

# Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río "Almendares"

Judith Domínguez Catasús, Jorge Borroto Portelas y Anel Hernández Garcés.\*

Departamento de Radioquímica, Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares, Quinta de los Molinos, Avenida Salvador Allende y Luaces, El Vedado, Plaza de la Revolución, Ciudad de La Habana. \*Centro Nacional de Seguridad Nuclear, Ciudad de La Habana, Cuba.

Recibido: 10 de junio de 2003. Aceptado: 18 de diciembre de 2003.

Palabras clave: Almendares, modelos matemáticos, DBO, OD, modelo de Streeter y Phelps.  
Key words: Almendares, mathematic models, BOD, DO, Streeter and Phelps model.

**RESUMEN.** El uso indiscriminado del río "Almendares" como vertedero natural para aguas contaminadas ha originado cambios bruscos en su apariencia. El mal olor, los sólidos flotantes y la muerte de la fauna acuática caracterizan su estado actual. En el kilómetro 14,45 desde la desembocadura, la estación de depuración de aguas residuales (EDAR) "María del Carmen" descarga al "Almendares". A esta planta derivan los residuales industriales y domésticos del municipio Boyeros. Aguas abajo, los arroyos "Paila", "Marinero", "Santoyo" y "Mordazo" tributan al río y contribuyen con su carga a la contaminación existente. Los modelos de calidad de agua constituyen una herramienta muy útil en la planificación de estrategias sanitarias de manejo de contaminación. Su valor radica sobre todo, en la posibilidad de predecir la eficacia de alternativas de saneamiento en el logro de los niveles requeridos de calidad. En el presente trabajo, se calibró y validó el modelo unidimensional de estado estacionario de Streeter y Phelps para simular, aguas abajo de la estación "María del Carmen", el efecto de múltiples fuentes puntuales y dispersas, de las condiciones de flujo y de los parámetros morfológicos, en el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno carbonácea y la concentración de iones amonio del río. Se asumió que la dispersión es despreciable en relación con el transporte advectivo. El modelo considera además, el efecto de la demanda de oxígeno de los sedimentos y de la fotosíntesis, así como de la respiración de las plantas acuáticas.

**ABSTRACT.** The river "Almendares" is the main watercourse crossing the city of Havana. Its indiscriminate use as natural sink for contaminated waters has changed drastically its appearance. The bad smell and the fauna death are their normal conditions nowadays. At the 14.45 km from the mouth, the waste water treatment plant "María del Carmen" discharges in the "Almendares". Wastes from the industries and communities of the municipality Boyeros arrive at this plant. Down stream the creeks "Paila", "Marinero", "Santoyo" and "Mordazo" tribute to the river with an additional load. The water quality models are very useful tools to plan sanitary strategies for the handling of the contamination, mainly, to predict its effectiveness to improve the quality until the required levels. In the present work the steady state, one dimensional Streeter and Phelps model was calibrated and validated to simulate the effect of multiple-point and distributed sources on the carbonaceous biochemical oxygen demand, the dissolved oxygen and the ammonium concentration in the river, considering that the dispersion is neglected in comparison to the advection. The model considers the effect of sediment oxygen demand, photosynthesis and respiration of the aquatic plants.

## INTRODUCCION

El río "Almendares" se origina en un conunto de cañadas y arroyos que afluyen desde las alturas de Tapaste al norte y desde el sudeste de las elevaciones de Managua. Sus aguas drenan un área de 402,02 km<sup>2</sup> entre las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana. En su curso medio es represado dando lugar al embalse "Ejército Rebelde", obra hidráulica construida sobre una formación kárstica. Finalmente, a la altura de "Río Cristal" el cauce principal tuerce su rumbo al norte y desemboca en la "Boca de la Chorrera" en el litoral norte de la Ciudad de La Habana, luego de recorrer cerca de 48,8 km. Su red hidrográfica la constituyen numerosos arroyos, muchos de ellos de carácter intermitente que se mantienen secos durante el estío.

