

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA  
Y CIENCIAS DEL AMBIENTE  
(CEPIS)

**METODOLOGÍAS SIMPLIFICADAS PARA LA EVALUACIÓN DE EUTROFICACION  
EN LAGOS CÁLIDOS TROPICALES**

Programa Regional CEPIS/HPE/OPS  
1981-1990

Versión actualizada, enero 2001

Ing. Henry J. Salas  
Asesor en Evaluación de Impacto Ambiental y Salud  
CEPIS

Paloma Martino  
Oficial Profesional Asociado del CEPIS (1988-90)

Organización Panamericana de la Salud (OPS) - División de Salud y Ambiente  
Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud (OMS)

## ÍNDICE

	<u>Página</u>
Resumen.....	1
1. Introducción.....	1
2. Base de datos del proyecto.....	2
3. Concepto de nutriente limitante.....	7
4. Sistema de clasificación trófica.....	7
5. Desarrollo de los modelos matemáticos simplificados.....	16
5.1 Desarrollo histórico.....	16
5.2 Modelos de fósforo total.....	21
5.3 Verificación del modelo de fósforo total.....	27
5.4 Modelo preliminar de clorofila "a".....	27
5.5 Modelo preliminar de nitrógeno total.....	29
5.6 Consideraciones sobre las restricciones de los modelos.....	33
6. Otras variables de calidad de agua para evaluar la eutroficación.....	34
6.1 Macrofitos.....	34
6.2 Trihalometanos.....	35
7. Formulación de políticas de control.....	36
8. Conclusiones y recomendaciones.....	38
9. Agradecimientos.....	39
10. Referencias .....	39

## ANEXOS

Anexo I	Ábaco de estimación de fósforo total ( $P_T$ ) y clorofila "a" (Cl <sub>a</sub> ).....	43
Anexo II	Programa Lagos Cálidos Tropicales (LACAT).....	45
Anexo III	Determinación aporte de nutrientes.....	47
Anexo IV	A. Metodologías para calcular la tasa de agotamiento de oxígeno hipolimnético.....	55
	B. Metodología simple para el cálculo de biomasa de la vegetación acuática en el campo.....	56
Anexo V	Simbología.....	58

## TABLAS

Tabla 1	Estado de los datos para el modelo de fósforo total.....	2
Tabla 2	Información mínima requerida para el proyecto regional del CEPIS de eutroficación en lagos cálidos tropicales.....	5
Tabla 3	Coefficientes de exportación.....	6
Tabla 4	Proyecto regional de evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales parámetros básicos para los modelos simplificados.....	8
Tabla 5	Datos usados en el desarrollo del modelo, rango y promedios.....	10
Tabla 6	Clasificación tentativa de estado trófico.....	13
Tabla 7	Caracterización trófica de lagos y embalses de Vollenweider (1983).....	14
Tabla 8	Sistema de clasificación de estado trófico resultados cuantitativos para fósforo total.....	15
Tabla 9	Sistema de clasificación de estado trófico resultados cuantitativos de clorofila "a".....	18
Tabla 10	Comparación de los valores promedio de las variables ( $p_{\lambda}$ , CLA) utilizadas para la clasificación trófica de lagos cálidos tropicales (CEPIS) y la clasificación trófica de lagos templados (Vollenweider y Kerekes, 1981).....	19
Tabla 11	Matriz de correlación.....	25
Tabla 12	Comparación estadística de las ecuaciones de fósforo total contra datos observados.....	25
Tabla 13	Comparación de las clasificaciones de estado trófico de lagos cálidos tropicales africanos.....	27
Tabla 14	Valores límites de THMs admitidos por algunos países y la Organización Mundial de la Salud (Salameh, 1987).....	35

## FIGURAS

Figura 1	Histograma de los datos observados.....	10
Figura 2	Limitación de nutrientes.....	11
Figura 3	Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en fósforo total.....	17
Figura 4	Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en clorofila "a".....	18
Figura 5	Esquema del balance de masa para fósforo - lago completamente mezclado.....	20
Figura 6	Comparación de fósforo total observado y calculado.....	24
Figura 7	De datos observados de América Latina y categorías tróficas efinidas cualitativamente.....	26
Figura 8	$L(p)/Z$ versus $T_{\bar{u}}$ para datos observados de embalses cálidos de Sud África y categorías tróficas definidas cualitativamente.....	28
Figura 9	Clorofila "a" vs. fósforo total.....	30
Figura 10	Clorofila "a" vs. nitrógeno total.....	31
Figura 11	Comparación de los valores observados y calculados de nitrógeno total.....	32

## Resumen

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), centro especializado de la Organización Panamericana de la Salud/ Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS), está llevando, desde 1981, un Programa Regional para el desarrollo de metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos/embalses cálidos tropicales de América Latina y el Caribe. Aparentemente, la mayoría de los lagos/embalses de la Región están limitados por fósforo. Un sistema de clasificación de estado trófico de lagos cálidos tropicales y un modelo simplificado de fósforo total se han desarrollado con datos recopilados en la Región, y han sido verificados contra datos de embalses africanos. Los modelos preliminares de clorofila "a" y de nitrógeno total aún requieren de mayor desarrollo.

### 1. Introducción

El explosivo crecimiento demográfico en América Latina y el Caribe durante los últimos años, con el consecuente aumento en la demanda de recursos de agua ha acelerado la construcción de embalses artificiales para múltiples usos en abastecimientos de agua potable e industrial, para irrigación y para energía hidroeléctrica. Muchos de estos embalses así como los lagos naturales de la Región han sufrido las consecuencias del proceso de eutroficación, el que ha interferido con los usos designados de estos cuerpos de agua y, por lo tanto, con los propósitos específicos para los que esos embalses fueron creados.

La eutroficación es el proceso de sobreproducción de algas y macrofitas en cuerpos de agua que puede producir problemas en ciertos usos como son, entre otros: suministro de agua potable por alteración de sus propiedades organolépticas (olor, sabor), corrosión del equipo hidroeléctrico y distintos trastornos en los procesos de tratamiento potabilizador por disminución del contenido de oxígeno, acumulación del amoníaco en la columna de agua y resuspensión de ciertos metales (Fe, Mn) del sedimento bajo condiciones anóxicas. Aunque es un proceso que, de forma lenta, puede tener un origen natural, hoy en día es, fundamentalmente, de carácter cultural, acelerado por el aporte continuo de nutrientes de origen antropogénico.

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) ubicado en Lima, Perú, centro especializado de la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS) convocó a una reunión Regional en diciembre de 1981, en Sao Paulo, Brasil, para analizar las metodologías para la evaluación de eutroficación, para su inclusión en el proceso de planificación.

Se revisaron los modelos simplificados disponibles en ese entonces (OECD, 1982), desarrollados con datos de lagos predominantemente templados, y se llegó a la conclusión que debido a las diferencias fundamentales entre lagos templados y lagos cálidos tropicales (Castagnino, 1982) estos modelos para lagos templados no eran aplicables a la mayoría de los cuerpos de agua de la Región. De esta forma se inició el Programa Regional para el Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales. Se acordó llevar a cabo un programa de recolección de datos mínimos para obtener los datos necesarios y se establecieron las siguientes metas generales del programa:

- i. El establecimiento de un sistema de clasificación de estado trófico para lagos cálidos tropicales.
- ii. La elaboración de metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales.
- iii. El desarrollo de un modelo matemático simplificado confiable para ser aplicado en la gestión de lagos y en la planificación de embalses futuros.

Posteriormente se llevaron a cabo reuniones en Brasilia, Brasil (Salas, 1983), en Guadalajara, México (Salas y Limón, 1985), en San Juan de Puerto Rico (Salas y Martino, 1988) y en Caracas, Venezuela, (Martino y Salas, 1990) en los que se incorporaron países y datos adicionales en el Programa Regional. En 1990 han participado 16 países/estados de la Región, aportando datos de alrededor 40 lagos/embalses, como se muestra en la Tabla 1.

Este informe presenta los resultados actualizados hasta marzo de 1990.

## 2. Base de datos del proyecto

Como fue propuesto por el Dr. R.V. Vollenweider (Consultor del Programa) y aceptado por los participantes (Salas, 1983), la definición del lago cálido tropical se basa en una temperatura mínima de 10°C durante condiciones normales y un promedio anual mínimo de 15°C. Dentro de esta definición, la cobertura geográfica del Programa se extiende desde el Lago Livingston en Texas, E.U.A., hasta Salto Grande en Argentina, como puede apreciarse en la Tabla 1. Se hace notar que los lagos tropicales de elevada altitud, por encima de 3000 m sobre el nivel del mar, por no coincidir con esta definición, quedaron excluidos del análisis.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los datos mínimos de campo necesarios para el Proyecto. Se requirieron muestreos mensuales de la calidad del agua en el lago/embalse y sus principales tributarios para un período de un año y se recomendó que el método de Clark (Sonzogni, et al., 1978) sea utilizado con los datos de los tributarios para estimar los aportes de nutrientes. Las descargas directas, donde eran significantes, se estimaron usando coeficientes de exportación como se presenta en la Tabla 3, tomadas originalmente de Rast & Lee (1978) y verificados con datos de Brasil. Estimados recomendados para las contribuciones de seres vivos (humano y animal) también se proporcionaron (ver Tabla 3). Estos criterios recomendados no siempre fueron seguidos estrictamente. Aunque algunas desviaciones sí fueron aceptadas, algunos datos tuvieron que ser rechazados después de una revisión. La cobertura espacial fue específica para cada caso y se limitó, en algunos casos, a una estación central en el lago. Los procedimientos de laboratorio siguieron generalmente las metodologías propuestas por el Standard Methods (A.P.H.A., ediciones 13, 14, 15 y 16).

**Tabla 1.- Estado de los datos para el modelo de fósforo total**

País	Lago/Embalse	Estado	Institución
ARGENTINA			
	Salto Grande, 1982	INCLUIDO EN EL MODELO	
	Salto Grande, 1981-83	INCLUIDO EN EL MODELO	
BRASIL			
<u>Brasilia</u>			
	Descoberto, 1980	INCLUIDO EN EL MODELO	CAESB
	Paranoá, 1980	INCLUIDO EN EL MODELO	CAESB
	Santa María	DATOS INCOMPLETOS	CAESB

Tabla 1.- Estado de los datos para el modelo de fósforo total (cont.)

País	Lago/Embalse	Estado	Institución
BRASIL (cont.)			
<u>Río de Janeiro</u>			
	Funil, 1978-79	INCLUIDO EN EL MODELO	FEEMA
	Funil, 1987	INCLUIDO EN EL MODELO	FEEMA
	Funil, 88-89	INCLUIDO EN EL MODELO	FEEMA
	Santana, 1988-89	NO INCLUIDO EN EL MODELO*	FEEMA
	Vigario, 1988-89	INCLUIDO EN EL MODELO	FEEMA
	Lajes, 1988-89	INCLUIDO EN EL MODELO	FEEMA
<u>Sao Paulo</u>			
	Americana, 1982	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Americana, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Atibainha, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Barra Bonita, 1978-79-80	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Barra Bonita, 1983	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Barra Bonita, 1982-84	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Barra Bonita, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Cachoeira, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Guarapiranga, 1982-83	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Guarapiranga, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Ituparanga, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Jaguari, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Paiva Castro, 1982-83	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Paiva Castro, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Paraibuna, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Ponte Nova, 1982-83	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Ponte Nova, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
	Taiçupeba, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	CETESB
COLOMBIA			
	El Guajaro	DATOS INCOMPLETOS	IMAT/INDERENA
	Represa El Peñol	DATOS INCOMPLETOS	MIN. SALUD
	Laguna de Sonso, 1988	INCLUIDO EN EL MODELO	CVC
CUBA			
	Pozo Seco	DATOS INCOMPLETOS	IH
ECUADOR			
	Poza Honda, 1981	INCLUIDO EN EL MODELO	IEOS/CRM
	Poza Honda, 1982	INCLUIDO EN EL MODELO	IEOS/CRM

\* Tiempo de retención ( $T_w$ ) = horas

Tabla 1.- Estado de los datos para el modelo de fósforo total (cont.)

País	Lago/Embalse	Estado	Institución
EL SALVADOR			
	Ilopango	DATOS INCOMPLETOS	
ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA			
	Livingston, 1975	INCLUIDO EN EL MODELO	YDROSCIENCE
GUATEMALA			
	Amatitlán	DATOS INCOMPLETOS	ERIS
HONDURAS			
	Los Laureles	DATOS INCOMPLETOS	SANAA
MÉXICO			
	Cajititlán, 1981-82	NO INCLUIDO EN EL MODELO*	CEL
	Cajititlán, 1986-87	NO INCLUIDO EN EL MODELO*	CEL
	Chapala, 83-84	INCLUIDO EN EL MODELO	CEL
	Chapala, 86-87	INCLUIDO EN EL MODELO	CEL
	Zirahuén, 86-87	NO INCLUIDO EN EL MODELO*	CEL
	Tequesquitengo, 1986	INCLUIDO EN EL MODELO	IMTA/SARH
	Requena, 86-87	INCLUIDO EN EL MODELO	IMTA/SARH
NICARAGUA			
	Managua	DATOS INCOMPLETOS	INAA/IRENA
	Laguna de Masaya	DATOS INCOMPLETOS	INAA/IRENA
PARAGUAY			
	Ypacaraí	DATOS INCOMPLETOS	SENASA
PERÚ			
	Laguna de Yarinacocha	DATOS INCOMPLETOS	I VITA
PUERTO RICO			
	La Plata, 1981-82	INCLUIDO EN EL MODELO	JCA
	Loiza, 1973-74	INCLUIDO EN EL MODELO	JCA
	Laguna Tortuguero, 74-75	INCLUIDO EN EL MODELO	JCA
REPÚBLICA DOMINICANA			
	Valdesia	DATOS INCOMPLETOS	CAASD
VENEZUELA			
	Valencia, Ene-Feb, 1978	NO INCLUIDO EN EL MODELO*	DIA/MARNR
	Laguna Grande, 1980	INCLUIDO EN EL MODELO	IVIC/MARNR

\*  $T_{\omega} = \infty$

**Tabla 2.- Información mínima requerida para el Proyecto Regional del CEPIS de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales\***

A. Muestreo mínimo para tributarios

1. Datos físicos
  - Flujo
  - Áreas de drenaje
  - Temperatura
2. Datos químicos y biológicos
  - Fósforo total ( $P_{\lambda}$ )
  - Ortofosfato ( $PO_4^{3-}$ )
  - Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)
  - Nitrógeno amoníaco ( $NH_4^+$ )
  - Nitrito-nitrato ( $NO_2^-$ - $NO_3^-$ )
  - Conductividad

B. Muestreo mínimo para lagos

1. Datos físicos
  - Área superficial, volumen, profundidad
  - Disco Secchi
  - pH<sup>+</sup>
  - Temperatura del agua<sup>+</sup> y del aire
  - Precipitación (medición del nutriente si su contribución es significativa)
  - Área de drenaje directo - uso de la tierra
  - Flujo efluente ( $Q_{ef}$ )
  - Volúmenes epi/hipolimnéticos (si fuera posible)
2. Datos químicos, bioquímicos y biológicos
  - Fósforo total ( $P_{\lambda}$ )
  - Ortofosfato ( $PO_4^{3-}$ )
  - Clorofila "a"
  - Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)
  - Nitrógeno amonio ( $NH_4^+$ )
  - Nitrito-nitrato ( $NO_2^-$ - $NO_3^-$ )
  - Conductividad<sup>+</sup>
  - Oxígeno disuelto (epi/hipolimnión)<sup>+</sup>
  - Productividad primaria
  - Cobertura de macrofitos
  - Biomasa de macrofitos

\* Para más detalle ver Castagnino (1982) y Salas (1983)

+ Perfiles verticales

**Tabla 3.- Coeficientes de exportación\***

Uso de la Cuenca	Fósforo total g/m <sup>2</sup> · año	Nitrógeno total g/m <sup>2</sup> · año
Urbano	0.1	0.5
Agrícola rural	0.05	0.5
Bosque	0.01	0.3

SERES VIVOS

	<u>Fósforo total*</u>	<u>Nitrógeno total<sup>+</sup></u>
Personas	1000 g/hab-año	
Vacunos	7000 g/animal-año	54,750 g/animal-año
Porcinos y Lanares	3000 "	14,600 "
Caballos	4500 "	18,250 "
Patos y similares	300 "	474.5 "

\* Castagnino (1982)

+ Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico (1990). Basados en datos de los EE.UU.

Para el desarrollo del modelo de fósforo total se utilizaron 39 datos, correspondientes a 27 lagos/embalses con la información necesaria para un análisis apropiado, los cuales se presentan en la Tabla 4. Estos datos incluyen una amplia diversidad de condiciones limnológicas que van desde oligotrofia a hipereutrofia (criterio de clasificación trófica discutido posteriormente) y de profundidades someras a lagos muy profundos. La mayoría de los lagos está limitada por fósforo. El rango de los parámetros utilizados en el desarrollo de los modelos matemáticos se presenta en la Tabla 5. En la Figura 1 pueden observarse los histogramas de distribución de profundidad, tiempo de retención, fósforo total y la carga externa de fósforo total.

Teniendo en cuenta que los datos fueron recogidos y analizados por diferentes investigadores de diversos laboratorios de la Región, durante varios años, se asume una variabilidad en su calidad. Sin embargo, considerando la amplitud del rango de datos cubierto y la naturaleza aleatoria de la variabilidad en calidad, no se esperan desviaciones sesgadas significativas en las relaciones generales obtenidas.

Se transformaron los datos a sus logaritmos naturales, previo análisis estadístico de regresión múltiple ("Stepwise"). Se efectuaron varias comparaciones estadísticas para cuantificar el estado de la verificación de los modelos y evaluar su validez (Thomann, 1982). Se calcularon los coeficientes de correlación, la regresión lineal óptima entre concentraciones medidas y calculadas así como el límite de confianza de 95% ( $P < 0,05$ ). Se utilizó el error estándar de la estimación (error cuadrático medio) como medida del error entre los modelos y los datos observados. También se empleó la prueba no-paramétrica de Mann-Witney (modificación para varianza de Siegel y Tukey) (Conover, 1980) para examinar si la diferencia en dispersión del error estándar entre modelos era significativa.

### **3. Concepto de nutriente limitante**

El concepto de nutriente limitante se basa en la premisa que, dada una determinada estequiometría celular de las plantas acuáticas, el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa vegetal es aquél que primero se consume o que alcanza un mínimo antes que los otros nutrientes relativos a tal estequiometría. La relación nitrógeno total ( $N\lambda$ ) a fósforo total ( $P\lambda$ ) propuesta por Vollenweider (1983) para el fitoplancton y utilizada por el Proyecto fue de 9:1. De esta forma, los lagos/embalses con relaciones de nitrógeno a fósforo superiores a un valor de 9 fueron considerados potencialmente limitados por fósforo, mientras que aquéllos cuya razón era inferior a 9 eran limitados por nitrógeno. Como puede verse en la Figura 2, la mayoría de los lagos/embalses del Proyecto Regional estuvieron limitados por fósforo, aunque en algunas ocasiones, otros factores, tales como la luz, pudieron ser limitantes ya que los niveles observados tanto de nitrógeno como de fósforo eran relativamente altos, sobrepasando los niveles considerados tradicionalmente como limitantes.

