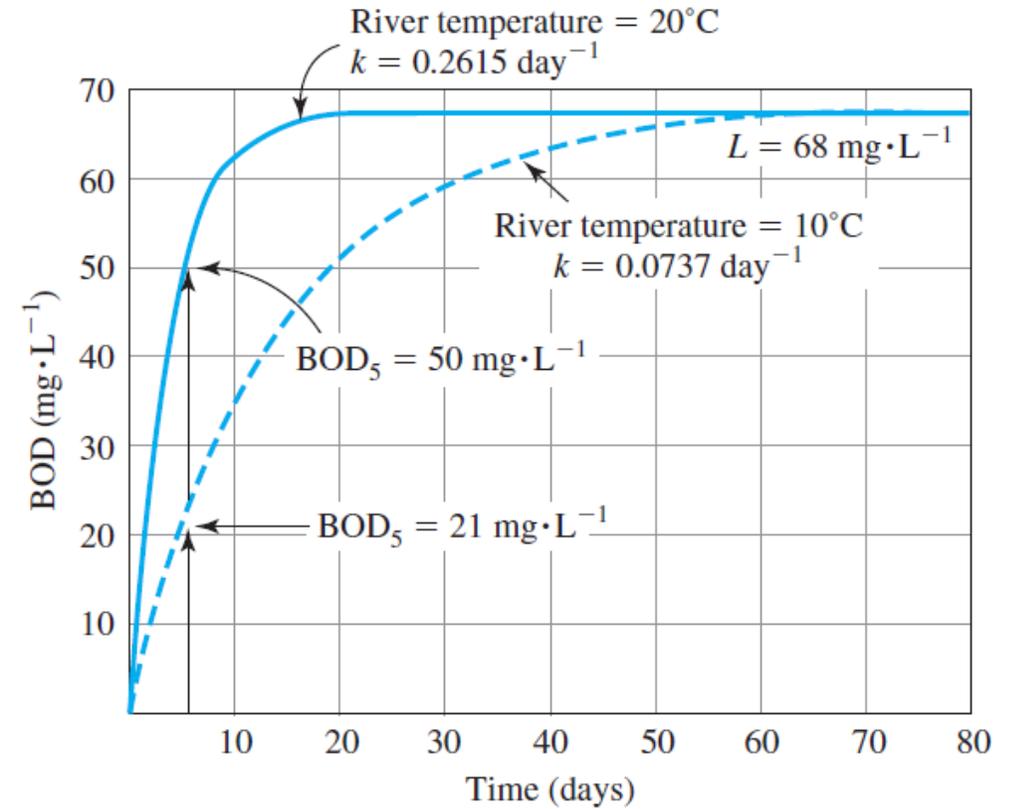
*a. Sampling and storage:* Samples for BOD analysis may degrade significantly during storage between collection and analysis, resulting in low BOD values.

1) Grab samples—If analysis begins within 2 h of collection,

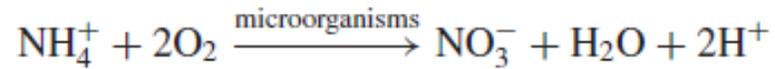
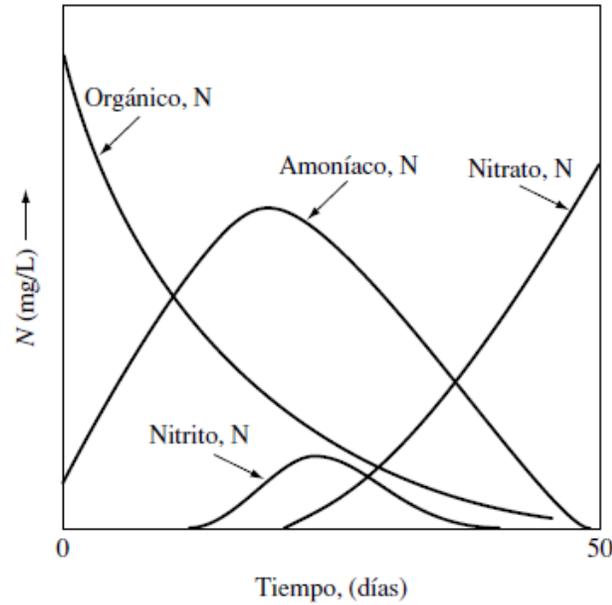
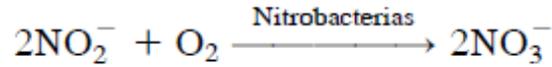
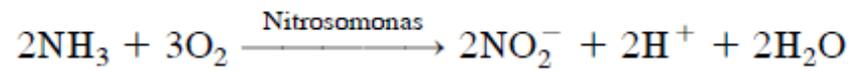
The effect of  $k$  on ultimate BOD for two wastewaters having the same  $BOD_5$ .