Este río presenta grandes problemas de contaminación, sobre todo, en la zona ubicada aguas abajo del embalse "Ejército Rebelde" que por diversos motivos no entrega regularmente el gasto proyectado de 100 L/s. A esto se une la descarga de los afluentes provenientes de la estación de depuración de aguas residuales (EDAR) "María del Carmen" a cuya planta derivan los residuos industriales y de zonas residenciales del municipio Boyeros. Además del canal de residuos, ingresan al cauce principal del río cuatro arroyos: "Paila", "Marinero", "Mordazo" y "Santoyo", aportando

en la mayoría de los casos, una contaminación adicional.

El impacto de una baja concentración de oxígeno disuelto o de condiciones anaerobias se revela directamente en el balance del ecosistema. Por esta razón, el análisis de parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno, la concentración de iones amonio y el déficit de oxígeno disuelto son de gran importancia en el estudio de las corrientes pluviales.

Mundialmente se reconoce el valor de la modelación matemática en la planificación de estrategias de saneamiento de ríos. El modelo de Streeter y Phelps<sup>1</sup> (ecuaciones 1 a 3) describe la calidad del agua en términos de oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno carbonácea (DBO<sub>c</sub>) y nitrogenada (DBO<sub>n</sub>), en dependencia de las características morfológicas y de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el río como resultado de la incorporación de fuentes puntuales o dispersas.

En dependencia del nivel de tratamiento de los residuos y la política ambiental de cada región, las características de la contaminación varían. Cuando los residuos son vertidos crudos o luego de recibir hasta tratamiento secundario, es permitido y conveniente asumir como causa principal y mayoritaria del deterioro de la calidad del agua, al consumo de oxígeno debido a la descomposición de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada y por tanto, emplear el modelo de Streeter y Phelps para describir ese proceso. El consumo de oxígeno por los sedimentos del fondo y el efecto neto de la respiración y la fotosíntesis de las plantas acuáticas, son elementos cuya influencia puede considerarse adicionalmente en este modelo.

Los residuos vertidos al "Almendares" reciben cuando más tratamiento primario. En el presente trabajo se calibró y validó el modelo de Streeter y Phelps para describir el efecto de la descarga de fuentes puntuales o dispersas de DBO<sub>c</sub>, concentración de iones amonio y OD en la calidad del agua de este río, aguas abajo de la EDAR "María del Carmen". El modelo permitirá evaluar el impacto de sistemas de tratamiento de aguas residuales y en general de estrategias de saneamiento de esta zona del "Almendares".

## MATERIALES Y METODOS

Se estudió la zona del río comprendida entre el punto donde la

$$D = D_0 e^{-\frac{K_{ax}}{u} x} + \frac{K_d L_0}{K_a - K_r} (e^{-\frac{K_{rx}}{u} x} - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) + \frac{K_n N_0}{K_a - K_{rn}} (e^{-\frac{K_{rx}}{u} x} - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) - \frac{(P - R)}{K_a} (1 - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) + \frac{SB}{K_a} (1 - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) + \frac{K_d WL}{K_a K_r A} (1 - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) - \frac{K_d WL}{AK_r} (e^{-\frac{K_{rx}}{u} x} - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) + \frac{K_n WN}{K_a K_{rn} A} (1 - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) - \frac{K_n WN}{AK_{rn}} (e^{-\frac{K_{rx}}{u} x} - e^{-\frac{K_{ax}}{u} x}) \quad (1)$$

$$L = L_0 e^{-\frac{K_{rx}}{u} x} + \frac{WL}{AK_r} (1 - e^{-\frac{K_{rx}}{u} x}) \quad (2)$$

$$N = N_0 e^{-\frac{K_{rn}}{u} x} + \frac{WN}{AK_{rn}} (1 - e^{-\frac{K_{rn}}{u} x}) \quad (3)$$

donde:

D déficit de oxígeno disuelto (M/L<sup>3</sup>).

c concentración de oxígeno disuelto (M/L<sup>3</sup>).

c<sub>s</sub> concentración de oxígeno disuelto de saturación (M/L<sup>3</sup>).

D<sub>0</sub> déficit inicial de oxígeno disuelto en el punto de la descarga (M/L<sup>3</sup>).