### **4. Sistema de clasificación trófica**

Para la clasificación del estado trófico de los lagos, se aplicó la estrategia utilizada por la Organización para Cooperación y Desarrollo Económico (OECD por sus siglas en inglés), la misma que proporciona un esquema cuantitativo probabilístico para las diferentes categorías de estado trófico. Los datos medidos de los parámetros básicos, tales como fósforo, nitrógeno y clorofila "a", se relacionan con el estado trófico asignado de acuerdo a las percepciones cualitativas, tal como lo reportaron Vollenweider y Kerekes (1981) para lagos templados.

Tabla 4.- Proyecto regional de evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales parámetros básicos para los modelos simplificados

Lago/Embalse	Símbolo	Profundidad Z (m)	Área Superficie A <sub>s</sub> (km <sup>2</sup> )	Tiempo Detención (años)	Carga de Fósforo [L(p)] (g/m <sup>2</sup> .año)	Fósforo Total (Pλ) (mg/l)	K <sub>s</sub> para Pλ (l/año)	Carga de Nitrógeno Total [L(n)] (g/m <sup>2</sup> .año)	Nitrógeno Total (Nλ) (mg/l)	Clorofila "a" superfic. (mg/m <sup>3</sup> )	Tasa dep. oxígeno disuelto (mg/l -mes)	Clasificación	Referencias
ARGENTINA													
Em. Salto Grande, 1982	S <sub>2</sub>	7,8	757	0,097	12,6	0,082	9,39	N.D.	-	2,08	-	M/E	Berón, L.E. & Lee, G.F. (1984)
Em. Salto Grande, 1981-83	S <sub>13</sub>	8,4	757	0,032	14,50	0,046	6,28	N.D.	-	2,65	-	M/E	
BRASIL													
Brasília													
Em. Descoberto, 1980	D	6,9	14,9	0,280	0,65	0,016	2,30	N.D.	0,460	N.D.	-	0	CAESB (1983) CAESB (1982) & Cordeiro, et al (1981)
Paranoá, 1980	P	14,3	39,5	0,731	2,93	0,040	3,80	-	1,260	-	-	E	
Em. Santa María	DATOS INCOMPLETOS												
Río de Janeiro													
Em. Funil, 78-79	F <sub>1</sub>	22,8	38,4	0,151	9,19	0,041	3,30	98,76	0,580	8,1	-	M	FEEMA (1982)
Em. Funil, 1987	F <sub>2</sub>	22,8	38,4	0,131	18,60	0,048	9,40	-	-	6,0	-	E	FEEMA (1987)
Em. Funil, 88-89	F <sub>3</sub>	21,0	33,3	0,081	29,3	0,066	9,0	212,58	0,60	10,0	0,5	E	FEEMA (1989)
Em. Santana, 88-89	S <sub>a</sub>	2,5	4,75	0,002	151,6	0,10	110	1094	0,938	3,6	-	E	FEEMA (1989)
Em. Vigarío, 88-89	V <sub>i</sub>	9,8	3,85	0,008	142,9	0,084	48	1019	0,836	2,7	-	E	FEEMA (1989)
Em. Lajes, 88-89	L <sub>a</sub>	13,6	26,0	0,760	0,795	0,018	2	9,14	0,475	2,0	0,8	0	FEEMA (1989)
Sao Paulo													
Em. Americana, 1982	A <sub>2</sub>	9,2	11,5	0,047	37,70	0,081	29,30	N.D.	1,350	15,8	-	E	CETESB (1985)
Em. Americana, 1986	A <sub>6</sub>	7,8	12,7	0,084	31,62	0,098	29,46	356,60	2,456	32,1	5,4	E	CETESB (1987)
Em. Alibainha, 1986	A <sub>t</sub>	12,5	20,8	0,388	1,29	0,023	1,91	29,04	0,901	3,8	7,3	0	CETESB (1987)
Em. Barra Bonita, 78-79-80	B <sub>a</sub>	8,3	239,3	0,269	3,43	0,058	3,41	N.D.	N.D.	10,7	-	M/E	CETESB (1985)
Em. Barra Bonita, 1983	B <sub>b</sub>	9,2	260	0,073	23,00	0,115	8,04	N.D.	N.D.	4,8	-	M/E	CETESB (1985)
Em. Barra Bonita, 1982-84	B <sub>c</sub>	9,3	268	0,211	7,45	0,094	3,74	N.D.	N.D.	6,2	-	M/E	CETESB (1985)
Em. Barra Bonita, 1986	B <sub>d</sub>	8,6	250	0,221	6,96	0,059	9,19	98,50	1,376	9,7	2,3	M/E	CETESB (1987)
Em. Cachoeira, 1986	C <sub>c</sub>	10,7	7,1	0,130	4,14	0,032	4,40	72,1	0,790	3,6	4,4	0	CETESB (1987)
Em. Guarapiranga, 1982-83	G <sub>2</sub>	4,9	27,8	0,238	1,40	0,052	1,30	N.D.	0,630	20,2	-	E	CETESB (1985)
Em. Guarapiranga, 1986	G <sub>6</sub>	4,9	23,6	0,331	1,70	0,044	4,86	15,80	0,880	2,9	3,0	E	CETESB (1987)
Em. Itupararanga, 1986	I	7,8	20,9	0,660	2,11	0,029	7,81	32,40	0,889	8,6	3,9	M	CETESB (1987)
Em. Jaguari, 1986	J	16,8	35,0	1,225	3,28	0,036	4,60	22,90	0,792	3,3	-	O/M	CETESB (1987)
Em. Paiva Castro, 1982-83	C <sub>2</sub>	5,7	6,7	0,059	7,30	0,040	15,10	N.D.	0,610	3,5	-	M	CETESB (1985)
Em. Paiva Castro, 1986	C <sub>6</sub>	5,4	4,1	0,028	5,48	0,023	8,41	184,80	0,831	8,0	3,4	M	CETESB (1987)
Em. Paraiuna, 1986	P <sub>a</sub>	26,4	168	1,923	0,79	0,016	1,35	10,20	0,573	1,5	-	0	CETESB (1987)
Em. Ponte Nova, 1982-83	N <sub>2</sub>	8,9	21,1	0,615	0,55	0,027	0,67	N.D.	0,640	4,0	-	O/M	CETESB (1985)
Em. Ponte Nova, 1986	N <sub>6</sub>	8,3	20,5	0,806	0,47	0,025	1,02	7,76	0,579	6,0	3,5	O/M	CETESB (1987)
Em. Taiacupeba, 1986	T <sub>a</sub>	2,2	8,8	0,135	0,64	0,031	1,98	12,60	0,506	8,0	-	M	CETESB (1987)
COLOMBIA													
Em. El Guajaro	DATOS INCOMPLETOS												E
Em. El Peñol	DATOS INCOMPLETOS												E
Laguna de Sonso	S <sub>0</sub>	1,0	10,0	0,041	6,58	0,210	6,90	76,98	2,470	-	0,2	HE	CVC (1988)
CUBA													
Em. Pozo Seco	DATOS INCOMPLETOS												
ECUADOR													
Em. Pozo Honda, 1981	H <sub>1</sub>	20,00	2,6	4,845	5,06	0,40	0,43	N.D.	N.D.	N.D.	-	HE	Vásconez, J.E. (1983)
Em. Pozo Honda, 1982	H <sub>2</sub>	20,14	3,8	1,574	15,10	0,20	3,11	N.D.	N.D.	N.D.	-	HE	Vásconez, J.E. (1983)

Tabla 4.- Proyecto regional de evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales parámetros básicos para los modelos simplificados

Lago/Embalse	Símbolo	Profundidad Z (m)	Área Superficie A <sub>s</sub> (km <sup>2</sup> )	Tiempo Detención (años)	Carga de Fósforo [L(p)] (g/m <sup>2</sup> .año)	Fósforo Total (Pλ) (mg/l)	K <sub>s</sub> para Pλ (l/año)	Carga de Nitrógeno Total [L(n)] (g/m <sup>2</sup> .año)	Nitrógeno Total (Nλ) (mg/l)	Clorofila "a" superfic. (mg/m <sup>3</sup> )	Tasa dep. oxígeno disuelto (mg/l -mes)	Clasificación	Referencias
EL SALVADOR													
Lago Ilopango	DATOS INCOMPLETOS												
ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA													
L. Livingston Texas, U.S.A., 1975	L <sub>i</sub>	6,30	334,2	0,243	14,6	0,20	7,47	53,800	1,600	23	-	E	Hydroscience (1976)
GUATEMALA													
L. Amatitlán	DATOS INCOMPLETOS												
MÉXICO													
Laguna de Cajitlán 1981-82	Ca <sub>1</sub>	0,67	10,6	*	0,937	0,470	1,89	14,811	4,240	N.D.	-	HE	CEL (1985)
Laguna de Cajitlán 1986-87	Ca <sub>2</sub>	1,69	14,3	*	3,011	0,400	3,53	18,496	2,400	22,38	-	HE	CEL (1987)
L. Chapala, 83-84	Ch <sub>1</sub>	4,20	1061	11,05	0,932	0,426	0,43	3,650	0,876	5,02	-	M	CEL (1985)
L. Chapala, 86-87	Ch <sub>2</sub>	4,43	1078,5	15,94	1,508	0,680	0,44	5,182	1,130	8,9	-	E	CEL (1987)
L. Zirahuén, 86-87	Z	20,64	11,23	*	2,492	0,250	4,80	17,532	0,730	1,67	0,5	E	CEL (1988)
L. Tequesquitengo, 1986	T <sub>e</sub>	16,00	8,0	98,5	0,046	0,023	0,067	1,335	0,645	26,4	-	M	IMTA/SARH (1986)
L. Requena, 86-87	R	5,00	4,82	0,26	13,229	0,383	7,30	97,917	1,740	35,16	-	E	IMTA/SARH (1988)
NICARAGUA													
L. Managua	DATOS INCOMPLETOS												
Laguna de Masaya	DATOS INCOMPLETOS												
PARAGUAY													
Lago Ypacaraí	DATOS INCOMPLETOS												
PERÚ													
L. Yarinacocha	DATOS INCOMPLETOS												
PUERTO RICO													
Em. La Plata, 1981-82	L <sub>p</sub>	10	3,07	0,09	34,90	0,220	4,57	197,3	0,990	16,8	-	E	EQB (1984)
Em. Loiza, 1973-74	L	6,14	2,425	0,054	52,91	0,330	7,34	232,6	1,700	N.D.	-	E	E Quiñones, F. (1980)
Laguna Tortuguero, 1974-75	T	1,2	2,24	0,133	0,30	0,010	17,50	14,8	1,700	N.D.	-	0	USGS (1978)
REPUBLICA DOMINICANA													
Em. Valdesia	DATOS INCOMPLETOS												
VENEZUELA													
L. Valencia Ene-Feb 1978	V	18,3	356	*	2,688	0,105	1,35	-	2,1	27,3	-	HE	DIA (1979) & Lin (1981)
Laguna Grande, 1980	L <sub>g</sub>	3,5	1,11	0,12	13,70	0,29	5,16	265,31	6,56 <sup>+</sup>	-	-	E	Bermejo, S.H. (1980)

Em. = Embalse

L. = Lago

N.D. = Ningún Dato

+ = Baja confiabilidad

\* = Sin flujo de salida, por lo tanto no ha sido usado en el modelo

HE = Hipereutrófico, E = Eutrófico, M/E = Meso/Eutrófico, M = Mesotrófico, O/M = Oligo/Mesotrófico, O = Oligotrófico

1 = Bajos tiempos de retención, no utilizado en modelo de fósforo total

Tabla 5.- Datos usados en el desarrollo del modelo, rango y promedios

Parámetro	Símbolo	Unidades	Nº de Datos	Mínimo	Promedio geométrico	Máximo
Profundidad promedio	Z	m	39	1,00	8,061	26,4
Tiempo de retención	$T_w$	años	39	0,008	0,283	98,5
Carga de fósforo	L(p)	$g/m^2.año$	39	0,046	4,461	142,9
Fósforo total	$P_\lambda$	$mg/m^3$	39	10	66,672	680
Clorofila "a"	Cl <sub>a</sub>	$mg/m^3$	25	1,5	7,417	35,16
Carga de nitrógeno	L(n)	$g/m^2.año$	24	1,335	39,562	1019
Nitrógeno total	$N_\lambda$	$mg/m^3$	24	475	958,43	2470

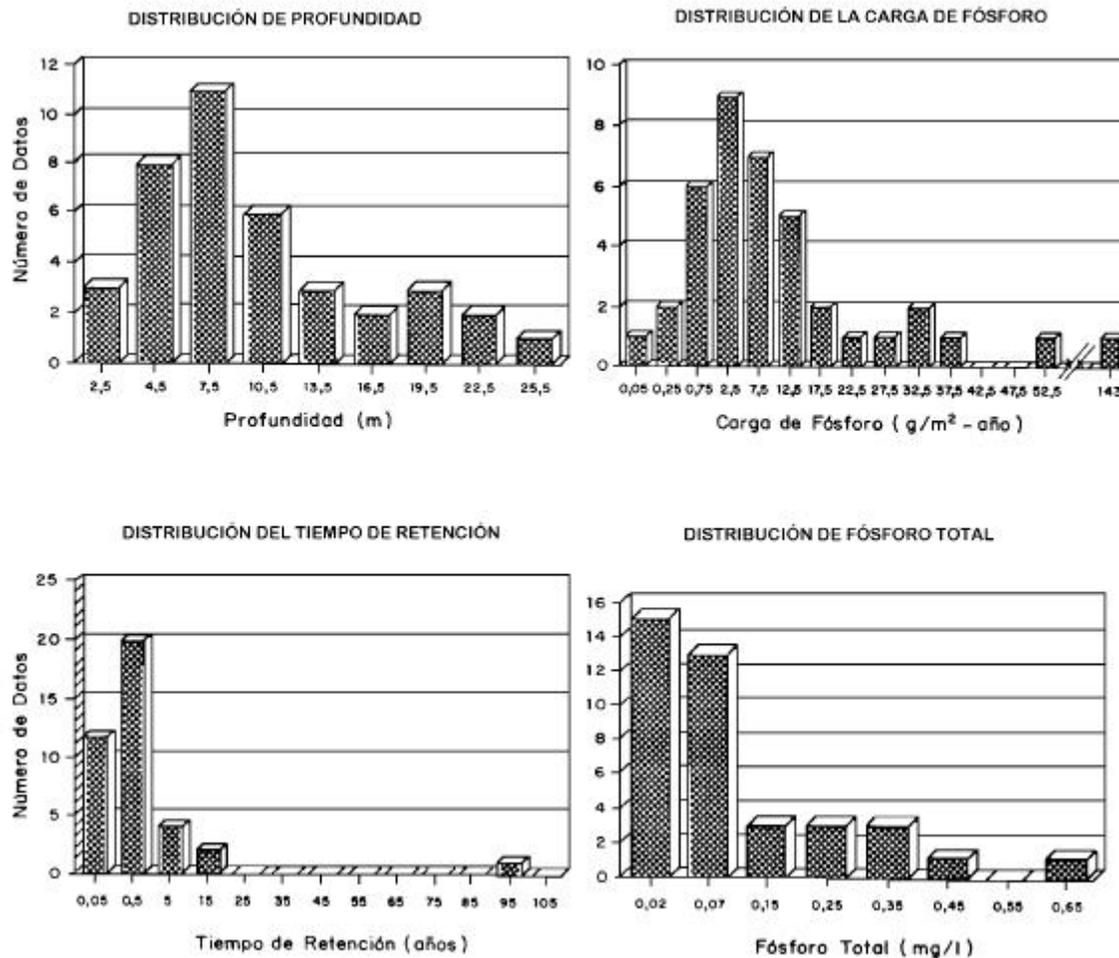


Figura 1.- Histograma de los datos observados

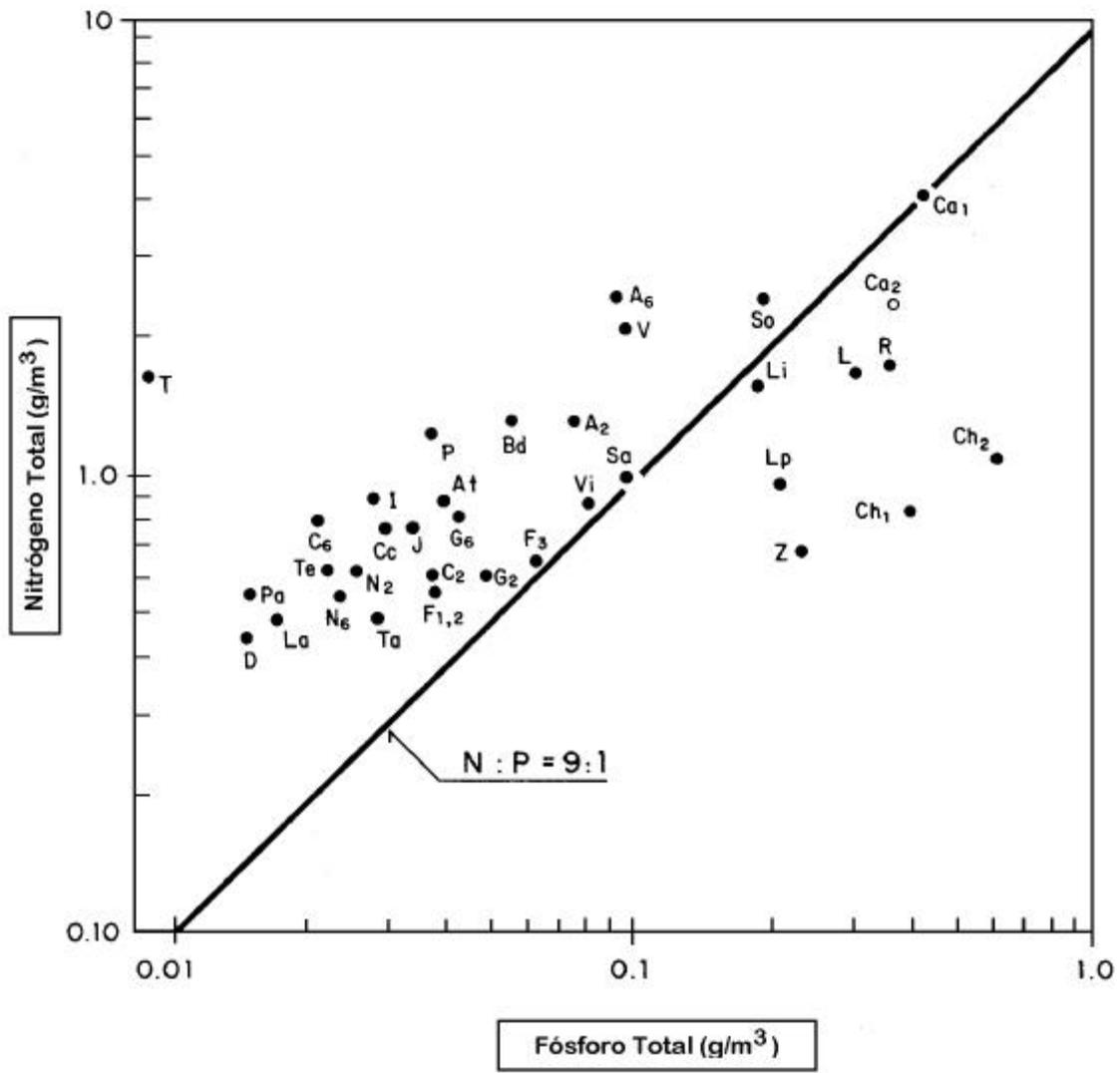


Figura 2.- Limitación de nutrientes

Para el Proyecto Regional del CEPIS, se utilizaron la clasificación tentativa del estado trófico proporcionada por los investigadores de los diferentes países (ver Tabla 6) siguiendo criterios similares (percepciones estéticas, afloramientos algales, presencia de macrofitos, etc.), como lo propuesto por Vollenweider (1983) (ver Tabla 7) y los datos observados de fósforo total y clorofila "a" para cada categoría de estado trófico (hiperutrófico, eutrófico, mesotrófico, oligotrófico y ultraoligotrófico), como se muestra en la Tabla 4.