The effect of  $k$  on  $BOD_5$  when the ultimate BOD is constant.



Se colocan 15 mL de una muestra de aguas residuales en una botella estándar de 300 mL DBO, y se llena la botella con agua de dilución. Se mide una concentración de oxígeno disuelto inicial de 8 mg/L y una concentración de oxígeno disuelto final a los 5 días de 2 mg/L. Una botella llena solo con agua de dilución que se prueba en paralelo no muestra ningún cambio en el oxígeno disuelto durante el periodo de incubación de 5 días. El coeficiente de velocidad de reacción del agua residual es  $0.4 \text{ d}^{-1}$ . Calcule la  $\text{DBO}_5$  y la DBO final ( $L_0$ ) del agua residual.



$$\text{NBOD} = \frac{\text{grams of oxygen used}}{\text{grams of nitrogen oxidized}} = \frac{(2 \text{ moles})(32 \text{ g O}_2 \cdot \text{mol}^{-1})}{(1 \text{ mole})(14 \text{ g N} \cdot \text{mol}^{-1})}$$

$$= 4.57 \text{ g O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ N}$$

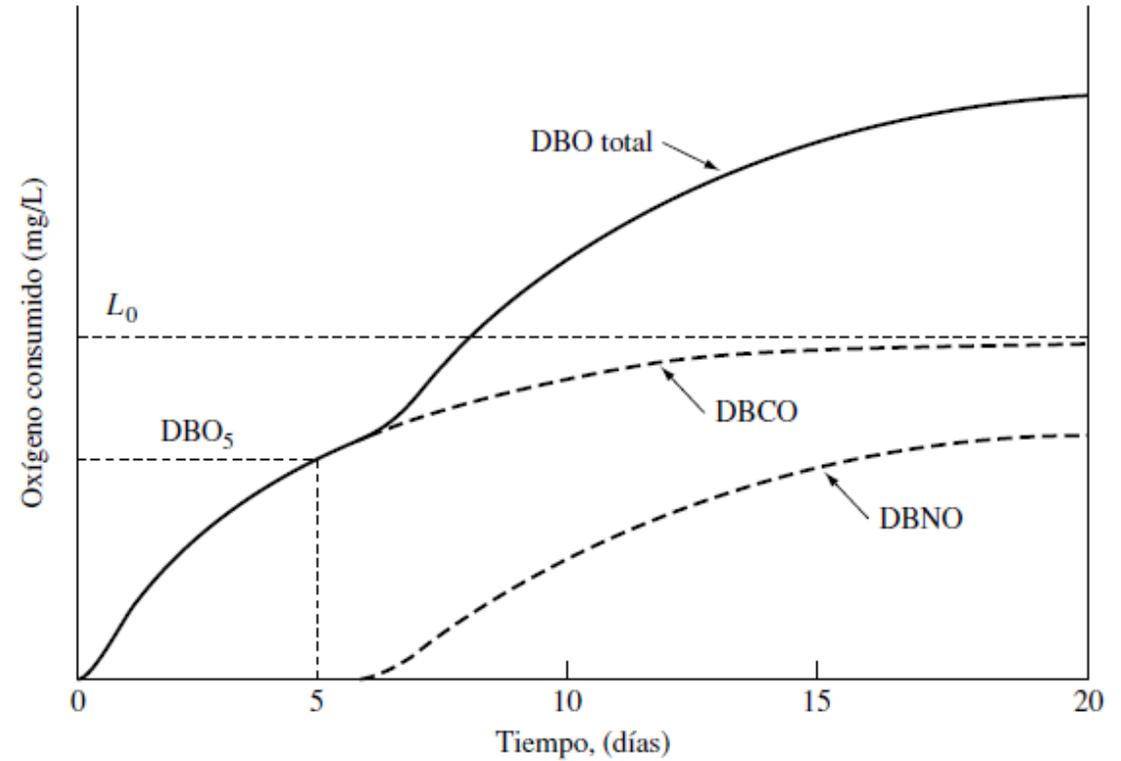


FIGURA 5.12 Demanda bioquímica carbonosa y nitrosa de oxígeno. La DBO total es la suma

Calcular la demanda de oxígeno correspondiente a N de una muestra que tiene 30 mgNH<sub>3</sub>-N/L

Calcular la demanda de oxígeno correspondiente a N de una muestra que tiene 30 mgNH<sub>3</sub>/L

# Impacto de las descargas en el oxígeno disuelto de los cursos de agua

Déficit de Oxígeno:  $D = OD_{sat} - OD$

**TABLA 5.10. Solubilidad del oxígeno en agua (mg/L) a 1 atm de presión**

Temperatura (°C)	Concentración de cloruro en agua (mg/L)			
	0	5.000	10.000	15.000
0	14,62	13,73	12,89	12,10
5	12,77	12,02	11,32	10,66
10	11,29	10,66	10,06	9,49
15	10,08	9,54	9,03	8,54
20	9,09	8,62	8,17	7,75
25	8,26	7,85	7,46	7,08
30	7,56	7,19	6,85	6,51

*Fuente: Thomann y Mueller, 1987.*

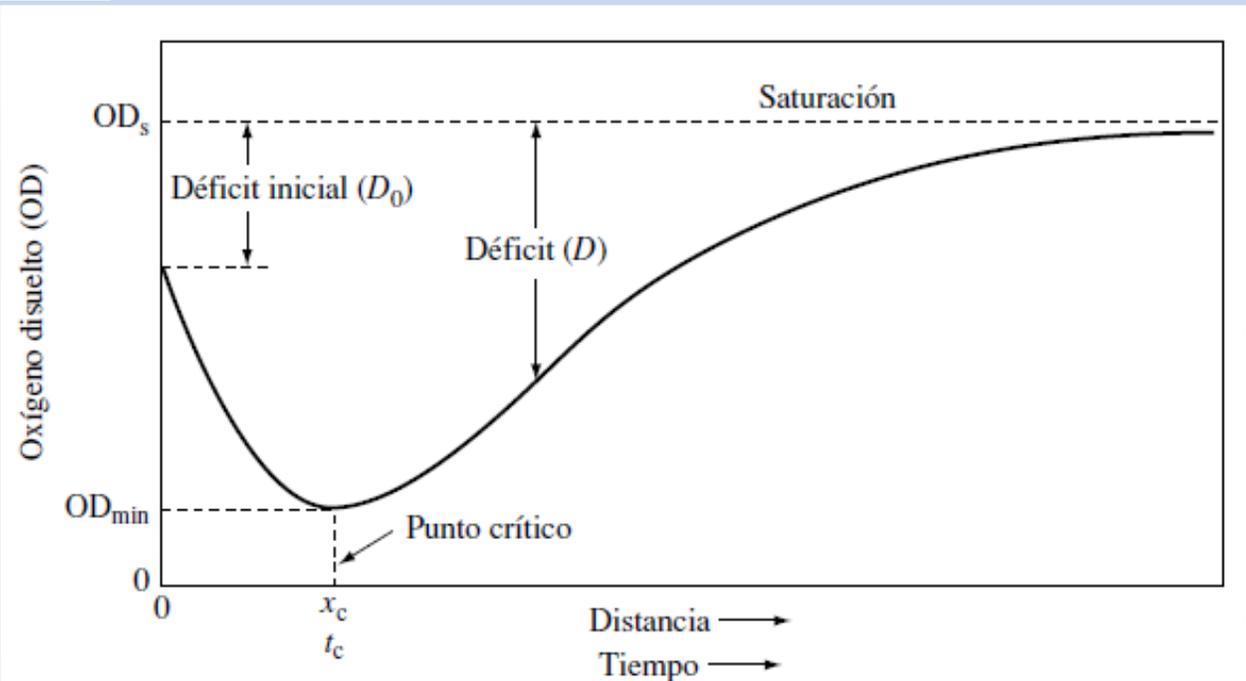
Tasa de incremento del déficit = Tasa de desoxigenación – Tasa de aireación

$$\frac{dD}{dt} = k_d L_0 e^{-k_d t} - k_r D$$

$$D = \frac{k_d L_0}{k_r - k_d} (e^{-k_d t} - e^{-k_r t}) + D_0 e^{-k_r t}$$

$$OD = OD_s - \left[ \frac{k_d L_0}{k_r - k_d} (e^{-k_d t} - e^{-k_r t}) + D_0 e^{-k_r t} \right]$$