Una curva de distribución normal se aplicó para la log-transformación de los datos de fósforo total y de clorofila "a" usando la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{I}{s_s \sqrt{2\pi}} e^{-1/2(x-m)^2/s_s^2} \quad (1)$$

donde,

Y	=	distribución de probabilidad log-normal
$\sigma_s$	=	desviación estándar (DE)
$\mu$	=	promedio
x	=	parámetro (esto es, logaritmo de fósforo total, $P_\lambda$ o clorofila "a", $Cl_a$ )

Los resultados cuantitativos para fósforo total se presentan en la Tabla 8.

La prueba Kolmogorov-Smirnov (Blank, 1980) se utilizó para verificar la distribución log-normal de los datos de fósforo total para cada una de las categorías de estado trófico antes mencionadas.

De acuerdo con los resultados, los promedios geométricos de cada una de las categorías tróficas fueron un múltiplo de aproximadamente 2,6 para lagos cálidos tropicales. Vollenweider y Kerekes (1981) observaron que, para lagos templados, los promedios geométricos de  $P_\lambda$  para las categorías de estado trófico eran múltiplos de alrededor de 3 y que las desviaciones estándar eran muy similares para bases de datos mucho mayores.

Usando la categoría de clasificación eutrófica como base y aplicando un múltiplo de 2,6 se calcularon los valores promedio para los otros estados tróficos, incluyendo las clasificaciones hipereutrófica y ultra-oligotrófica, ya que los datos para estas dos últimas clasificaciones eran insuficientes para el cálculo directo. Asimismo, se aplicó un valor promedio de 0,206 para la desviación estándar en todas las distribuciones ( $\sigma_s$  entre las categorías tróficas no es significativamente diferente al intervalo de 95% de confianza).

Tabla 6.- Clasificación reportada de estado trófico

Lago/Embalse	País/Estado	Clasificación
Poza Honda (H)	Ecuador	HE
Valencia (V)	Venezuela	HE
Laguna Cajititlán (C <sub>a</sub> )	México	HE
Laguna de Sonso (S <sub>o</sub> )	Colombia	HE
Paranoá (P)	Brasília	E
El Guajaro (G <sub>u</sub> )	Colombia	E
El Peñol (P <sub>e</sub> )	Colombia	E
Amatitlán (A <sub>m</sub> )	Guatemala	E
Laguna de Yarinacocha (Y)	Perú	E
Loiza (L)	Puerto Rico	E
La Plata (L <sub>p</sub> )	Puerto Rico	E
Americana (A)	Sao Paulo	E
Santana (S <sub>a</sub> )	Río de Janeiro	E
Vigario (V <sub>i</sub> )	Río de Janeiro	E
Livingston (L <sub>i</sub> )	Texas, EE.UU.	E
Zirahuén (Z)	México	E
Requena (R)	México	E
Laguna Grande (L <sub>g</sub> )	Venezuela	E
Los Laureles (L <sub>i</sub> )	Honduras	E
Guarapiranga (G)	Sao Paulo	M/E
Salto Grande (S)	Argentina	M/E
Barra Bonita (B)	Sao Paulo	M/E
Chapala (Ch)	México	M*
Tequesquitengo (T <sub>e</sub> )	México	M
Itupararanga (I)	Sao Paulo	M
Taiaçupeba (T <sub>a</sub> )	Sao Paulo	M
Paiva Castro (C)	Sao Paulo	O/M
Funil (F)	Río de Janeiro	O/M*
Jaguarí (J)	Sao Paulo	O/M
Ponte Nova (N)	Sao Paulo	O/M
Descoberto (D)	Brasília	O
Santa María (S <sub>m</sub> )	Brasília	O
Lajes (L <sub>a</sub> )	Río de Janeiro	O
Laguna Tortuguero (T)	Puerto Rico	O
Atibainha (A <sub>t</sub> )	Sao Paulo	O
Cachoeira (C <sub>c</sub> )	Sao Paulo	O
Paraibuna (P <sub>a</sub> )	Sao Paulo	O
Pozo Seco (P <sub>s</sub> )	Cuba	-
Managua (M)	Nicaragua	-
Laguna de Masaya (M <sub>y</sub> )	Nicaragua	-
Ypacaraí (Y <sub>p</sub> )	Paraguay	-
Valdesia (V <sub>a</sub> )	República Dominicana	-
Ilopango (I <sub>i</sub> )	El Salvador	-

HE = Hipereutrófico

E = Eutrófico

M/E = Mesotrófico/Eutrófico

M = Mesotrófico

O/M = Oligotrófico/Mesotrófico

O = Oligotrófico

\* Clasificación original. Se observó una evolución hacia eutrofia desde 1979 hasta 1986-87.

**Tabla 7.- Caracterización trófica de lagos y embalses de Vollenweider (1983)**

Categorización Limnológica					
Categorías	Ultra-Oligotrófica	Oligotrófica	Mesotrófica	Eutrófica	Hipertrófica
Biomasa	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta
Fracción de algas verdes y/o verdes-azules	Baja	Baja	Variable	Alta	Muy alta
Macrofitas	Baja o ausente	Baja	Variable	Alta o Baja	Baja
Producción dinámica	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Alta, Inestable
Dinámica de oxígeno:					
Epilímnico	Normalmente saturada	Normalmente saturada	Variable sobresaturada	Frecuentemente sobresaturada	Muy inestable variando desde una alta sobresaturación a falta completa
Hipolímnico	Normalmente saturado	Normalmente saturado	Variable subsaturada	Subsaturada a agotamiento completo	
Deterioro de los usos múltiples	Baja	Baja	Variable	Alta	Muy alta

Tomado de Vollenweider (1983)

**Tabla 8.- Sistema de clasificación de estado trófico resultados cuantitativos para fósforo total**

Clasificación	Prom. geométrico $P_{\lambda}$ mg/m <sup>3</sup>	Prom. logarítmico $\pm$ SD	Número de lagos	Identificación del lago/embalse
Eutrófico	118,7	2,074 $\pm$ 0,316	16	A <sub>2</sub> , A <sub>6</sub> , B <sub>b</sub> , B <sub>c</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , G <sub>2</sub> , L, L <sub>g</sub> , L <sub>i</sub> , L <sub>p</sub> , P, R, S <sub>2</sub> , V <sub>i</sub> , Z
Mesotrófico	39,6	1,598 $\pm$ 0,137	9	B <sub>a</sub> , B <sub>d</sub> , C <sub>2</sub> , F <sub>1</sub> , G <sub>6</sub> , I, S <sub>13</sub> , T <sub>a</sub> , T <sub>e</sub>
Oligotrófico	21,3	1,328 $\pm$ 0,165	10	A <sub>1</sub> , C <sub>c</sub> , C <sub>6</sub> , D, J, L <sub>a</sub> , N <sub>2</sub> , N <sub>6</sub> , P <sub>a</sub> , T

La distribución de probabilidad condicional para las categorías de estado trófico, como se muestra en la Figura 3, resulta de la aplicación de la fórmula de Bayes (Blank, 1980) a cada una de las categorías, de distribución log-normal, de la siguiente manera:

$$P (CT_i/X) = \frac{P (CT_i) \cdot P (X/CT_i)}{\sum P (CT_i) \cdot P (X/CT_i)} \quad (2)$$

donde,

$$\frac{P(X/CT_i)}{\sum P(X/CT_i)} = \frac{Y(CT_i)}{\sum Y(CT_i)}$$

CT<sub>i</sub> = categorías del estado trófico

X = logaritmo de  $P_{\lambda}$

P (X/CT<sub>i</sub>) = Y(CT<sub>i</sub>) = distribución normal de probabilidad [Y(HE) (hipereutrófico), Y(E) (eutrófico), Y(M) (mesotrófico), Y(O) (oligotrófico) y Y(UO) (ultraoligotrófico)]

$\sum Y(CT_i)$  = suma de todas las distribuciones

Para la clasificación trófica basa en clorofila "a" se utilizó el mismo procedimiento. Los resultados cuantitativos se presentan en la Tabla 9.

Para la clorofila "a" los promedios geométricos de cada una de las categorías tróficas fueron un múltiplo de aproximadamente 2,4 en lagos cálidos tropicales. En la Figura 4 se presenta la distribución de probabilidad condicional para las categorías tróficas en base a la clorofila "a". Se hace notar que el número de datos fue inferior (N = 23). Es interesante observar la diferencia entre los valores promedio para fósforo total y clorofila "a" de las distintas categorías tróficas en lagos cálidos tropicales y los correspondientes a lagos templados, como puede apreciarse en la Tabla 10.

El uso de un sistema de clasificación de estado trófico para lagos/embalses no sólo tiene un interés científico sino también una aplicación gerencial, ya que los usos deseados del agua son dependientes del estado trófico y de la consiguiente calidad del agua. Por lo tanto, con la concentración de fósforo total/clorofila "a" y las Figuras 3/4 se puede determinar la probabilidad porcentual del estado trófico de un lago/embalse cálido.

## 5. Desarrollo de los modelos matemáticos simplificados

### 5.1 Desarrollo histórico (Thomann y Mueller, 1987)

Se ha hecho un esfuerzo considerable en los últimos 10-20 años para desarrollar análisis empíricos y teóricos de eutroficación de lagos que pudieran ser fácilmente aplicables. Debido a que muchos de los problemas de los lagos se han debido al fitoplancton, la mayoría de los esfuerzos hasta la fecha se han centrado en la eutroficación del lago por fitoplancton incorporando varias presuposiciones básicas en el análisis. Los modelos simplificados de fitoplancton han probado ser útiles para una primera estimación de los efectos potenciales de una reducción en la carga de nutrientes.

El acercamiento básico de varios de los modelos es el balance de masa del nutriente limitante asumido, esto es, fósforo. Se usa el fósforo total como la variable indicadora del estado trófico. Vollenweider (1968) en su primer informe, de naturaleza principalmente empírica, relacionó la carga externa del nutriente (en g/m<sup>2</sup> de área superficial del lago por año) a la profundidad del lago y notó que la población de los lagos se dividía en dos grandes áreas relacionadas con el estado de eutroficación. Desde ese primer estudio, otros investigadores (Dillon y Rigler, 1974, 1975; Rast y Lee, 1978) han continuado incorporando más datos y mecanismos adicionales y necesariamente han disminuido algunos de los niveles previos de juicio requeridos en el análisis. Estos últimos esfuerzos también han intentado, en forma semiempírica, estimar no sólo el nivel de fósforo sino también de la variable más relevante que es la clorofila del fitoplancton. Chapra y Tarapchak (1976) han resumido el esquema simplificado en los siguientes pasos:

- Estimar la carga de fósforo total al lago;
- Determinar la concentración promedio anual de fósforo total en el lago;
- Estimar la concentración de fósforo total en el lago en la primavera, a partir de la concentración promedio anual;
- Calcular las concentraciones promedio de clorofila "a" en el verano a partir de las concentraciones de fósforo total en la primavera;

Las suposiciones usadas para el análisis del modelo de balance de masa para fósforo total son:

- Lago completamente mezclado;
- Condiciones de estado de equilibrio, representado por el valor promedio estacional/anual;
- Limitado por fósforo;
- Fósforo total se usa como medida del estado trófico.

A pesar de estas suposiciones, este modelo simplificado ha producido resultados muy útiles desde el punto de vista del control de calidad de agua.

La ecuación de balance de masa para fósforo total es (refiérase a la Figura 5):

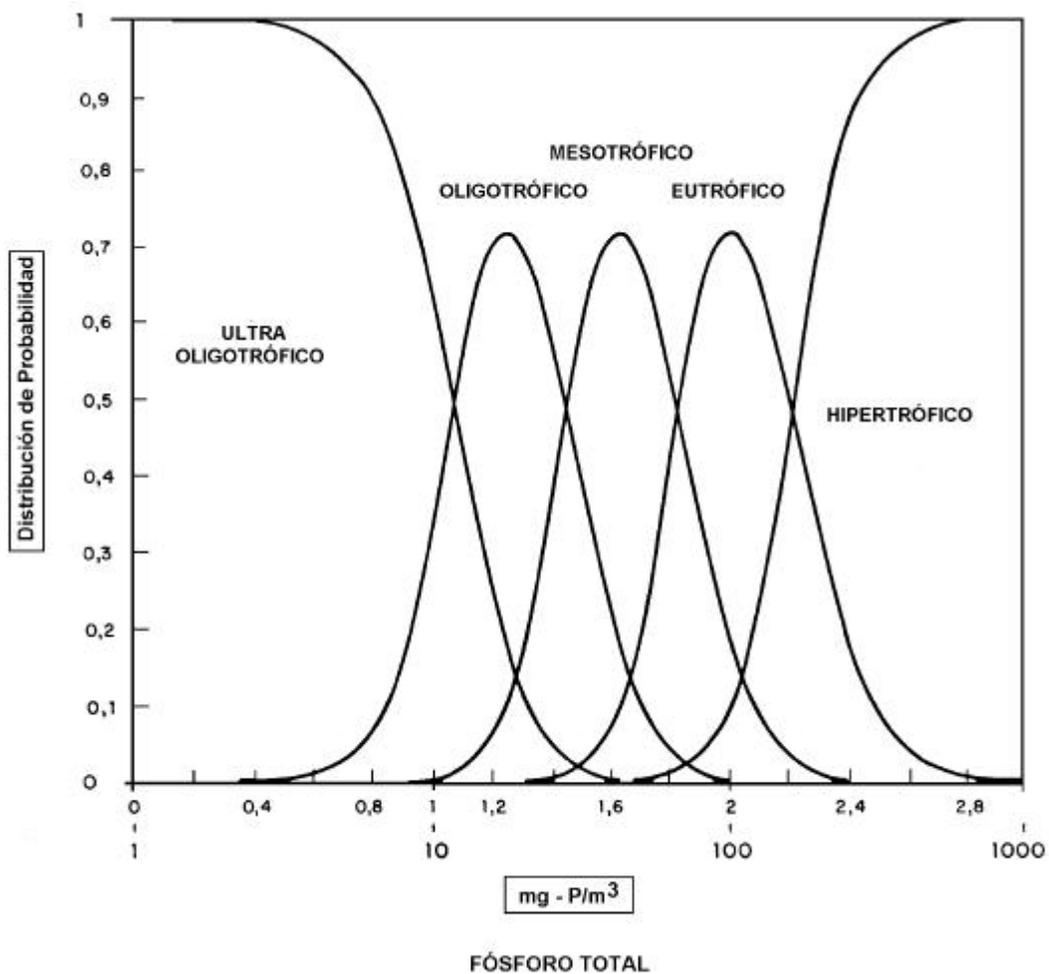
$$V \frac{dP_{\lambda}}{dt} = W - v_s A_s P_{\lambda} \quad (3)$$

o,

$$V \frac{dP_{\lambda}}{dt} = W - K_s P_{\lambda} V - Q P_{\lambda} \quad (4)$$

para

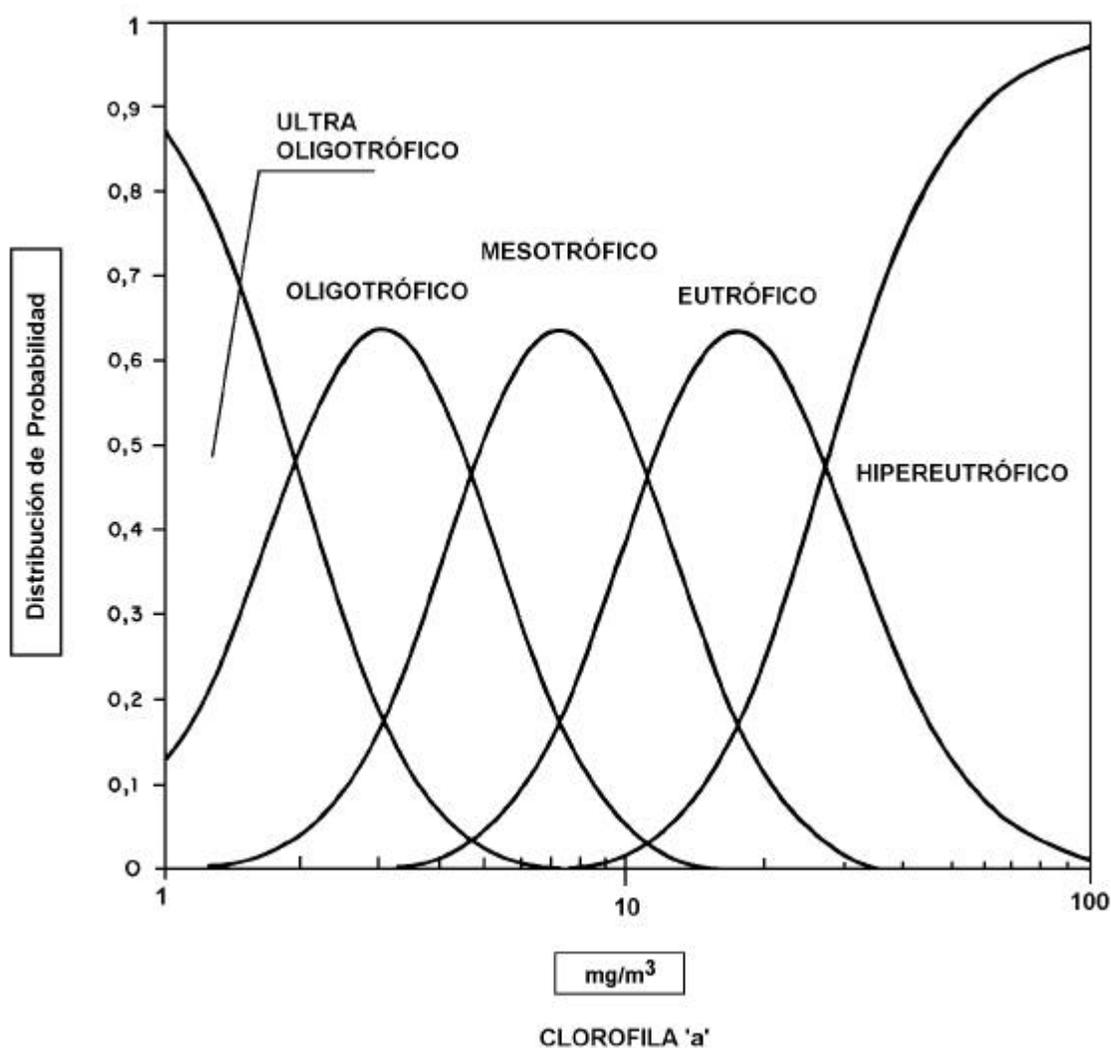
$$K_s = \frac{m}{Z} s$$



**Figura 3.- Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en fósforo total (Adaptada de Vollenweider & Kerekes (1981) con datos de lagos cálidos tropicales)**