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_d} \ln \left\{ \frac{k_r}{k_d} \left[ 1 - \frac{D_0 (k_r - k_d)}{k_d L_0} \right] \right\}$$



**FIGURA 5.15.** La curva en comba del oxígeno de Streeter-Phelps.

Un pueblo descarga en un río  $17360 \text{ m}^3/\text{d}$  de agua residual tratada. El agua residual tiene una  $\text{DBO}_5 = 12 \text{ mg/L}$  con una  $k = 0,12 \text{ d}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ . El río tiene un caudal de  $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$  y una  $\text{DBO}_u = 5,0 \text{ mg/L}$ . El  $\text{OD}_{\text{río}} = 6,5 \text{ mg/L}$  y el del agua residual  $1,0 \text{ mg/L}$ . Calcular el OD y la DBO última después de la mezcla.

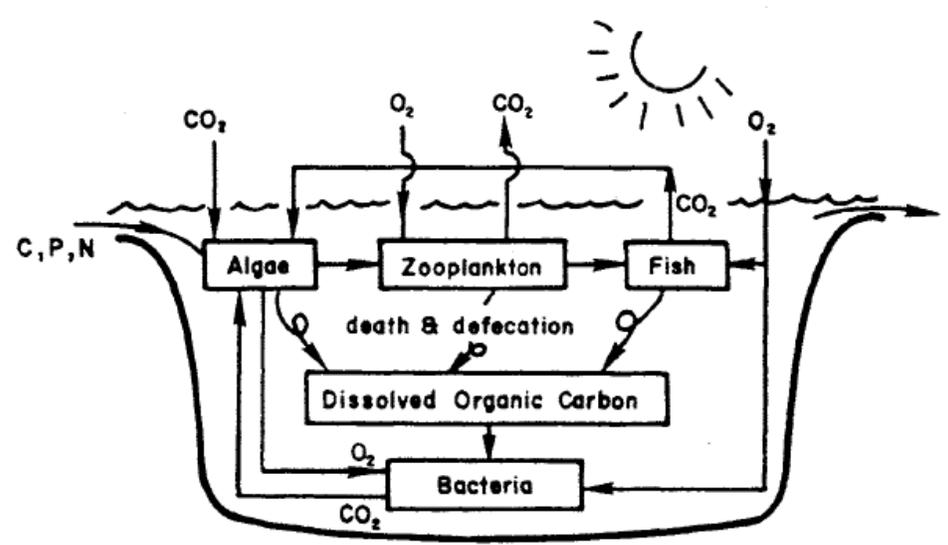
Una ciudad de 200 000 habitantes descarga  $1,05 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua residual con  $\text{DBO}_u = 28,0 \text{ mg/L}$  y  $\text{OD} = 1,8 \text{ mg/L}$  en un río. Aguas arriba de la ciudad el río tiene un caudal de  $7,08 \text{ m}^3/\text{s}$  y una velocidad de  $0,37 \text{ m/s}$ , siendo su  $\text{DBO}_u = 3,6 \text{ mg/L}$  y  $\text{OD} = 7,6 \text{ mg/L}$ . A la temperatura del río  $\text{OD}_{\text{sat}} = 8,5 \text{ mg/L}$ , el coeficiente de desoxigenación es  $k_d = 0,61 \text{ d}^{-1}$  y el coeficiente de reaireación es  $k_r = 0,76 \text{ d}^{-1}$ . Puede asumirse una mezcla completa y que se mantiene la velocidad del río.

- 1) Calcular el déficit de oxígeno y la  $\text{DBO}_u$  enseguida de la mezcla.
- 2) Calcular el OD a 16 km corriente abajo.
- 3) Calcular el tiempo crítico, la distancia crítica, el déficit crítico y el OD mínimo,

**Eutrofización:** Todos los lagos acumulan gradualmente limo y materia orgánica que están sometidos a un proceso de maduración conocido como *eutrofización*.

Un lago joven se caracteriza por un contenido bajo en nutrientes y escasa población de plantas. Tales lagos *oligotróficos* («poco alimento») adquieren gradualmente nutrientes de sus cuencas, lo que los posibilita para aumentar la variedad de vida en sus aguas.

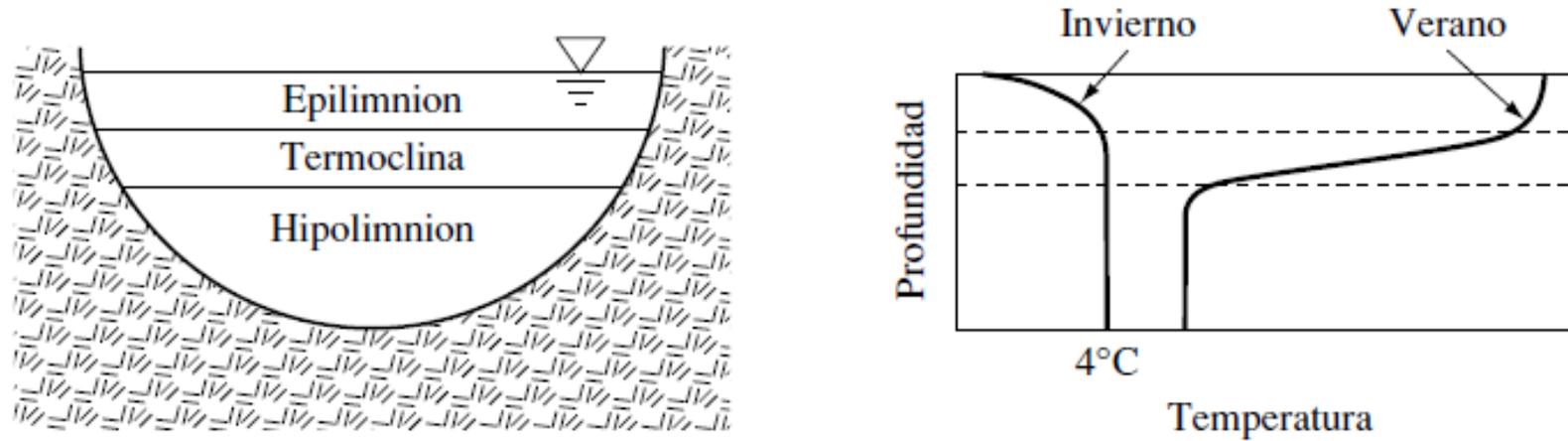
Con el paso del tiempo, el aumento de productividad biológica causa que el agua se enturbie de fitoplancton, mientras que la descomposición de la materia orgánica contribuye al consumo del oxígeno disuelto disponible. El lago se vuelve *eutrófico* («bien alimentado»). Cuando los sedimentos y detritus depositados hacen que el lago se vuelva más somero y cálido, sus orillas se van poblando con más plantas y el lago lentamente se convierte en un pantano o ciénaga.



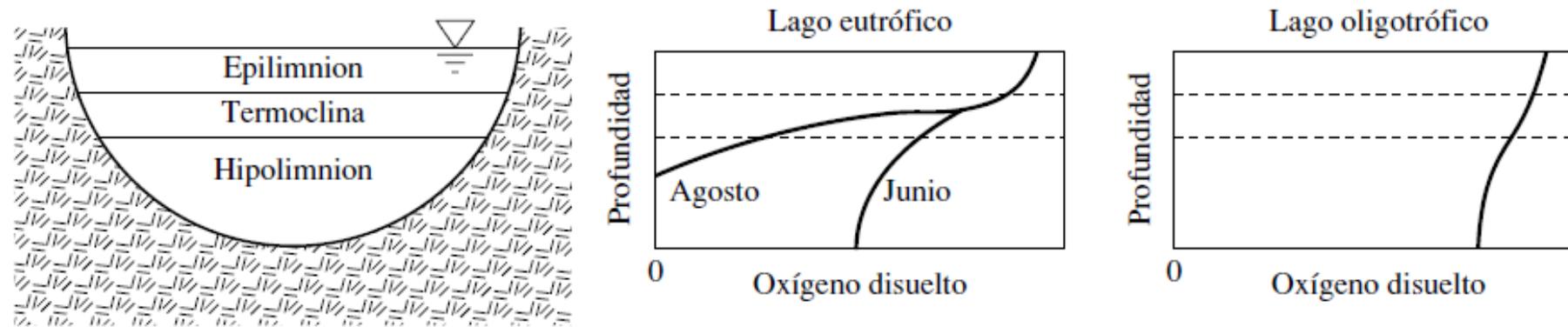
## Clasificación de cuerpos de agua basada en sus estados tróficos

Oligotrófico	Pobres de nutrientes; bajos niveles de algas, macrófitos y materia orgánica; buena transparencia; oxígeno abundante.
Eutrófico	Rico en nutrientes; altos niveles de algas, macrófitos y materia orgánica; pobre transparencia; con frecuencia con agotamiento de oxígeno en el hipolimnion.
Mesotrófico	Zona intermedia; con frecuencia con abundante vida de peces debido a sus elevados niveles de producción de materia orgánica y provisión adecuada de oxígeno.