**Tabla 9.- Sistema de clasificación de estado trófico resultados cuantitativos de clorofila "a"**

Clasificación	Prom. geométrico Cla mg/m <sup>3</sup>	Prom. logarítmico ± SE	Número de lagos	Identificación del lago/embalse
Eutrófico	17,39	1,24 ± 0,255	8	A <sub>2</sub> , A <sub>6</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , G <sub>2</sub> , L <sub>i</sub> , L <sub>p</sub> , R
Mesotrófico	6,67	0,824 ± 0,225	7	B <sub>a</sub> , B <sub>d</sub> , C <sub>2</sub> , F <sub>1</sub> , G <sub>6</sub> , I, T <sub>a</sub>
Oligotrófico	3,56	0,552 ± 0,234	8	A <sub>t</sub> , C <sub>c</sub> , C <sub>6</sub> , J, L <sub>a</sub> , N <sub>2</sub> , N <sub>6</sub> , P <sub>a</sub>



**Figura 4.- Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en clorofila 'a'**  
(Adaptada de Vollenweider & Kerekes (1981) condatos de lagos cálidos tropicales)

**Tabla 10.- Comparación de los valores promedio de las variables ( $\rho\lambda$ , Cla) utilizadas para la clasificación trófica de lagos cálidos tropicales (CEPIS) y la clasificación trófica de lagos templados (Vollenweider y Kerekes, 1981)**

Variable (Valores promedio anuales)	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
<b>CEPIS</b>			
Fósforo total			
$\bar{x}$	<u>21,3</u>	<u>39,6</u>	<u>118,7</u>
$(\text{mg/m}^3) \log \bar{x} \pm \sigma_s$	$1,328 \pm 0,165$	$1,598 \pm 0,137$	$2,074 \pm 0,316$
n	10	9	16
Clorofila "a"			
$\bar{x}$	<u>3,56</u>	<u>6,67</u>	<u>17,39</u>
$(\text{mg/m}^3) \log \bar{x} \pm \sigma_s$	$0,552 \pm 0,234$	$0,824 \pm 0,225$	$1,240 \pm 0,255$
n	8	7	8
<b>OECD</b>			
Fósforo total			
$\bar{x}$	<u>8,0</u>	<u>26,7</u>	<u>84,4</u>
$(\text{mg/m}^3) \log \bar{x} \pm \sigma_s$	$0,903 \pm 0,22$	$1,427 \pm 0,53$	$1,93 \pm 0,35$
n	21	19	71
Clorofila "a"			
$\bar{x}$	<u>1,7</u>	<u>4,7</u>	<u>14,3</u>
$(\text{mg/m}^3) \log \bar{x} \pm \sigma_s$	$0,23 \pm 0,31$	$0,672 \pm 0,20$	$1,155 \pm 0,33$
n	22	16	70

$\bar{x}$  = media geométrica;  $\sigma_s$  = desviación estándar; n = número de datos

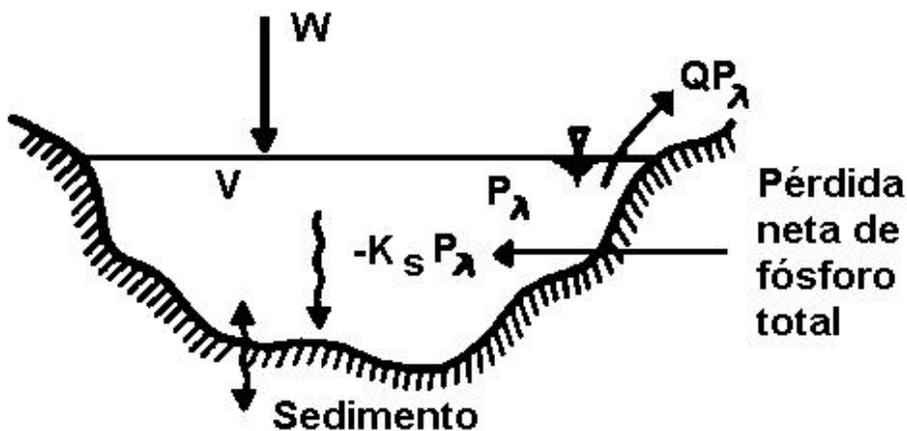


Figura 5.- Esquema del balance de masa para fósforo - lago completamente mezclado

donde,

V	=	volumen del lago [L <sup>3</sup> ]
P <sub>λ</sub>	=	fósforo (total) en el lago, [M/L <sup>3</sup> ]; por ejemplo, mg/l
Q	=	flujo de salida [L <sup>3</sup> /T]
A <sub>s</sub>	=	área superficial del lago [L <sup>2</sup> ]
W	=	fuentes externas de fósforo, [M/T]; por ejemplo, g/s
K <sub>s</sub>	=	tasa de pérdida global de fósforo total [l/T]
Z	=	profundidad promedio del lago [L]

En estado permanente, la Ecuación 3 se reduce a:

$$P_{\lambda} = \frac{W}{Q + V_s A_s} \quad (5)$$

Esta ecuación también puede expresarse usando una tasa aérea de carga:

$$L(p) = \frac{W}{A_s} \text{ [M/L}^2 \cdot \text{T, por ejemplo, g/m}^2 \cdot \text{año]} \quad (6)$$

Entonces, la Ecuación 5 sería:

$$P_1 = \frac{L(p)}{q + n_s} \quad (7)$$

donde

$q$  es la tasa de sobreflujo hidráulico ( $Q/A_s$ ) [L/T]. Una expresión alterna usando la Ecuación 4 puede derivarse como:

$$P_\lambda = \frac{L(p)}{\bar{Z} (\rho + K_s)} \quad (8)$$

donde,

$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{1}{T_w} \quad (9)$$

siendo  $t_w$  el tiempo de retención del lago.

La dificultad para usar las Ecuaciones 7 y 8 es que  $v_s$ , la velocidad neta de sedimentación, o  $K_s$ , la tasa neta de pérdida, no se conocen aún ni pueden medirse en una forma experimental directa. Sin embargo, si existe información sobre las entradas y salidas del lago, se puede hacer un estimado para  $K_s$ . Normalmente,  $K_s$  ha sido calculado aplicando la Ecuación 8, conociendo los otros parámetros.

## 5.2 Modelos de fósforo total

Los modelos simplificados probados en el Programa Regional del CEPIS para predecir la respuesta trófica de los lagos/embalses a un cambio en sus concentraciones de fósforo total, se basaron en dos tipos de relaciones:

- a. La ecuación de balance de masa tal como se presentó anteriormente y como se repite seguidamente:

$$P_\lambda = \frac{L(p)}{\bar{Z} (1/T_w + K_s)} \quad (10)$$

con una relación empírica para  $K_s$ .

- b. Ecuaciones totalmente empíricas aplicando los análisis de regresión lineal múltiple:

$$P_1 = f [L(p), T_w, \bar{Z}] \quad (11)$$

$$P_1 = CONS * L(p)^A * T_w^B * \bar{Z}^C \quad (12)$$

donde CONS, A, B y C son constantes.

Con los datos de lagos templados de la OECD, Vollenweider (1976) reportó correlaciones significativas con las siguientes relaciones:

$$K_s = f(\bar{Z}) \quad (13)$$

$$K_s = f(T_w) \quad (14)$$

Kenney (1982) cuestionó la validez de la Ecuación 13 por su auto-correlación espúrea inherente. En el Programa Regional del CEPIS no se obtuvieron correlaciones significativas con la Ecuación 6 por lo que se dejó de lado (Salas y Limón, 1985).

Otra forma de expresar la ecuación de balance de masa (Ecuación 10) es la siguiente:

$$P_1 = \frac{P_{1in}}{T_w(1/T_w + K_s)} \quad (15)$$

donde,

$P_{1in}$  = la concentración promedio afluente de fósforo total, mg/l

La solución para  $K_s$  resulta en lo siguiente:

$$K_s = \frac{1}{T_w} \left[ \frac{P_{1in}}{P_1} - 1 \right] \quad (16)$$

Por lo tanto, la correlación de  $K_s$  con  $T_w$  (véase ecuación 14) podría ser de naturaleza espuria. A fin de evitar esto, se aplicó un análisis de correlación como sigue:

$$K_s = f(TEMP) \quad (17)$$

donde

$$TEMP = \frac{P_{1in}}{P_1} - 1$$

La siguiente relación se obtuvo:

$$TEMP = 1,85 T_w^{0,420} \quad (18)$$

donde

$r^2$  = coeficiente de determinación = 0,58  
 SE = error estándar del estimado = 1,34  
 N = número de datos = 39 (27 cuerpos de agua)

Por lo tanto:

$$K_s = \frac{1}{T_w} (TEMP) = 1,85/T_w^{0,580} \quad (19)$$

lo cual puede ser sustituido ( $P < 0,05$ ) por:

$$K_s = \frac{2}{\sqrt{T_w}} \quad (20)$$

Esta relación es doble en magnitud que la desarrollada para los lagos templados de OECD,  $K_s = 1/T_w$  (Vollenweider, 1976) de forma que el  $K_s$  calculado para un lago tropical sería esencialmente el doble del de un lago templado con un tiempo de retención idéntico. Este resultado se aproxima al calculado por Castagnino (1982) en función de la mayor temperatura y tasa de crecimiento fitoplanctónico en lagos cálidos tropicales.

La sustitución de la Ecuación 20 dentro del modelo del balance de masa  $P_\lambda$  resulta en:

$$P_1 = \frac{L(p)}{\left(\bar{Z}/T_w\right)\left(1 + 2\sqrt{T_w}\right)} \quad (21)$$

Kenney (1988) ha mostrado que el estado de equilibrio sólo se consigue después de un tiempo igual a  $5 T_w$  y, como tal, dicha suposición debería revisarse cuidadosamente para lagos con tiempos de retención prolongados, especialmente en el cálculo del parámetro  $K_s$ . Como puede verse en la Figura 1, 32 de los 39 datos usados en el Programa Regional del CEPIS tenían tiempos de retención menores a un año. Asimismo, la exclusión de los datos extremos, como el Lago Tequesquitengo con un  $T_w = 98$  años, no cambió significativamente (95% nivel de confianza) la Ecuación 20. Sin embargo, los autores reconocen la validez de las preocupaciones de Kenney (1988) para lagos con tiempos de retención largos.

La ecuación de regresión múltiple para fósforo total (aproximación totalmente empírica) producto de una regresión "stepwise" con todas las variables independientes disponibles es (ver la Figura 6):

$$P_1 = 0,290 L(p)^{0,891} T_w^{0,676} / \bar{Z}^{0,934} \quad (22)$$

$$r^2 = 0,902 \quad ; \quad SE = 0,044 \quad ; \quad N = 39$$

La intercorrelación entre las variables independientes no es significativa, como muestra la matriz de correlación en la Tabla 11.

Con el propósito de simplificar y facilitar su presentación gráfica, se reorganizó la Ecuación 22. Los valores de los coeficientes obtenidos se modificaron dentro de los límites de sus intervalos de confianza (prueba de t- student,  $P < 0,05$ ) para obtener la siguiente relación:

$$P_1 = \frac{L(p)}{\bar{Z}} * \frac{T_w^{3/4}}{3} \quad (23)$$

Para probar la habilidad de las ecuaciones de predecir acertadamente los niveles de fósforo, se compararon las correlaciones entre las concentraciones de fósforo total calculadas y medidas (ver la Tabla 12). La diferencia entre los dos errores estándar no es significativa (prueba de Mann-Witney,  $P < 0,05$ ). Las concentraciones de fósforo estimadas por los modelos no son sesgadas para el rango total de los valores medidos (los valores de pendientes no son significativamente diferentes a 1,0).

La Figura 7 presenta la relación de la carga superficial de fósforo observada [ $L(p)$ ,  $g/m^2$ -año], la profundidad promedio ( $Z$ , m) y el tiempo de retención ( $T_w$ , años) de los datos usados para desarrollar los modelos de fósforo total ( $P_\lambda$ ,  $g/m^3$ ). Superimpuesta en esta figura está la ley de 3/4 (Ecuación 23) para los límites fijos tentativos de 0,030 y 0,070 mg/l que separan las clasificaciones oligotróficas/mesotróficas y mesotróficas/eutrólicas, respectivamente, que fueron tomadas de la intercepción de sus respectivas curvas en la Figura 3. Aplicando el concepto de carga de la OECD, se puede utilizar este gráfico para estimar rápidamente el estado trófico de un lago/embalse tropical cálido dado, usando los tres parámetros independientes mencionados.

Se hace notar que tanto los límites numéricos de clasificación trófica como los modelos matemáticos desarrollados para lagos cálidos tropicales difieren significativamente de aquéllos desarrollados para lagos templados.

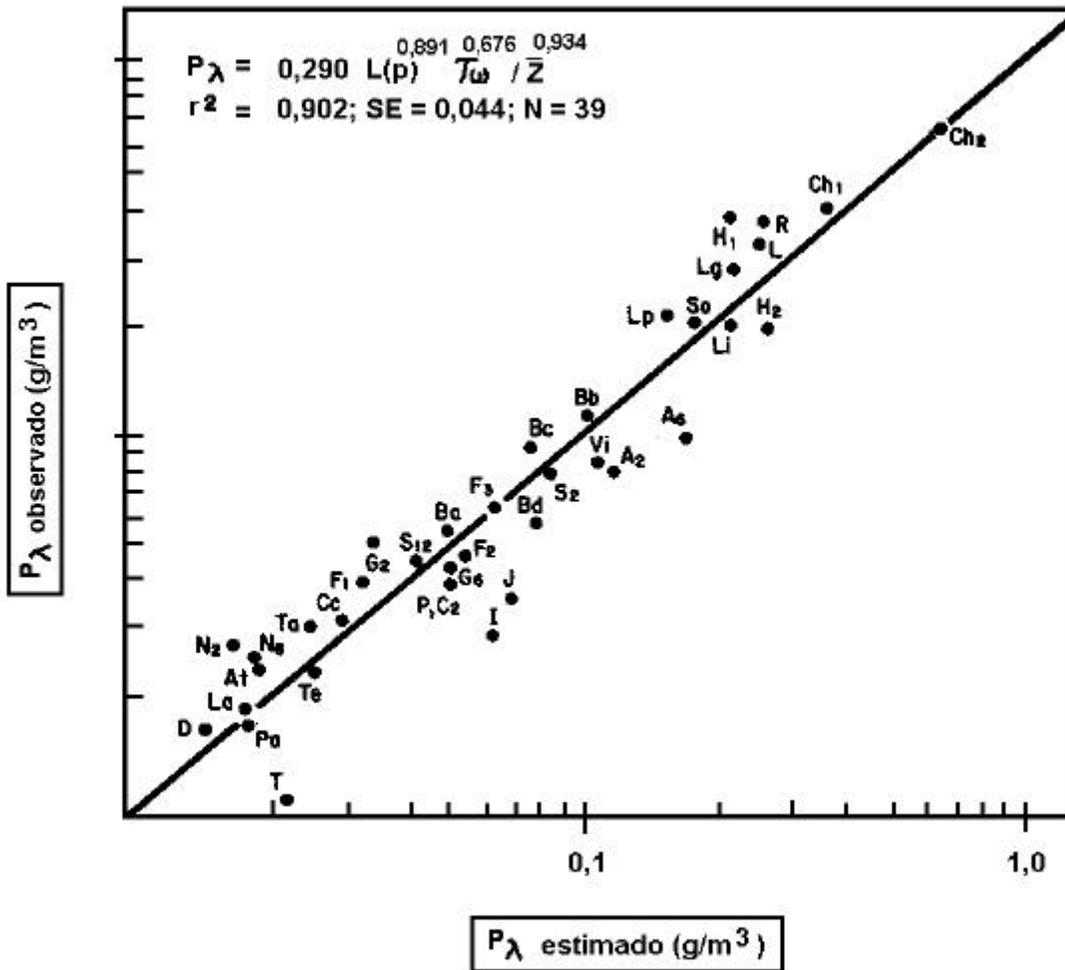


Figura 6.- Comparación de fósforo total observado y calculado

Tabla 11.- Matriz de correlación de logaritmos

Variables	Coeficientes de correlación		
	$\underline{L(p)}$	$\underline{T_w}$	$\underline{Z}$
L(p)	1.000	0.673	0.144
$T_w$		1.000	0.248
$Z$			1.000

Tabla 12.- Comparación estadística de las ecuaciones de fósforo total contra datos observados

Valores de correlación entre las concentraciones de fósforo total medidas y las calculadas con las distintas ecuaciones. La estimación del error incluye la pendiente de la línea de regresión (S) y el error estándar (o raíz cuadrada del error promedio de la estimación (SE)).

## Grupos de datos latinoamericanos

Modelo de ecuaciones	N	Coeficiente de Correlación	Estimados de error	
			S	SE
$P_1 = 0.290 L(p)^{0.891} T_w^{0.676} / \bar{Z}^{0.934}$	39	0.950	1.00	0.0541
$P_1 = \frac{L(p)}{\bar{Z}} * \frac{T_w^{3/4}}{3}$	39	0.949	0.895	0.0486
$P_1 = \frac{L(p)}{(\bar{Z}/T_w)(1+2\sqrt{T_w})}$	39	0.944	0.909	0.0524

## Grupos de datos africanos

$P_1 = 0.290 L(p)^{0.891} T_w^{0.676} / \bar{Z}^{0.934}$	15	0.885	0.877	0.0848
--	----	-------	-------	--------

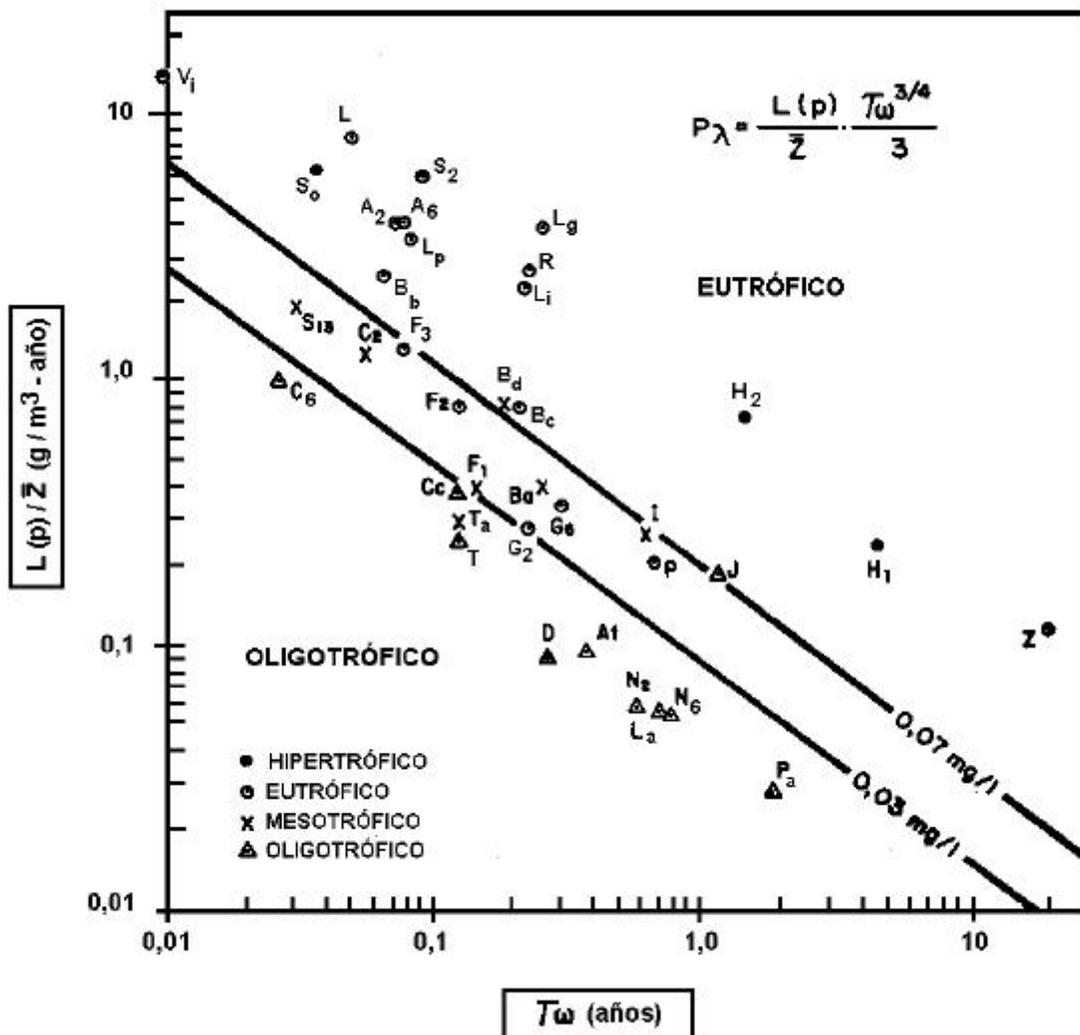


Figura 7.-  $L(p) / \bar{Z}$  vs  $T_w$  de datos observados de América Latina y categorías tróficas definidas cualitativamente

### 5.3 Verificación del modelo de fósforo total

La capacidad del modelo empírico desarrollado por el CEPIS (Ecuación 22) para predecir las concentraciones de fósforo total se probó con la serie de datos de otros cuerpos de agua cálidos tropicales de África (Water Research Commission and National Institute for Water Resources, 1980). El desempeño del modelo contra dichos datos se puede calificar de bueno, lo que se confirma aún más por la alta correlación obtenida entre los valores de fósforo medidos y calculados, y cuyas pendientes no se diferencian significativamente del modelo del CEPIS, como se puede apreciar en la Tabla 12.