# Lagos: estratificación de temperatura y del oxígeno disuelto



**FIGURA 5.21.** Estratificación térmica de un lago, mostrando los perfiles estival e invernal.



**FIGURA 5.22.** Curvas de oxígeno disuelto para lagos oligotróficos y eutróficos durante la estratificación térmica estival.

*Eutrofización antropogénica.* Los colectores municipales de desagües, los residuos industriales y las escorrentías cargadas de fertilizantes agrícolas añaden nutrientes que estimulan el crecimiento de las algas y degradan la calidad del agua.

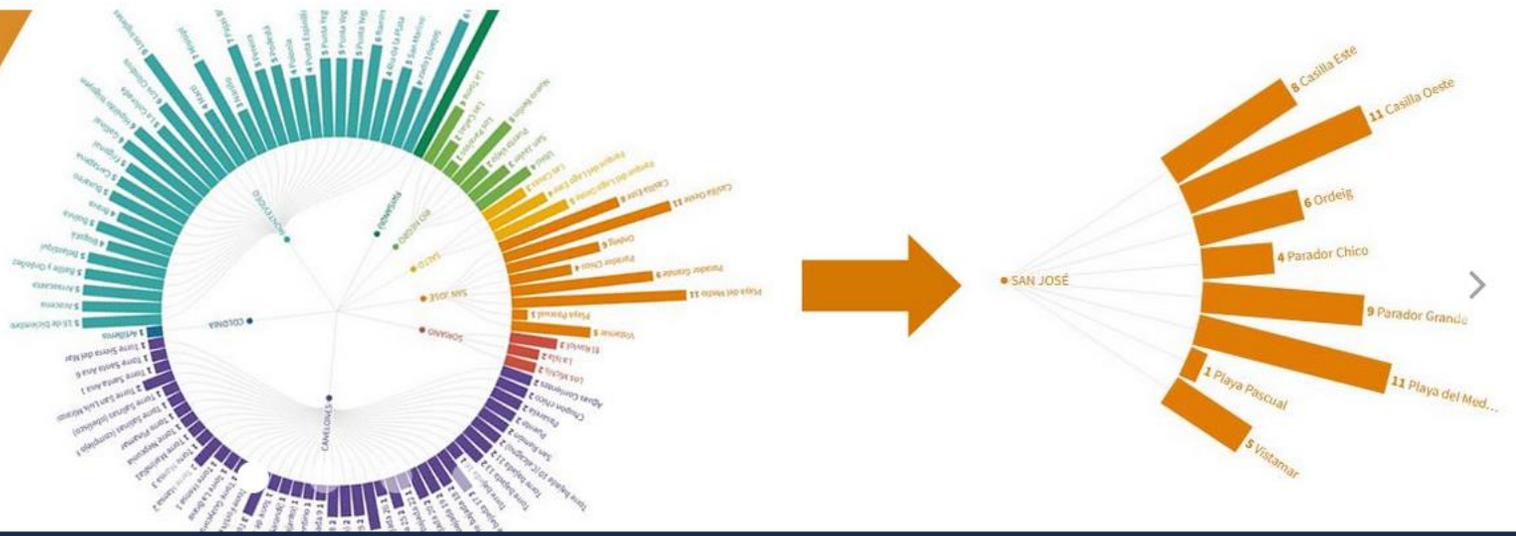
La velocidad de proliferación de las algas depende de muchos factores, entre los que se incluyen la disponibilidad de luz solar para las reacciones fotosintéticas y la concentración de nutrientes necesaria para su crecimiento.

Los nutrientes N y P (sobre todo este último) son los factores limitantes principales.

Como una primera aproximación, para producir una masa de algas dada se necesita alrededor de 7 veces más nitrógeno que fósforo. Concentraciones de fósforo de más de 0,015 mg/L y de nitrógeno, por encima de 0,3 mg/L, son suficientes para causar la proliferación de algas.

# DATOS ABIERTOS

Datos propios y de otras instituciones vinculadas a la gestión ambiental.



## Monitoreo y contralor del ambiente 2021-2022

Por técnicos del Ministerio de Ambiente y otros del ambiente público y privado