El sistema del CEPIS de clasificación trófica basado en fósforo total se aplicó a los lagos africanos y se comparó con las clasificaciones de estado trófico reportadas por los investigadores africanos (Water Research Commission and National Institute for Water Research, 1980), como se muestra en la Tabla 13. Asimismo, como puede verse en la Figura 8, las clasificaciones tróficas reportadas se superimpusieron en la Figura 7, y de esta forma, se compararon con la aplicación de la ley de 3/4 (Ecuación 23) a los límites numéricos fijos de las distintas categorías tróficas. La concordancia general de las categorías reportadas con aquéllas estimadas por las curvas de probabilidad, confirma la universalidad del sistema del CEPIS, y por lo tanto, su utilidad como una herramienta de predicción para determinar el estado trófico de cualquier lago/embalse cálido tropical.

### 5.4 Modelo preliminar de clorofila "a"

La clorofila "a" es un estimador útil y simple de la densidad del fitoplancton y ha sido ampliamente utilizado en los modelos como el parámetro más pertinente para predecir la densidad de algas en lagos.

La evidencia de una estrecha relación entre la clorofila "a" y la concentración de fósforo total en la mayoría de los lagos templados ha sido reportada por Dillon y Rigler, 1974; Chapra y Tarapchak, 1976; Smith y Shapiro, 1981; OECD, 1982; entre otros. Sin embargo, los modelos de clorofila "a" versus fósforo pueden no ser buenos indicadores de la relación entre los niveles de algas y nutrientes en los lagos limitados por nitrógeno con relaciones de  $N_x/P_x$  menores a 10 (Dillon y Rigler, 1974; Canfield, 1983).

**Tabla 13.- Comparación de las clasificaciones de estado trófico de embalses cálidos tropicales africanos (Tomado del Water Research Commission and National Institute for Water Research, 1980)**

Lago-Represa	Símbolo	Clasificación reportada	Clasificación CEPIS (% probabilidad)				
			UO	O	M	E	HE
Bospoort	Bo	E	0	2	44	51	3
Bronkhorstpruit	Br	M	0	3	53	42	2
Loskop	Lo	E*	0	14	73	13	0
Olifantsnek	O	O-M	0	11	73	16	-
Rust der Winter	Rw	M	1	32	61	6	0
New Doringpoort	Nd	O-M	0	1	31	64	4
Rietvlei	Ri	HE	0	1	36	60	3
Roodeplaat	Ro	E	0	1	40	57	2
Albert Falls	Af	O	43	55	2	0	0
Hazelmere	Ha	-	0	13	72	15	0
Henley	He	O-M	6	58	36	0	0
Midmar	Mi	O	37	57	6	0	0
Nagle	Na	O	52	47	1	0	0
Vernon Hoper	Vh	E	0	1	38	59	3
Nahoon	Nh	E	0	0	0	2	98

HE = Hipereutrófico; E = Eutrófico; M = Mesotrófico; O-M = Oligo-mesotrófico; O = Oligotrófico; UO = Ultraoligotrófico; - Ninguna clasificación reportada

\* Basado en el contenido de fitoplancton (contenido de nutrientes más bajo).

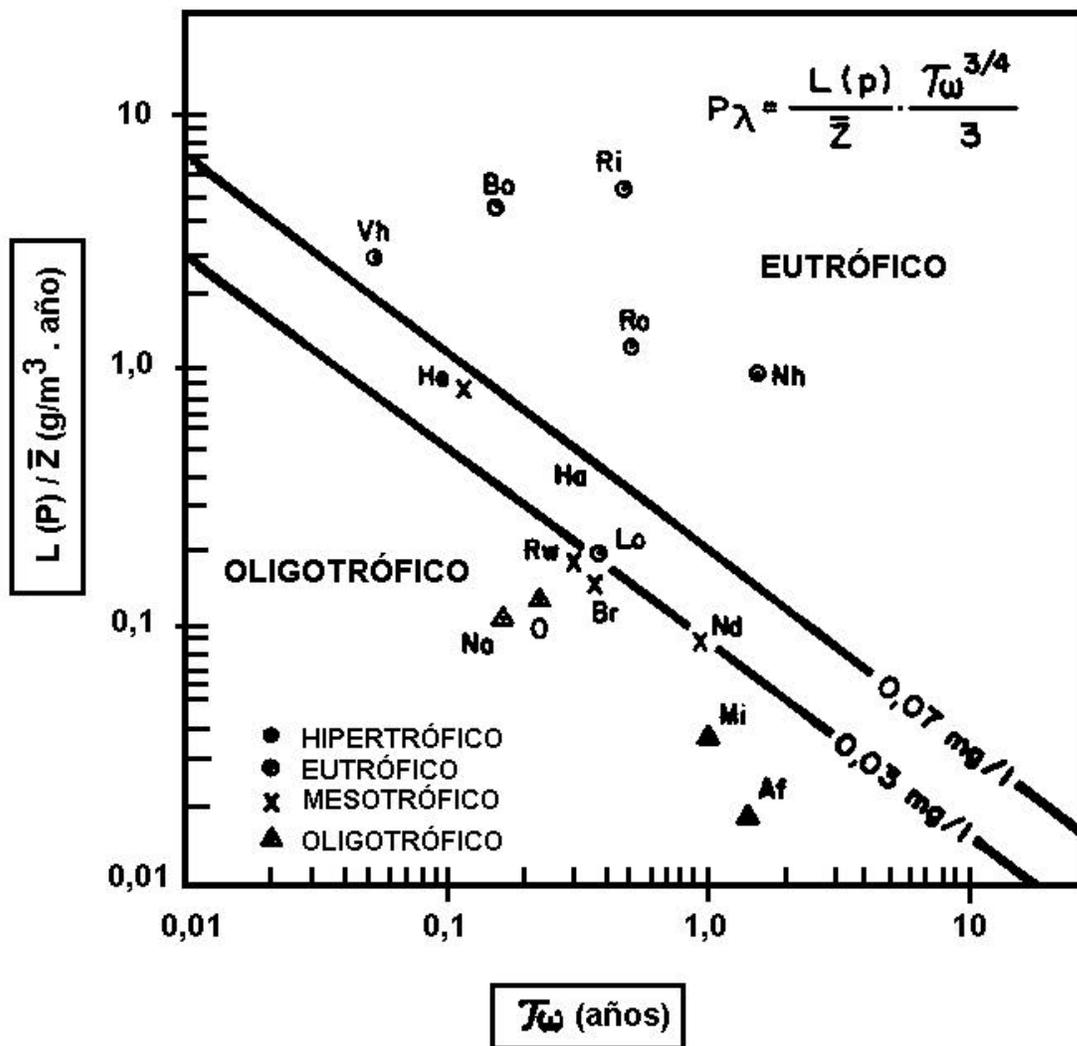


Figura 8.-  $L(p) / Z$  vs  $T_w$  para datos observados de embalses cálidos de Sud África y categorías tróficas definidas cualitativamente

Un análisis de la regresión lineal de clorofila "a" superficial versus los datos de fósforo total, utilizando todos los datos disponibles no resultó en una correlación estadísticamente significativa. La revisión de la base de datos resultó en la eliminación de:

- Lagos con un tiempo de retención excesivamente corto (2 datos:  $S_a, V_i$ )
- Lagos muy eutróficos limitado por nitrógeno con una relación  $N_i/P_\lambda < 10$  (5 datos:  $Ch_1, Ch_2, L_i, L_p, R$ ) (véase la Figura 2)
- Datos cuyos valores quedaban excluidos de los intervalos del 95% de confianza de la regresión (3 datos:  $S_{13}, S_2, T_e$ )
- Lago Barra Bonita durante los años 1982-84. En 1982 y 1984 se desvió un 50% de las aguas residuales de la ciudad de Sao Paulo y en el período de mayo 83 a enero 84 todas las aguas residuales se desviaron a este embalse, por lo que los datos de clorofila no son representativos (datos:  $B_b, B_c$ )

La ecuación de regresión del modelo estadísticamente significativa (ver Figura 9) es:

$$Cla = 332 P_1^{1,21} \quad (24)$$

$$r^2 = 0,592; SE = 4,064; N = 20$$

En el análisis de la regresión lineal de la clorofila "a" superficial versus los datos de nitrógeno se eliminaron los lagos Santana y Vigario por las razones mencionadas (bajo  $T_w$ ) y hubo dos "outliers" (datos  $T_e, G_2$ ) según el test de Rosner's (Gilbert, 1987). Para los datos de Barra Bonita excluidos anteriormente, no se midió nitrógeno. La ecuación del modelo es (ver Figura 10):

$$Cla = 8,60 N_1^{1,47} \quad (25)$$

$$r^2 = 0,564; SE = 4,574; N = 22$$

Se enfatiza que, a fin de establecer relaciones estadísticas confiables, tradicionalmente se ha establecido 30 como el número mínimo de datos requeridos. De esta forma, las relaciones anteriores se consideran preliminares y se requiere más datos antes de su aplicación como herramientas confiables en el proceso de planificación.

### 5.5 Modelo preliminar de nitrógeno total

El papel del nitrógeno como un nutriente limitante para aquellas cuencas dominadas por fuentes puntuales y los resultados precedentes del modelo preliminar de clorofila "a", impusieron el desarrollo de un modelo de nitrógeno total para lagos cálidos tropicales.

Los intentos iniciales para aplicar la ecuación de balance de masa fallaron porque no parece existir una relación estadísticamente significativa de la tasa de sedimentación del nitrógeno como función de la profundidad o del tiempo de retención, aunque la relación con la tasa de sedimentación es de naturaleza espúrea.

Un análisis de regresión lineal múltiple ("stepwise") se aplicó a los 24 datos completos disponibles. (Se excluyó Laguna Grande de Venezuela por la baja confiabilidad de los datos de nitrógeno) y la ecuación de mejor ajuste para nitrógeno total (ver la Figura 11).

$$N_1 = 0,724 L(n)^{0,440} T_w^{0,272} / \bar{Z}^{0,522} \quad (26)$$

$$r^2 = 0,724; SE = 0,291; N = 24$$

Como en el caso del modelo de clorofila "a", debido a la base de datos limitada, este modelo es considerado como preliminar y requiere mayor desarrollo.

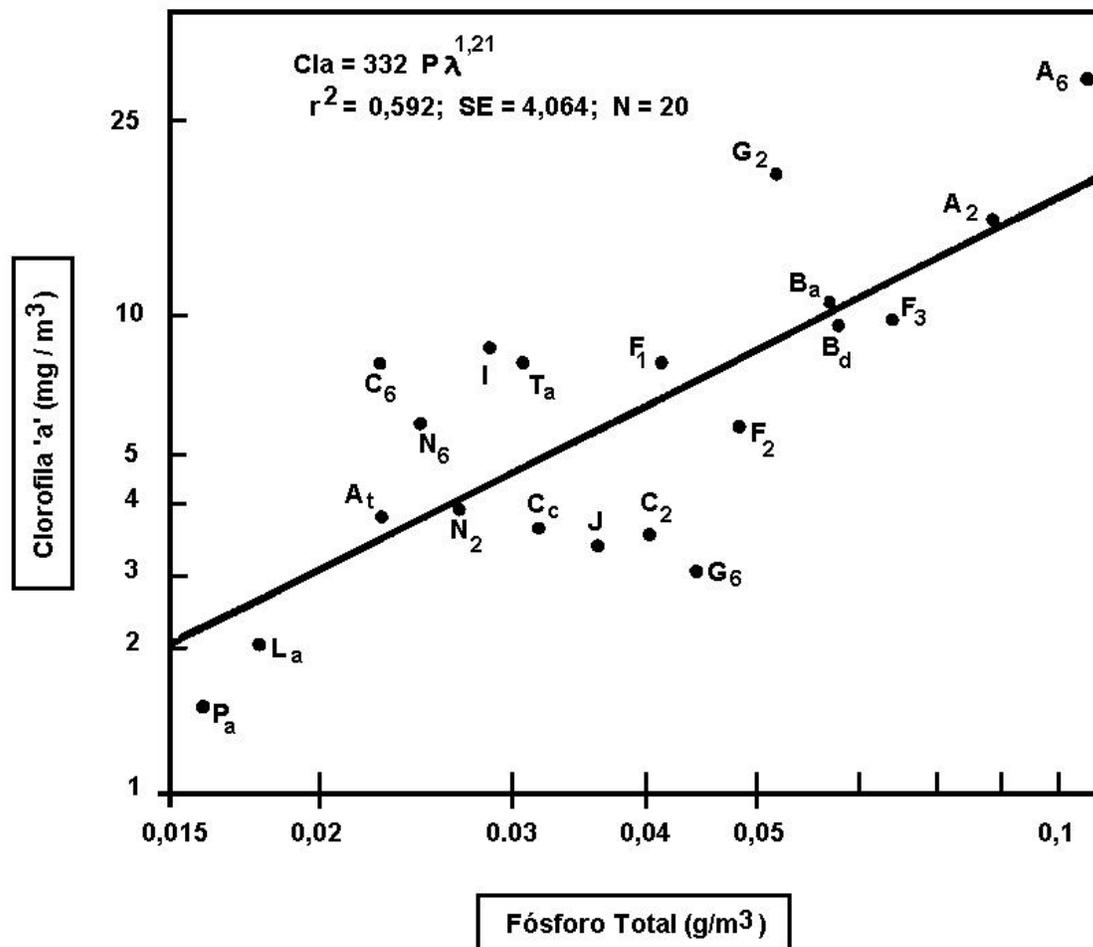


Figura 9.- Clorofila 'a' vs. fósforo total

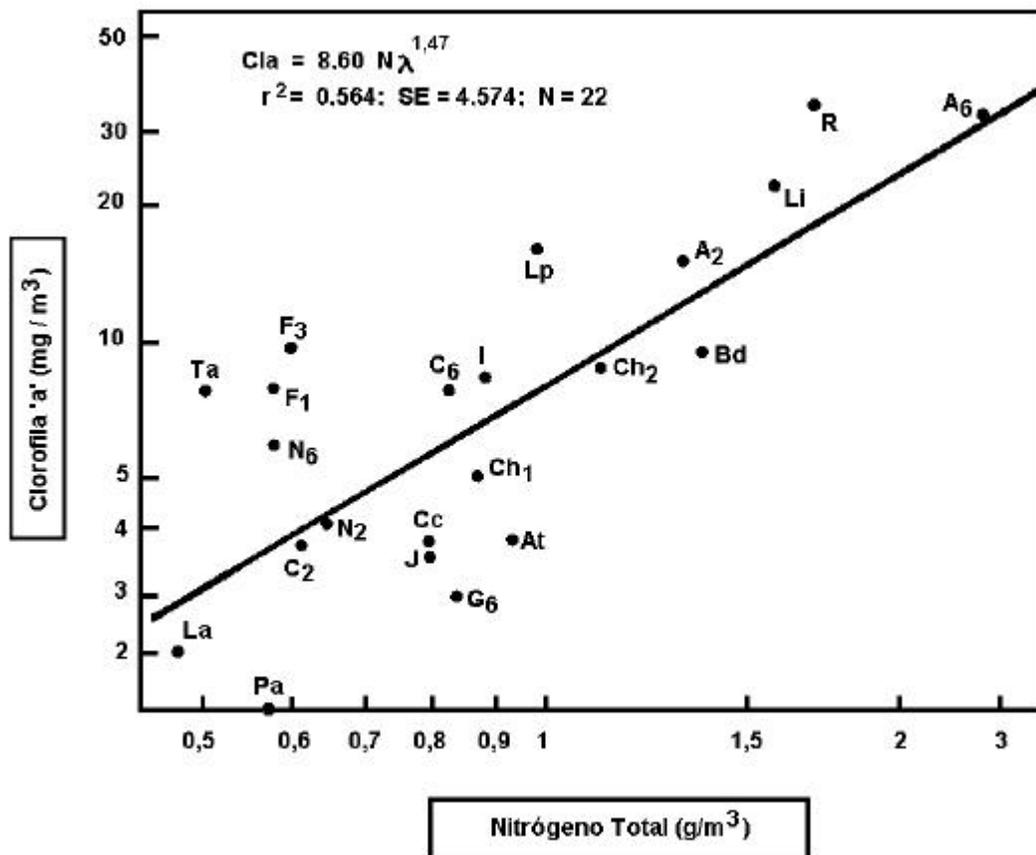


Figura 10.- Clorofila 'a' vs. nitrógeno total

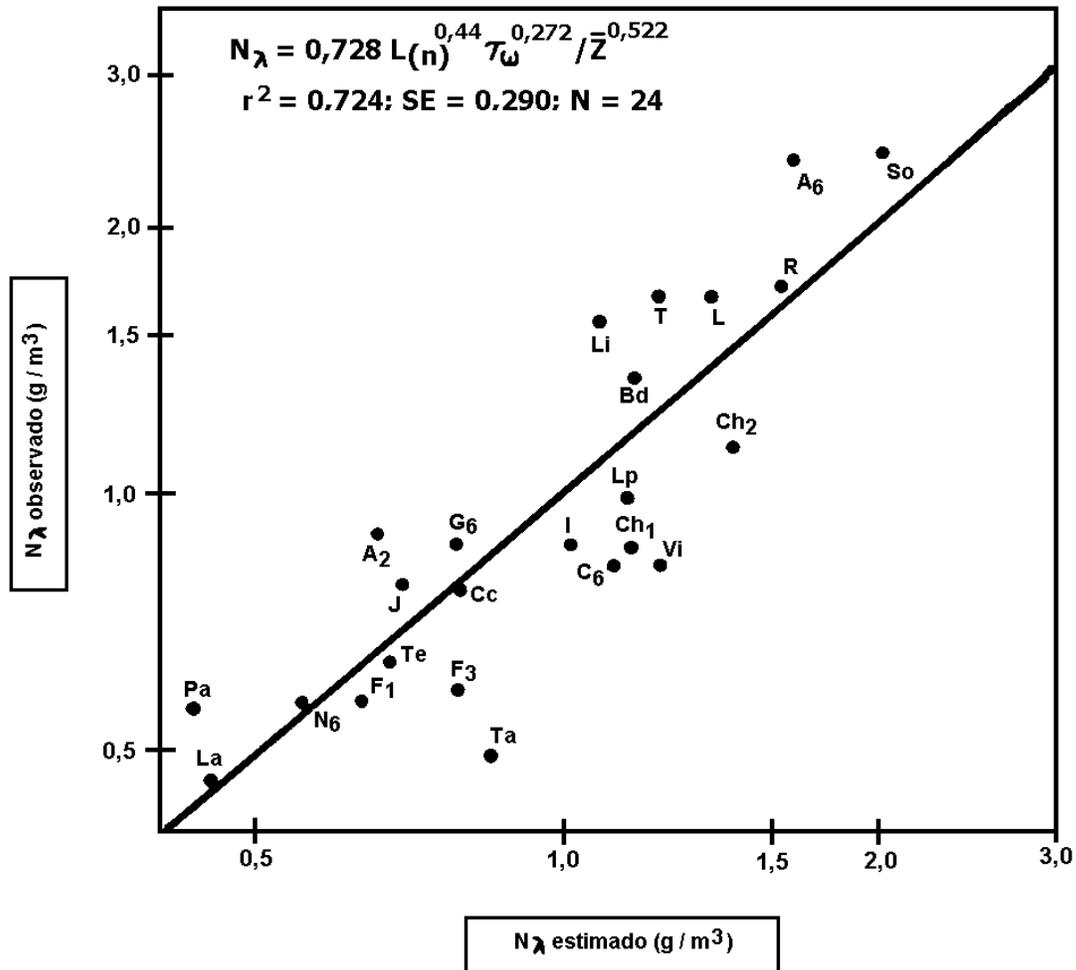


Figura 11.- Comparación de los valores observados y calculados de nitrógeno total

## 5.6 Consideraciones sobre las restricciones de los modelos

El empleo de modelos matemáticos permite predecir los impactos en la calidad del agua debidos a un cambio de actividades en la cuenca y, de esta forma, establecer las prioridades de desarrollo en función de los usos deseados del recurso hídrico.

El modelo matemático simplificado para la evaluación de la eutroficación en lagos cálidos tropicales desarrollado por el CEPIS, es una herramienta útil para la gestión y planificación práctica de los lagos/embalses cuyas condiciones hidrológicas, climáticas y limnológicas están incluidas en el universo de datos utilizado para su desarrollo (ver la Tabla 4). Sin embargo, para su utilización, además de un conocimiento exhaustivo de las características del lago y su cuenca, es necesario un análisis de las restricciones del modelo.

En las secciones 5.1 y 5.2 se evaluaron las suposiciones y limitaciones del modelo de balance de masa del elemento limitante. En general, se asume que las condiciones tróficas de un lago cambian de acuerdo a la carga de nutrientes. Sin embargo, se debe tener en cuenta cierto grado de incertidumbre en la estimación de la carga promedio anual de nutrientes. La principal causa es el error introducido en la determinación de las cargas dispersas mediante el uso de coeficientes de exportación. Para reducirlo, Grobler y Silberbauer (1985a) proponen un modelo que incluye el efecto de la escorrentía, aspectos geológicos y la contribución relativa de cargas puntuales versus cargas dispersas.

La clasificación trófica permite establecer la probabilidad de un determinado estado trófico en un lago, y así seleccionar medidas de control más o menos restrictivas según el uso destinado al recurso.

En ocasiones, la respuesta trófica de los lagos/embalses no es la esperada por el modelo. Las causas pueden ser diversas y, cara a la gestión, es importante tener en cuenta las consideraciones incluidas en el proyecto OECD (1982), que son aplicables a los lagos cálidos tropicales:

- Los gastos biológicos pueden modificar el contenido de nutrientes y por lo tanto la respuesta trófica. Por ejemplo, en ausencia de predación, la población de zooplancton reduce la densidad del fitoplancton produciendo valores de clorofila "a" inferiores a los esperados.
- Los macrófitos, no incluidos en el modelo, pueden actuar como "bombas" de carga interna, liberando periódicamente concentraciones apreciables de fósforo.
- La sedimentación se verá afectada por el tipo de algas. Las diatomeas, por ejemplo, remueven el fósforo hacia los sedimentos a una tasa superior a la de las algas verdes y azules.
- En lagos con elevado contenido de ácidos húmicos ("lagos coloreados"), la fracción de fósforo no disponible biológicamente es mayor.
- La liberación de fósforo sedimentario en lagos anóxicos puede suponer una contribución significativa de la carga interna que no se considera en el modelo.
- Una morfometría compleja puede producir desbalances localizados en la concentración de nutrientes y se requiere de un mayor número de estaciones de muestreo.
- Una elevada variabilidad anual en la escorrentía y aporte de nutrientes no queda reflejada en los valores promedio anuales. La imprecisión sólo se limita con una mayor frecuencia de muestreo.

En general, es conveniente realizar investigaciones limnológicas que recojan series temporales de muestreos interanuales para formular medidas de control adecuadas para cada caso.

## 6. Otras variables de calidad de agua para evaluar la eutroficación

### 6.1 *Macrófitos*

La proliferación de plantas acuáticas en los lagos cálidos tropicales, como por ejemplo de la especie bien conocida *Eichhornia crassipes* (jacinto o lirio de agua), produce problemas tanto en la operatividad de las plantas de tratamiento como en el ecosistema acuático (reducción de la vida útil de los embalses mediante evapotranspiración y acumulación de material vegetal en los sedimentos, etc.). Además, su descomposición incorpora una carga orgánica adicional a la columna de agua que puede resultar en un desequilibrio del oxígeno disuelto en el hipolimnión, con la consiguiente alteración de la cadena trófica (mortalidad de peces) y problemas en la potabilización del agua.

El control de este problema, discutido extensivamente durante el transcurso del Programa Regional, se ha basado en dos acercamientos:

- a. Control directo y/o remoción de las plantas acuáticas del cuerpo de agua.
  - b. Control a largo plazo basado en la reducción de nutrientes.
- a. El control directo de las plantas acuáticas puede realizarse mediante:
- remoción manual o mecánica;
  - control químico;
  - control biológico

El control químico con herbicidas implica un peligro al ecosistema y la calidad de agua, por lo que no se considera recomendable para embalses destinados al suministro de agua potable. La remoción manual o mecánica presenta la ventaja de una eliminación de la biomasa vegetal del cuerpo de agua y, en algunas ocasiones, la relación costo/beneficio permite que pueda ser utilizada para compost, biogás y/o complemento de la alimentación animal. El control biológico supone la introducción de especies de insectos o peces que reducen la densidad poblacional de la vegetación. En este último caso, se debe considerar cuidadosamente el impacto potencial en el balance ecológico del sistema acuático.

El Programa Regional ha recomendado la metodología más utilizada en la Región, que es la remoción manual y/o mecánica. Se ha sugerido también profundizar en la investigación del control biológico por medio de peces herbívoros y parásitos vegetales autóctonos.

Como ejemplo del éxito en la erradicación del jacinto (*E. crassipes*), es interesante analizar la experiencia mexicana en la presa de Endhó (Lara Hernández y Martínez, 1988) donde la cobertura del carófito, además de los problemas señalados, suponía un grave problema sanitario al ser habitat de grandes densidades de culícidos, vectores de enfermedades (*Culex sp.*, *Culiseta sp.*). Por las características limnológicas de la presa (profundidad, tamaño) y el uso requerido como laguna de tratamiento de aguas residuales, se optó por un método mecánico de trituración utilizando maquinaria de patente nacional.

En Honduras, asimismo, se ha logrado un control manual de la población de *E. crassipes* en el embalse de Los Laureles, favorecido por las características morfométricas del embalse (pequeño tamaño) y la variabilidad climática estacional.

- b. El control de nutrientes a largo plazo requiere la aplicación de mejores prácticas de manejo en el uso del terreno y la reducción, con posibilidad de tratamiento terciario, de los efluentes industriales y municipales. El objetivo de los programas de control debe ser la acción combinada de este tipo de control preventivo junto a los métodos de control correctivo.

Los datos disponibles de cobertura y biomasa de macrófitos en el Programa Regional fueron insuficientes para incorporarlos como parámetros en los modelos matemáticos simplificados desarrollados, ya que solamente se reportó información para un número muy reducido de lagos.

Canfield, et al. (1983) advierten del peligro de una subestimación en la respuesta trófica de lagos/embalses de profundidad somera y elevada cobertura de macrófitos. Para la clasificación trófica de estos lagos proponen añadir la concentración de nutrientes contenidos en los macrófitos al valor observado en la columna de agua.

El problema sería el error asociado a la estimación de la biomasa de macrófitos, por ser un proceso laborioso que requiere gran número de muestras y, principalmente, la sobreestimación en la carga, al asumir un reciclaje del 100% de la planta a la columna de agua.

En cualquier caso, en aquellos lagos de la Región donde los macrófitos son un componente importante del sistema, se requieren programas de muestreo que al menos estudien la evolución anual en su cobertura.

## 6.2 Trihalometanos (THMs)

Para la evaluación de la eutroficación sería importante seleccionar variables de calidad de agua que reflejen los efectos cuantitativos de este proceso en la salud humana; como por ejemplo, los compuestos químicos halogenados (trihalometanos) o la presencia y densidad de algas productoras de toxinas como microcysts sp.

Los compuestos trihalometanos (THMs), producto de la reacción del cloro aplicado durante el proceso de desinfección y los materiales orgánicos contenidos en el agua, constituyen un riesgo para la salud humana.

Los principales THMs son: el cloroformo, bromoformo, bromodichlorometano y dibromoclorometano, siendo sus precursores en la columna de agua los compuestos orgánicos, principalmente ácidos húmicos producidos por descomposición de la materia vegetal.

Los efectos cancerígenos de estos compuestos hallados en investigaciones con animales (ratas y ratones), han llevado a diversos países a la adopción de valores límites máximos aceptables para el agua potable (Tabla 14).

**Tabla 14.- Valores límites de THMs admitidos por algunos países y la Organización Mundial de la Salud (Salameh, 1987)**

País	Concentración	Valor referido a:
Canadá	350 µg/l	
Alemania Occidental	25 µg/l	Efluente de tratamiento
Suecia	1 µg/l	
Estados Unidos	100 µg/l	Conexión domiciliar del usuario
OMS	30 µg/l	Sólo referido a cloroformo

Los valores son referidos a la conexión domiciliar, como en el caso de Estados Unidos, porque su formación continúa mientras existan residuos de cloro presentes en el agua.

AWWA (American Water Works Association) ha publicado un pequeño documento contestando una serie de preguntas básicas en cuanto a los THMs, en el cual se resume la ley federal de Estados Unidos (EPA) y diversas opciones de tratamiento (AWWA, 1980). Se presentan las opiniones agrupadas en dos categorías:

- i. la remoción de los precursores de los THMs previa a la cloración, y
- ii. el uso de desinfectantes alternativos que no producen THMs.

Entre ellas se incluyen:

- Retrasar el momento de aplicación del cloro dentro del proceso de tratamiento para que se elimine la mayor parte de precursores de THMs antes de la cloración.
- Si se aplica el cloro después de la coagulación y sedimentación, mejorar los procesos para optimizar la remoción de precursores.
- Usar carbón activado granular o pulverizado para remoción de precursores antes de la cloración.
- Mejorar la calidad del agua cruda o seleccionar una fuente alternativa de agua que contenga menos precursores.
- Usar una combinación de las otras opciones junto con una reducción en la dosis de cloro, siempre y cuando no afecte adversamente la desinfección.

Como desinfectantes alternativos incluyen: cloraminas, dióxido de cloro libre de cloro y ozono.

En cada caso es necesario realizar un análisis de las opciones disponibles estimando los costos de cada una de ellas. AWWA señala como medidas que requieren menor inversión y que no incrementan significativamente los costos: un retraso en el punto de aplicación de cloro durante el proceso de tratamiento y/o el empleo de desinfectantes alternativos.

En condiciones de emergencia, una medida práctica, aunque consume energía, es hervir el agua durante 4 a 5 minutos; de esta forma se elimina la mayor parte de los THMs que contiene.

Graham, et al. (1989) en investigaciones experimentales hallaron que la formación de THMs se reduce considerablemente por aplicación de dióxido de cloro y ozono o reduciendo la dosis de percolación. Adicionalmente, consiguieron mayor reducción disminuyendo el período de contacto, tras la cloración entre el cloro libre y el agua tratada (por ejemplo, provocando la formación de cloro combinado por reacción de cloro libre y sulfato de amonio).

Se requiere mayor investigación sobre los compuestos halogenados (de los que THMs constituyen una sola parte) presentes en el agua y sus efectos para la salud, mediante investigaciones epidemiológicas. Asimismo, es importante medir la severidad del problema en los lagos/embalses cálidos tropicales de la Región.

## **7. Formulación de políticas de control**

Los programas de control de eutrofización parten de una cuantificación previa de las fuentes de nutrientes puntuales y dispersas que llegan a los lagos/embalses.

En muchas ocasiones, por la dificultad de determinar las cargas dispersas de nutrientes, se formulan estándares de calidad para fuentes puntuales, ignorando la importancia relativa de estas fuentes frente a las dispersas. La aplicación de estos estándares en cuencas dominadas por fuentes dispersas no será efectiva y supondrá un costo inútil en el programa de control. Sólo cuando se consideran todas las fuentes, los programas de control son realistas.

El gestor debe contar con elementos útiles y fáciles de emplear para un diagnóstico de la situación, como son la clasificación trófica y los modelos simplificados propuestos en este documento y debe apoyarse en los profesionales con conocimiento exhaustivo de los sistemas acuáticos involucrados y que mejor pueden evaluar el alcance del problema y la aplicabilidad del modelo a cada caso concreto.

Hay una serie de consideraciones que se deben tener en cuenta para la formulación de estándares de calidad como son:

- La calidad del agua deseada dependerá del uso requerido para el recurso y aún así variará en distintas áreas geográficas y países. Para que la estrategia de control sea eficaz se deben conocer los niveles de carga natural de los sistemas con el objeto de evitar la adopción de estándares inaplicables. Este fue el caso del estándar para  $P_{\lambda}$  de EPA (0,025 mg/L) promulgado para Puerto Rico en que los niveles naturales de base de  $P_{\lambda}$  en los cuerpos de agua de esta isla tropical excedían esta norma.
- Los objetivos de calidad se desarrollarán en función de los usos múltiples y éstos serán seleccionados por los beneficiarios del recurso.
- Se deben conocer las características limnológicas particulares de cada lago/embalse, particularmente aquéllas que mayor afectan la restauración del sistema como son: el tiempo de retención, el equilibrio sedimentario y anoxia en el hipolimnión, por su influencia en la carga interna de fósforo, y la variación anual de la escorrentía.
- Los programas de control deben contemplar un manejo integral de ordenamiento de la cuenca que incluya fuentes puntuales y dispersas. Sin embargo, en la selección de las estrategias se deben evaluar los costos del control puntual frente al disperso y la factibilidad que se cumplan las mejores prácticas de manejo agrícola y ganadero propuestas en la zona. También se debe determinar quiénes pagarán los costos de las distintas medidas de control propuestas.
- Es importante conocer el nutriente limitante de la producción primaria del sistema, sobre el cual normalmente se efectúa el control. Sin embargo, en casos en los que el nitrógeno limita, no siempre es conveniente su control ya que esto puede resultar en la formación de algas verde-azules potencialmente tóxicas por su capacidad de fijar nitrógeno de la atmósfera. También los factores económicos pueden determinar la conveniencia del control del nutriente, que no limita actualmente, a niveles que sí limitaría en el lago/embalse.
- Cualquier medida de control debe prever el desarrollo demográfico y económico futuro en la cuenca al establecer dónde se efectuará el control de las fuentes para mejorar la calidad. Existen metodologías para estimar la distribución de la carga en la cuenca (Thomann y Mueller, 1987).
- Se ha establecido considerable polémica en cuanto a la implantación legal de valores estándares fijos, como límite de la concentración de fósforo permitida en los efluentes. El problema es el elevado costo económico de una medida que ignora la capacidad de respuesta individual de los lagos/embalses. Sería lógico y práctico establecer una carga máxima a ser distribuida entre las fuentes en la cuenca concordante con el uso del lago.
- Para una ventajosa relación beneficio/costo los estándares elegidos han de ser flexibles y susceptibles de modificación posterior.

Considerando el ejemplo sudafricano, donde existe un gran número de embalses cálidos tropicales, la legislación limita la concentración de fosfato en los efluentes domésticos e industriales a 1mg/l de ortofosfato disuelto expresado como mg-P/l para todos los cuerpos de agua del país. Grobler y Silberbauer (1985b) analizaron los efectos a largo plazo de dicha medida y las proyecciones para el año 2000 de 19 embalses, en cuanto a la promulgación o no de la ley, indicaron que no existe justificación para imponer un estándar uniforme de fosfato para todos los lagos sudafricanos, ya que, entre otras causas, existe una clara influencia del porcentaje de fuentes puntuales versus dispersas en el éxito de la medida.

## **8. Conclusiones y recomendaciones**

- 8.1 Usando el concepto de la relación nitrógeno a fósforo, se determinó que la mayoría de los lagos y embalses cálidos tropicales incluidos en el Programa Regional del CEPIS, estaban limitados por fósforo, aunque en algunos casos otros factores, tales como la luz, podrían estar limitando en vista de los altos niveles observados tanto de nitrógeno como de fósforo.
- 8.2 Un sistema de clasificación trófica de distribución condicional probabilística ha sido desarrollado para los lagos/embalses cálidos tropicales de la Región basado en fósforo total, cuyos límites numéricos difieren significativamente de aquéllos aplicados para lagos templados. Este sistema ha sido verificado con los embalses cálidos tropicales del continente africano.
- 8.3 Se ha desarrollado un modelo simplificado de fósforo total que ha sido satisfactorio comparado con datos de otros embalses cálidos tropicales del continente africano. De esta manera, este modelo en su forma actual está considerado como una herramienta útil en el manejo y planificación de recursos de agua. Asimismo, se ha elaborado un programa LACAT (LAgo Cálido Tropical) de este modelo y del sistema de clasificación, en el idioma BASIC.
- 8.4 Se han desarrollado modelos simplificados preliminares de clorofila y nitrógeno además de un sistema de clasificación trófica basada en clorofila "a". Sin embargo, se considera que estos modelos requieren de datos y desarrollo adicional antes que puedan ser aplicados en forma confiable.

## 9. Agradecimientos

Agradecemos a todos los países que enviaron datos, sin cuya colaboración el Programa Regional del CEPIS no hubiera podido desarrollarse satisfactoriamente.

Asimismo, deseamos agradecer a los siguientes profesionales:

- Ing. Alberto Flórez Muñoz y Dr. Carl R. Bartone, con la asesoría del Ing. Walter A. Castagnino, por la visión que tuvieron para concebir la necesidad de este Programa en la Región, así como por su constante apoyo y contribución durante su desarrollo.
- Dr. Richard Vollenweider, por su continua asesoría y revisión de documentos.
- Dr. Gualberto Limón, por sus valiosos comentarios y su contribución como co-autor de la Memoria del III Encuentro del Programa.
- Dra. Beatriz Castañeda, por sus valiosos consejos sobre los análisis estadísticos.

## 10. Referencias

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (A.P.H.A.). Standard methods for the examination of water and waste water. 13th, 14th, 15th, 16th editions.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). 1980. Trihalomethanes. U.S. EPA Federal Regulation. JAWWA ISBN 0-89867-242-2; 31 p.
- BERMEJO, H. 1980. Diagnóstico del estado trófico de Laguna Grande. Estado Monagas, Venezuela. Tesis para la Maestría en Ingeniería Ambiental IVIC. 132 p.
- BERON, L.E. y LEE, G.F. 1984. Aplicación preliminar de un modelo de eutroficación al Embalse de Salto Grande. XIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria, AIDIS.
- BLANK, L. 1980. Statistical procedures for engineering, management and science. McGraw-Hill Book Company. 649 p.
- CANFIELD, D.E. 1983. Prediction of chlorophyll "a" concentrations in Florida lakes: the importance of phosphorus and nitrogen. Water Resources Bulletin, 19(2):255-262.
- CANFIELD, D.E.; LANGELANO, K.A.; MALEINA, M.J.; HALLER, W.T.; SHIREMAN, J.V. y JONES, J.R. 1983. Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences. Vol. 40, No. 10:1713-1718 p.
- CASTAGNINO, W.A. 1982. Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales. Organización Panamericana de la Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Versión revisada. 27 p.
- CENTRO DE ESTUDIOS LIMNOLÓGICOS (CEL). 1985. Protocolo del Lago de Chapala y Laguna de Cajititlán en relación al Proyecto Regional de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales.
- CENTRO DE ESTUDIOS LIMNOLÓGICOS (CEL). 1987. Cuarto Encuentro del Proyecto Regional de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales. Informe.
- CENTRO DE ESTUDIOS LIMNOLÓGICOS (CEL). 1988. Información enviada al CEPIS con la comunicación del 26 de setiembre de 1988.

- CHAPRA, S.C. y TARAPCHAK. 1976. A chlorophyll "a" model and its relationship to phosphorus loading plots for lakes. Water Resources Research, 12(6):1260-1264.
- COMPANHIA DE AGUA E ESGOTOS DE BRASÍLIA (CAESB). 1982. Investigação de modelos simplificados de eutrofização em lagos tropicais. Relatório 1 (vol. 1 y 2). Dados do Lago Paranoá, Anexo A, Balance Hídrico do Lago Paranoá, Projeto de Cooperação Técnica CAESB/CEPIS.
- COMPANHIA DE AGUA E ESGOTOS DE BRASÍLIA (CAESB). 1983. Informa on sobre el Lago Descoberto entregada en el Segundo Encuentro del Proyecto Regional de Eutrofica on en Lagos Tropicales.
- COMPANHIA DE TECNOLOGÍA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). 1985. Tercer Encuentro Regional de Eutrofização de Lagos Tropicais; Relatório Técnico. Sao Paulo.
- COMPANHIA DE TECNOLOGÍA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). 1987. Cuarto Encuentro Regional de Eutrofica on en Lagos Tropicales, Relatório Técnico. Sao Paulo.
- CONOVER, W.J. (1980). Practical non-parametric statistics. J. Wiley & Sons. 2  ed. 493 pp.
- CORDEIRO NETTO, O. y DUTRA FILHO, P. 1981. O aporte de fósforo ao Lago Paranoá. Companhia de Agua e Esgotos de Brasília, XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 21 p.
- CORPORAC ON AUT NOMA REGIONAL DEL CAUCA (CVC). 1988. Carta SRN-DAG-J-306-88 dirigida al CEPIS con informa on.
- DILLON, P.J. y RIGLER, F.H. 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. Limnol. Oceanogr. 19(4):767-773.
- DILLON, P.J. y RIGLER, F.H. 1975. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status. J. Fish. Res. Bd. Can. 31(9):1519-1531.
- DIRECC ON DE INVESTIGAC ON DEL AMBIENTE (DIA). 1979. Estudio integral sobre la contaminaci on del Lago de Valencia, Informe N  1, estudio limnológico, primera etapa. Caracas, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. 163 p.
- ENVIRONMENTAL QUALITY BOARD OF PUERTO RICO (EQB) and CENTER FOR ENERGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH. 1984. An environmental evaluation of La Plata Lake, Toa Alta, Puerto Rico. U.S. Environmental Protection Agency. 371 p.
- FUNDA O ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). 1982. Caracteriza on del área de estudio - Embalse de Funil. Carta 07/82 enviada al CEPIS.
- FUNDA O ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). 1987. IV Reuni on del CEPIS del Proyecto Regional de Eutrofica on en Lagos Cálidos Tropicales; Informe Técnico. Río de Janeiro.
- FUNDA O ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). 1989. Carta con informa on enviada al CEPIS.
- GILBERT, R.O. 1987. Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 320 p.

- GRAHAM, N.J.; REYNOLDS, G.; BUCKLEY, D.; PERRY, R. y CROLL, B. 1989. Laboratory simulation of disinfection regimes for trihalomethane control. J. IWEM, 3:604-611 p.
- GROEBLER, D.C. y SILBERBAUER, M.J. 1985a. The combined effect of geology, phosphate sources and runoff on phosphate export from drainage basins. Water Res. Vol. 19, No. 8:975-981.
- GROEBLER, D.C. y SILBERBAUER, M.M. 1985b. Eutrophication control: a look into the future. Water S.A. Vol. 11, No. 2.
- HYDROSCIENCE, INC. 1976. Eutrophication analysis of the Lake Livingston Reservoir. Texas Water Quality Board. Austin, Texas. 155 p.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA/SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (IMTA/SARH). 1986. IV Reunión del CEPIS Proyecto Regional de Eutroficación de Lagos Cálidos Tropicales; Informe.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA/SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (IMTA/SARH). 1988. Carta enviada al CEPIS con información.
- JUNTA DE CALIDAD AMBIENTAL DE PUERTO RICO. 1990. Datos proporcionados en el V Encuentro del Proyecto Regional de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales. Basados en datos de los EE.UU.
- KENNEY, B.C. 1982. Beware of spurious self-correlations. Water Resources Res., 18:1041-1048.
- KENNEY, B.C. 1988. On the dynamics of phosphorus in lake systems. National Hydrology Research Institute. Saskatchewan. (Borrador).
- LARA HERNÁNDEZ y MARTÍNEZ, F. 1988. Estrategia de control de mosco (Culex sp. y Culiseta sp.) y el lirio acuático (E. crassipes) en la presa Endho. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Delegación de Hidalgo, México. 75 p.
- MARTINO, P. y SALAS, H.J. 1990. Memoria del V Encuentro del Proyecto Regional "Desarrollo de Metodologías simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales". OPS-CEPIS, 67 p.
- LIN, C.J. 1981. Integrated investigation of limnology and pollution in Lake Valencia, Part II. Nutrients, pollutant inputs and dispersion. Caracas, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.
- OECD. 1982. Eutrophication: monitoring assessment and control. Organization for Economic Cooperation and Development, París. 154 p.
- QUIÑONES MARQUES, F. 1980. Limnology of Lago Loiza, Puerto Rico. U.S. Geological Survey and Commonwealth of Puerto Rico, 113 p. Water Resources Investigation 79-97.
- RAST, W. y LEE, G.F. 1978. Summary analysis of the North American (U.S. portion) OECD eutrophication project: Nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices. U.S. EPA, Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR 454 p. EPA-600/3-78- 008.
- SALAMEH, E. 1987. The potential of surface water utilization for domestic purposes in Jordan. The International Journal of Environmental Studies. Vol. 28, No. 4:291-300.

- SALAS, H.J. 1983. Resumen del II Encuentro del Proyecto Regional "Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Tropicales". OPS-CEPIS, 33 p.
- SALAS, H.J. y LIMON, G. 1986. Memoria del III Encuentro del Proyecto Regional "Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales". OPS-CEPIS, 25 p.
- SALAS, H.J. y MARTINO, P. 1988. Memoria del IV Encuentro del Proyecto Regional "Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales". OPS-CEPIS, 69 p.
- SMITH, V.H. y SHAPIRO, J. 1981. Chlorophyll-phosphorus relations in individual lakes. Their importance to lake restoration strategies. Environ. Sci. Technol. 15:444-451.
- SONZOGNY, W.C.; JONTEITH, T.J.; GOCK, W.N. & HUGUES, V.G. (1978). United States Great Lakes tributary loadings. U.S. EPA y U.S. Task D. Committee.
- THOMANN R.V. (1982). Systems Analysis and Water Quality Management. McGraw-Hill Book Company. 286 p.
- THOMANN, R.V. & MUELLER, J.A. 1987. Principles of surface water quality modeling and control. Harper and Row Publishers, N.Y. 644 p.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 1978. Limnology of Laguna Tortuguero, Puerto Rico. WRI 77-122. 86 p.
- VÁSCONEZ, G.J.E. 1983. Poza Honda. Segundo Encuentro de Eutroficación en Lagos Cálidos. Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias/Centro de Rehabilitación de Manabí. 56 p.
- VOLLENWEIDER, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD, Paris. Tech. Report No. DAS/CSI/68.27, 159 p.
- VOLLENWEIDER, R.A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Inst. Ital. Idrobiol. Bott. Marco de Marchi, 33:53-83.
- VOLLENWEIDER, R.A. & KEREKES, J.J. 1981. Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication. In: restoration of lakes and inland waters. EPA/440/5-81-010. p. 25-36.
- VOLLENWEIDER, R.A. 1983. Eutrophication. Notes distributed during the II Meeting of the Regional Project on the Eutrophication of Tropical Lakes.
- WATER RESEARCH COMMISSION AND NATIONAL INSTITUTE FOR WATER RESEARCH 1980. The limnology of some selected South African impoundments. Petoria. 229 p.

**ANEXO I\***

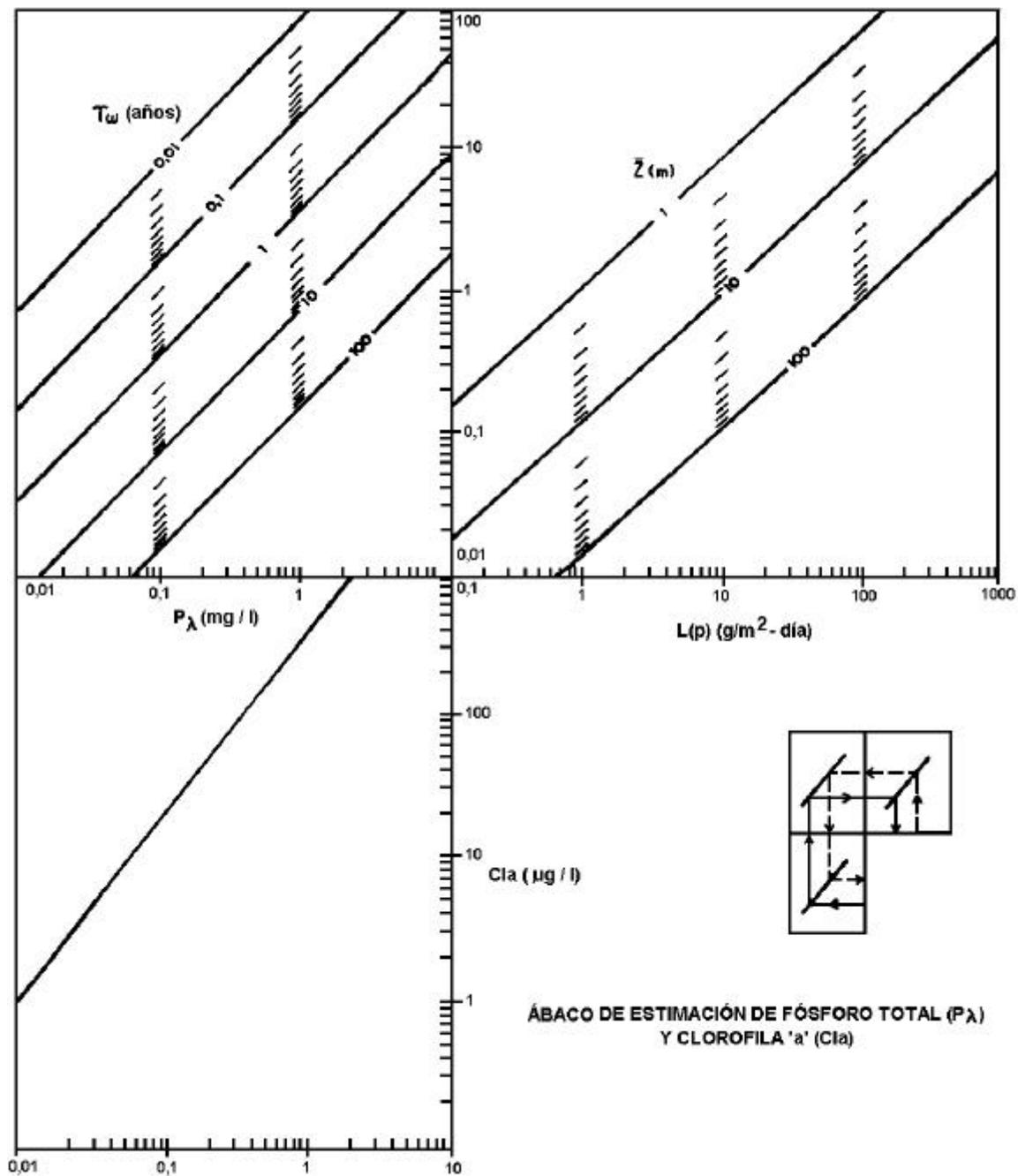
**ÁBACO DE ESTIMACIÓN DE FÓSFORO TOTAL ( $P_{\lambda}$ )  
Y CLOROFILA "a" (Cla)**

---

\* Henry Salas

El gráfico adjunto permite la estimación de fósforo total  $P_{\lambda}$  (mg/l) basado en la Ecuación 22 y Clorofila "a", Cla ( $\mu\text{g/l}$ ) basado en la Ecuación 24 de un lago en base del aporte de fósforo,  $L(p)$  ( $\text{g/m}^2\text{-año}$ ), profundidad,  $Z$  y Tiempo de retención,  $T_{\omega}$  (años).

Asimismo, eligiendo los deseados niveles de clorofila "a" o fósforo total se puede estimar el aporte de nutrientes requerido. El esquemático en el gráfico demuestra su uso.



**ANEXO II**

**Programa LAgos CÁLidos Tropicales (LACAT)**

LACAT es un programa interactivo, preparado en idioma BASIC, que permite la estimación de un estado trófico de un lago cálido tropical. Necesita como insumos los parámetros de profundidad (m), tiempo de retención (años) y el aporte de fósforo total (g/m<sup>2</sup>-año). Estos datos se pueden leer directamente desde el teclado o de un archivo.

LACAT calcula el Fósforo Total (g/m<sup>3</sup>) basado en los datos de entrada utilizando la ecuación empírica 22 del trabajo de "Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales".

Esta ecuación de regresión múltiple para fósforo total (aproximación totalmente empírica) producto de una regresión "stepwise" con todas las variables independientes disponibles se repite a continuación:

$$P_1 = 0,290 L(p)^{0,891} T_w^{0,676} / Z^{0,934} \quad (22)$$

$$r^2 = 0,902 \ ; \ SE = 0,044 \ ; \ N = 39$$

donde

$P_\lambda$	=	fósforo total (mg/l)
$L(p)$	=	aporte de fósforo total (g/m <sup>2</sup> -año)
$T_w$	=	tiempo de retención (años)
$Z$	=	profundidad (m)

Basado en el nivel de fósforo total calculado y aplicando la Figura 3 del citado Informe, el programa LACAT indica el estado trófico de dicho lago.

Se puede continuar eligiendo un estado trófico deseado para lo cual LACAT indica el aporte de nutrientes necesario.

Asimismo LACAT permite evaluar varias combinaciones de profundidad, tiempo de retención y aporte de nutrientes para el mismo lago.

Este programa está disponible en disquette para computadoras PC compatibles a un costo mínimo. Los interesados puede dirigir su solicitud al CEPIS a la siguiente dirección:

CEPIS  
Casilla Postal 4337  
Lima 100, Perú  
Tlf. (51-1) 437-1077  
Fax (51-1) 437-8289

**ANEXO III**

**DETERMINACIÓN DE APORTES DE NUTRIENTES**

Bíol. Paloma Marino, Oficial Profesional Asociado, CEPIS  
 Ing. Henry J. Salas, Asesor en Contaminación del Agua, CEPIS

### Determinación de aportes de nutrientes

Castagnino (1982) en su informe sobre el protocolo del Proyecto Regional, reporta valores de carga de nutrientes por seres vivos y los coeficientes de exportación de nutriente provenientes de fuentes dispersas. Asimismo, se informa sobre la determinación de aporte de nutrientes al cuerpo de agua debido a la carga atmosférica (carga proveniente de partículas y precipitación pluvial). En muchos casos, la carga atmosférica se puede considerar insignificante con respecto a la carga total.

Desde el inicio del Proyecto se ha enfatizado la falta de datos de coeficientes de exportación de nutrientes en áreas tropicales. Debido a restricciones de recursos resulta difícil hacer estudios de investigación detallados para desarrollar este tipo de información. En lo posible, se promueve la recopilación de datos existentes en los organismos participantes, con el objeto de utilizar al máximo los datos disponibles para desarrollar nueva información. La aplicación de los valores de coeficientes hallados en otros países templados puede resultar en estimaciones muy aproximadas de órdenes de magnitud y se les debe utilizar sólo en el caso que no se puedan estimar localmente.

En el protocolo del Proyecto Regional se incluye la medición de nutrientes y flujo en los tributarios de los lagos y procedimientos para estimar el aporte de nutrientes con estos datos. En su mayoría, la carga transportada por los tributarios es mucho mayor que la carga producida por la cuenca que drena directamente al lago y, por lo tanto, la inexactitud asociada a los coeficientes de exportación sugeridos por Castagnino (1982) introducirían errores pequeños.

Sin embargo, con fines de planificación y uso de modelos simplificados, tales coeficientes son imprescindibles y es de interés de los países participantes desarrollarlos en base a condiciones locales, teniendo en cuenta que pueden ser trasladados a cuencas de características similares.

### Cálculo de la carga de nutrientes por los tributarios

Un buen método para la carga de nutrientes es el de estimador de razones de Clark. Este método se incluyó en el Apéndice A de la memoria del II Encuentro de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales (Salas, 1983) (se incluye una copia en este anexo).

### Otro método de cálculo del aporte de nutrientes por los tributarios

El Grupo de Referencia de los Lagos Superiores (ULRG) (1976)\*, calculó cargas medias diarias en los tributarios de los lagos Superior y Hurón. El programa de muestreo fue mensual, con mayor número de muestras en primavera (Período de flujos elevados). El valor de la carga media diaria se estimó mediante un promedio de los valores de carga para cada día que se tomaron muestras. El procedimiento fue:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i C_i}{n}$$

donde:

L	=	carga media diaria del río
Q <sub>i</sub>	=	flujo del río en un día i
C <sub>i</sub>	=	concentración para el día i
n	=	número total de días muestreados

---

\* Ver Sonzogni et al., 1978

La principal dificultad de esta técnica de cálculo es su fuerte distorsión hacia el muestreo de primavera (generalmente de flujos elevados). Por ejemplo, si se tomaron 16 muestras al año, una por mes, salvo en el mes de abril que se tomaron cinco, la carga media diaria calculada para estos datos estará condicionada por las muestras de abril. Si estos datos de abril corresponden con períodos de flujos elevados (y alta concentración de ciertos parámetros), la carga anual para algunos parámetros puede sobreestimarse.

Otro método sugerido en el Segundo Encuentro (Salas, 1983) que utiliza mediciones de calidad discretas y aforos diarios es el de la simple multiplicación del caudal diario por los valores resultantes de interpolación de las concentraciones medidas. Ambos métodos anteriores están sujetos, algunas veces, a estimaciones erróneas, por lo cual es mejor usar el método de Clark.

R. Vollenweider (1987) apunta que el método comúnmente empleado para el cálculo de la carga total, aunque proporciona una primera aproximación y es razonablemente correcto para lagos/embalses de concentración y flujo relativamente constante, es a menudo cuestionable.

El método se resume en:

$$\text{Carga}(\text{kg/tiempo}) = [\bar{c}] \cdot \bar{Q} \cdot t$$

donde:

$$[\bar{c}] = \frac{\sum^n [c]_n}{n} \quad (\text{g/m}^3)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum^n Q_n}{n} \quad (\text{m}^3/\text{dia})$$

siendo n = número de muestras y t = número de días

Como método más correcto R. Vollenweider (1987) propone establecer primero la relación entre concentración y descarga de agua en el momento de la toma de muestras, haciendo un gráfico de la concentración versus la descarga y calculando las ecuaciones de regresión. Estas relaciones son, a menudo, no lineales. Considere que, como mínimo, se deben evaluar los siguientes casos:

- a. Que la concentración sea independiente del flujo y bastante constante,

$$[\bar{c}] = K_o (\pm SD)$$

donde K = constante y SD es la desviación estándar.

Por lo tanto, la carga para cualquier día será proporcional a la descarga o caudal de entrada.

$$Ld = [\bar{c}] Q_d (\text{kg/dia})$$

- b. Que la concentración sea inversamente proporcional al caudal que entra en el cuerpo de agua.

$$[c] = \frac{K_1}{Q_d}$$

Entonces, la carga para cualquier día es:

$$L_d = [c] \cdot Q_d = K_1 (\text{kg/día})$$

- c. Que la concentración sea proporcional a la descarga de agua.

$$[c] = K_2 O_d$$

y por lo tanto,

$$L_d = K_2 \cdot Q_d^2 (\text{kg/día})$$

- d. En la realidad, sin embargo, la relación más probable será una combinación de los tres casos:

$$[c] = K_o + \frac{K_1}{Q_d} + K_2 O_d^b$$

y por ello,

$$L_d = K_o Q_d + K_1 + K_2 Q_d^{b+1} (\text{kg/día})$$

Si ninguna de estas relaciones es satisfactoria, se pueden explorar otras.

El significado de los distintos términos se entiende como:

- Término 1 ( $K_o$ ) - se refiere básicamente a un tiempo independiente (instantáneo) de equilibrio químico entre la fase sólida y la columna de agua. Por ejemplo, conductividad en aguas naturales nunca es 0; 10 a 20  $\mu\text{s}$  puede representar tal condición de base.
- Término 2 ( $K_1$ ) - presupone una fuente o proceso constante (por ejemplo, la denudación química o bioquímica);  $K_1/Q_d$  representa un efecto de dilución.
- Término 3 ( $K_2$ ) - se refiere a los efectos de erosión mecánica, ya sea del terreno o de acumulación de sustancias en el lecho del río durante los períodos de escaso flujo. De esta forma, cuanto mayor sea la corriente, mayores serán las fuerzas erosivas y el efecto de lavado.

Según lo anteriormente expuesto, la carga total anual de cualquier subcuenca se puede calcular a partir de medidas continuas del flujo (caudal);

$$\text{Carga/ano} = \sum^{365} K_o Q_d + \sum^{365} K_1 + \sum^{365} K_2 Q_d^{b+1}$$

$$L_{\text{ano}} = K_o Q_{\text{ano}} + 365 K_1 + K_2 \sum^{365} Q_d^{b+1} (\text{gramos/ano})$$

En la mayor parte de las situaciones,  $K_o Q_{\text{año}}$  puede despreciarse. En otros casos, como por ejemplo, si  $b$  es elevado, el tercer término es el principal determinante de la carga anual. Todo depende de la naturaleza de los datos.

La carga total es la debida a la carga de cada una de las subcuencas de los tributarios y, en algunos casos, hay que incluir la debida a la carga atmosférica.

#### Referencias

- CASTAGNINO, W.A. 1982. Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales. OPS/CEPIS. 27 p.
- VOLLENWEIDER, R.A. 1987. Mass balance. Artículo proporcionado para su uso en el IV Encuentro Internacional del Proyecto Regional de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales realizado en San Juan de Puerto Rico, del 7 al 11 de diciembre de 1987.
- SONZOGNI, W.C.; JONTEITH, T.J.; GACK, W.N. & HUGHES, V.G. 1978. United States Great Lakes tributary loadings, U.S. EPA & U.S. Task D. Committee.
- SALAS, H.S. 1983. Memoria del Segundo Encuentro del Proyecto Regional "Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos (antes Lagos Tropicales)". Brasíla, Brasil, 23-27 de mayo de 1983.

## MÉTODO DE CLARK\*

(Traducido directamente de Sonzogni, et al.<sup>1</sup> con algunas modificaciones)

El método de estimador de razones (Método de Clark)\* calcula el aporte diario medio en la desembocadura de un río ajustado hasta cierto grado para la variación del flujo durante el ciclo anual. Por ejemplo, programas de muestreo que toman muestras mensuales pueden perder eventos de alto flujo, si se calculara un flujo diario medio basado en los días de muestreo, resultaría un estimado incorrecto del aporte total anual. Sin embargo, si el aporte diario medio se ajusta con la multiplicación por la razón de flujo diario medio anual entre el flujo diario medio de muestreo, parte del bias se puede eliminar del aporte calculado. También es importante tener una estimación del error asociado con los cálculos y la variabilidad de los datos, así como el término del cuadrado medio residual. El método de estimador de razón proporciona dicho error.

Las siguientes ecuaciones resumen cómo se calcula el estimador de razón, así como el término de cuadrado medio residual.

El estimador de razón,  $\hat{\mu}$ , se define como:

$$\hat{m}_y = m_x \cdot \frac{m_y}{m_x} \cdot \frac{\left[ 1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{S_{xy}}{m_y m_x} \right]}{\left[ 1 + \frac{1}{n} \cdot \frac{S_x^2}{m_x^2} \right]}$$

donde:

- $\mu_x$  = flujo diario medio anual
- $m_y$  = aporte diario medio de los días cuando se determinó concentraciones
- $m_x$  = flujo diario medio de los días cuando se determinó concentraciones
- $n$  = número de días cuando se determinó concentraciones

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \cdot m_y \cdot m_x}{n - 1}$$

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \cdot m_x^2}{n - 1}$$

y  $X_i$  e  $Y_i$  son los flujos medidos y aportes calculados individuales, respectivamente, para cada día que se determinó concentraciones.

---

\* Programa de computadora desarrollado por J. Clark (1976) y programado por el CEPIS en lenguaje Basic y disponible en nuestro Centro.

<sup>1</sup> SONZOGNI, W.C.; JONTEITH, T.J.; GACK, W.N. & HUGHES, V.G. 1978. United States Great Lakes tributary loadings. U.S. EPA & U.S. Task D. Committee.

El cuadrado medio residual de estos estimados se puede calcular en términos del orden  $n^2$ , suponiendo una población grande por:

$$\hat{E}[(\hat{m}_y - m_y)^2] = m_y^2 \cdot \left[ \frac{1}{n} \cdot \left\{ \frac{S_x^2}{m_x^2} + \frac{S_y^2}{m_y^2} - 2 \frac{S_{xy}}{m_x m_y} \right\} + \frac{1}{n^2} \cdot \left[ 2 \cdot \left\{ \left( \frac{S_x^2}{m_x^2} \right)^2 - 4 \frac{S_x^2}{m_x^2} \cdot \frac{S_{xy}}{m_x m_y} + \left\{ \frac{S_{xy}}{m_x m_y} \right\}^2 + \frac{S_x^2}{m_x^2} \cdot \frac{S_y^2}{m_y^2} \right\} \right] \right]$$

donde  $S_y^2$  se calcula análogamente a  $S_x^2$ . Un ejemplo de la aplicación de este método se presenta en la Tabla A.4.1.

Se hace notar que si el programa de muestreo se diseñó para recolectar datos durante eventos de alto flujo, se debe dividir los datos en dos o tres estratos de flujo y calcular la carga y el error para cada estrato.

Tabla A.4.1 Ejemplo de cálculo de carga usando el programa estimador de razón

Tributario: FOX  
 Año: 1975  
 Cuenca: Michigan  
 Parámetro: Fósforo total

Cargas kg/día	Caudales		Concentraciones mg/l
	m <sup>3</sup> /seg	pcs	
481	39.8	1405.5	0.140
914	105.8	4746.3	0.100
1228	118.4	4181.3	0.120
562	50.0	1765.7	0.130
838	97.0	3425.5	0.100
795	115.0	4061.2	0.080
1692	178.0	6286.0	0.110
1547	199.0	7027.6	0.090
2955	171.0	6038.8	0.200
1854	58.0	2048.2	0.370
626	29.0	1024.1	0.250
847	70.0	2472.0	0.140

Caudal medio de muestra = 102.58 m<sup>3</sup>/seg  
 Carga media de muestra = 1194.9 kg/día  
 Caudal anual medio = 118.393 m<sup>3</sup>/seg ó 4181 pcs  
 Estimado de razón con bias = 1379.1 kg/día  
 Estimado de razón aproximado sin bias = 1369.0 kg/día  
 Corrección de bias del estimado = -10.0 kg/día

La razón del caudal anual medio entre el medio del caudal de muestra es 1.15 basado en los valores de 118.39 y 102.58 m<sup>3</sup>/seg, respectivamente.

El estimado de la carga diaria es por consiguiente: 1369.0 kg/día.

Error medio estimado de este estimado (raíz cuadrada del cuadrado medio residual) es: 168.5 kg.  
 Carga anual estimada: 499,698 kg ó 499.7 toneladas métricas  
 Error medio estimado para este total: 61,520 kg ó 61.5 toneladas métricas.  
 Estimados basados en 11 grados de libertad.

#### **ANEXO IV**

- A. METODOLOGÍA PARA CALCULAR LA TASA DE AGOTAMIENTO DE OXÍGENO HIPOLIMNÉTICO**
- B. METODOLOGÍA SIMPLE PARA EL CÁLCULO DE BIOMASA DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA EN EL CAMPO**

## A. Métodos para calcular la tasa de agotamiento de oxígeno hipolimnético

Biól. Paloma Martino, Oficial Profesional Asociado, CEPIS  
 Ing. Henry J. Salas, Asesor en Control de la Contaminación del Agua, CEPIS

1. La manera más sencilla de calcular la tasa de agotamiento del oxígeno hipolimnético es medir la concentración de oxígeno en el hipolimnión antes y después del período de estratificación (Wetzel, 1975). También se puede medir la diferencia entre la concentración de O<sub>2</sub> entre el período de mínima y máxima producción o la variación acaecida en un mes.

Para ello se mide la concentración de oxígeno en varios puntos del hipolimnión y se calcula:

$$\text{Tasa O}_2 \text{ (mg/m}^3\text{-mes)} = X_1 - X_2$$

Siendo,

$$X_1 = [\bar{O}_2]_1 \cdot x(V_h)_1$$

$$X_2 = [\bar{O}_2]_2 \cdot x(V_h)_2$$

donde:

X<sub>1</sub> = concentración media final de O<sub>2</sub> x volumen hipolimnético  
 X<sub>2</sub> = concentración media inicial de O<sub>2</sub> x volumen hipolimnético

El volumen hipolimnético se calcularía a partir de curvas hipsográficas (volumen-profundidad o área-profundidad).

El valor obtenido o déficit de oxígeno disuelto en el hipolimnión durante el período considerado se puede referir al área hipolimnética, dividiendo por el área (A) de la superficie del hipolimnión a la profundidad que termina la termoclina.

$$\text{Tasa O}_2 \text{ (mg/mes)/A (m}^2\text{)} = \text{déficit de O}_2 \text{ (mg/m}^2\text{-mes)}$$

Una simplificación para aquellos casos en que el volumen hipolimnético se desconoce pero sí se tiene información sobre el perfil de temperatura y oxígeno disuelto en varias estaciones del embalse, es estimar la diferencia entre el promedio de los valores de oxígeno por debajo de la termoclina antes y después de la estratificación, asumiendo condiciones estacionarias en el hipolimnión. Este método ha sido usado por CETESB para reportar la tasa de agotamiento de O<sub>2</sub> disuelto en el hipolimnión y pensamos que se puede utilizar como metodología simplificada en los lagos del Proyecto.

Nuestra recomendación es la realización de varios perfiles en 2 ó 3 estaciones de los reservorios y, como requerimiento mínimo al menos, un perfil de temperatura y oxígeno en el punto de muestreo considerado.

2. Vollenweider y Janus (1981) en los lagos templados encuentran una correlación altamente significativa entre la tasa de agotamiento de O<sub>2</sub> hipolimnético y la clorofila "a". La relación Cl (V<sub>e</sub>/V<sub>h</sub>) explicaba aproximadamente un 90% de la variación de oxígeno hipolimnético.

En el Anexo 1 (Problema Ejemplo) de la Memoria del III Encuentro Internacional de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales (Salas y Limón, 1985), se propuso el modelo estadístico de la OECD para lagos templados:

$$\dot{A}O_2 \text{ (g/m}^3\text{·mes)} = A \cdot \Phi(\theta) \cdot [f(x)]^B$$

donde:

A	=	constante = 0,456
B	=	constante = 0,687
f(x)	=	C1 (V <sub>e</sub> /V <sub>h</sub> )
Φ (θ)	=	1,072 <sup>(-4)</sup>
θ	=	temperatura de hipolimnión, °C
Cl	=	clorofila "a"

$$V_e = V \left[ 1 - \left( 1 - \frac{Z_e}{Z_{\max}} \right)^x \right]$$

$$x = \frac{Z_{\max}}{Z}$$

$$V = V_e + V_h$$

donde:

Z <sub>e</sub>	=	profundidad epilimnión
$\bar{Z}$	=	profundidad media
Z <sub>max</sub>	=	profundidad máxima
V	=	volumen del cuerpo de agua
V <sub>e</sub> /V <sub>h</sub>	=	volumen epilimnión/volumen hipolimnión

No obstante, consideramos el uso de este modelo cuestionable para lagos cálidos tropicales. Esperamos obtener suficientes datos que nos permitan desarrollar un modelo estadístico para la tasa de agotamiento del oxígeno hipolimnético en los lagos de la Región.

## B. Metodología simple para el cálculo de biomasa de la vegetación acuática en el campo

Se recomienda el cálculo de biomasa en peso húmedo de los macrofitos en el período de su máximo desarrollo.

Se distribuyen al azar tres o cuatro cuadrados de dimensiones conocidas, en dos o tres estaciones de la zona litoral. Para hacer el cuadrado se puede utilizar un metro articulado de madera, comúnmente empleado en construcción. Se recoge la biomasa epigea de los macrofitos acuáticos comprendidos dentro del cuadrado. En el caso de coexistencia de macrofitos acuáticos sumergidos, flotantes y helofitos emergentes, se dividen en tres grupos. El peso húmedo de cada grupo se estima mediante el peso de la masa tras centrifugar manualmente las plantas en redes para eliminar el exceso de agua. En los análisis estadísticos se utiliza el valor medio de las tres o cuatro unidades de muestreo (cuadrados) y se obtiene la biomasa en g/m<sup>2</sup>.

En la mayoría de los casos, el tamaño y profundidad del embalse y la falta de recursos limitan las posibilidades a un estudio de la cobertura de macrofitos. La estimación se hace con ayuda de fotografías aéreas de fecha más reciente. Los valores se refieren al porcentaje de área cubierta por el tapiz de macrofitos.

## Referencias

- WETZEL, R.G. 1975. Limnology. W.B. Saunders ed. 743 p.
- VOLLENWEIDER, R.A. & JANUS, L.L. 1981. Statistical models for predicting hypolimnetic oxygen depletion rates. National Water Research Institute. Canada Centre for Inland Waters. Ontario. 38 p.
- SALAS, H.J. & LIMÓN, G. 1986. Resumen Memoria del III Encuentro Internacional del Proyecto Regional de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales. Guadalajara, Jalisco, México, 25-29 de noviembre de 1985.

**ANEXO V**  
**SIMBOLOGÍA**

Símbolo	Significado	Unidades S.T.
A, B, C	Constantes	----
Cla	Clorofila "a"	mg/m <sup>3</sup>
SE	Error estándar	----
$\sigma$	Desviación estándar	----
$\mu$	Promedio	----
K <sub>s</sub>	Coefficiente de sedimentación de fósforo total	año <sup>-1</sup>
L(n)	Aportación superficial de nitrógeno por año	gm -N/m <sup>2</sup> -año
L(p)	Aportación superficial de fósforo por año	gm -P/m <sup>2</sup> -año
N	Número de datos	----
N <sub>λ</sub>	Concentración de nitrógeno total lacustre promedio	mg-N/l
ΔO <sub>2</sub>	Tasa de agotamiento de oxígeno hipolimnético	mg/l-mes
P	Probabilidad	
P <sub>λ</sub>	Concentración de fósforo total lacustre prom.	mg-P/l
Q	Flujo (caudal de agua)	
r <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación	----
V <sub>e</sub>	Volumen epilimnión	m <sup>3</sup>
V <sub>h</sub>	Volumen hipolimnión	m <sup>3</sup>
Z	Profundidad media	m
T <sub>ω</sub>	Tiempo de retención	año
Y	Distribución lognormal	

## SIGLAS

## Brasil:

- CAESB Companhia de Agua e Esgotos de Brasilia
- FEEMA Fundaçao Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, Rio de Janeiro
- CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Sao Paulo

## Colombia:

- CVC Corporación Autónoma Regional del Cauca

## Ecuador:

- IEOS Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, Quito
- CRM Centro de Rehabilitación de Manabí (Embalse Poza Honda), Quito

## México:

- IMTA/SARH Instituto Mexicano de Tecnología del Agua/Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos

## Paraguay:

- SENASA Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental, Asunción

## Perú:

- IVITA Instituto Veterinario de Investigaciones Tropicales y de altura, Lima
- CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente,

Lima

## Puerto Rico:

- JCA Junta de Calidad Ambiental, San Juan

## República Dominicana:

- CAASD Corporación de Acueductos y Alcantarillados de Santo Domingo

## Venezuela:

- DIA Dirección de Investigación del Ambiente, Caracas