L demanda bioquímica de oxígeno carbonosa (M/L<sup>3</sup>).

N demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada (M/L<sup>3</sup>).

K<sub>a</sub> tasa de reareación (1/T).

K<sub>r</sub> tasa de remoción de de la DBO<sub>c</sub> (1/T).

K<sub>d</sub> tasa de deoxigenación carbonácea (1/T).

K<sub>rn</sub> tasa de remoción de la DBO<sub>n</sub> (1/T).

K<sub>n</sub> tasa de deoxigenación nitrogenada (1/T).

WL descarga dispersa uniforme de DBO<sub>c</sub> [M/(T · L)].

WN descarga dispersa uniforme de DBO<sub>n</sub> [M/(T · L)].

SB demanda de oxígeno disuelto de los sedimentos [M/(L<sup>2</sup> · T)].

P tasa de producción de oxígeno por fotosíntesis de las algas (1/T).

R tasa de consumo de oxígeno por la respiración (1/T).

u velocidad del río (L/T).

A área (L<sup>2</sup>).

L<sub>0</sub> DBO<sub>c</sub> en el punto de la descarga (M/L<sup>3</sup>).

N<sub>0</sub> DBO<sub>n</sub> en el punto de la descarga (M/L<sup>3</sup>).

x distancia en el río (L).

DBO<sub>c</sub>

N (M/L<sup>3</sup>)

EDAR "María del Carmen" vierte al "Almendares", ubicado en el kilómetro 14,45 desde la desembocadura y el puente del "Bosque de La Habana" (kilómetro 3,5) en el "Parque Metropolitano".

Con fines de modelación, la sección seleccionada se dividió en segmentos. El criterio asumido para establecer sus límites está relacionado con la homogeneidad de los parámetros morfológicos del río (profundidad, pendiente, ancho, etc.) y con la incorporación al cauce principal de fuentes puntuales o dispersas cuyo impacto en la variación de los parámetros de calidad en estudio, sea significativo. De esta forma, la definición del modelo conceptual estuvo precedida por una profunda inspección física de la zona.

Para la calibración y validación del modelo se utilizaron datos de dos campañas intensivas de medición correspondientes a dos condiciones diferentes de caudal. La primera, típica de época de seca en los meses de noviembre de 1998 a febrero de 1999. La segunda, originada por el paso del ciclón "Irene" en octubre de 1999 y por cambios efectuados en el manejo de las aguas en los meses de noviembre de 1999 a febrero de 2000.

## Parámetros hidrodinámicos

La caracterización hidrodinámica diseñada respondió al propósito de modelación. Según la estrategia asumida, se dirigió a la determinación de la velocidad de las aguas y a partir de ella, los parámetros morfológicos promedio de los segmen-

tos y a cuantificar las cargas que regularmente se incorporan al río a través de los tributarios definidos en el modelo conceptual. En tal sentido, el muestreo del río y sus afluentes, para las mediciones de calidad, llevó aparejado las correspondientes mediciones de caudal.

La determinación de los parámetros hidrodinámicos se realizó con trazadores radiactivos y fluorescentes.<sup>2</sup> La velocidad de la corriente se determinó por el método del tiempo de tránsito del trazador y el caudal por la técnica de integración.<sup>3</sup>

Durante la primera campaña realizada, se empleó el  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  (7 GBq) eluido del generador de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , como trazador. El paso de la nube radiactiva fue registrado on-line con una sonda de centelleo sólido de NaI(Tl) acoplada a un ratímetro portátil (Kontron Electronic, France).

En los estudios de trazado de la segunda campaña se usó una disolución 20 % de rodamina-WT. El paso del trazador se registró por el método del muestreo y para las mediciones de fluorescencia, se empleó el fluorómetro Turner (10-005, USA), con un error de 0,1 ppb.

Para garantizar la continuidad de la información registrada a través del río, la inyección del trazador se realizó en la estación de medición del segmento anterior.

#### Medición de la DBO, el OD y la concentración de $\text{NH}_4^+$

Para las mediciones de calidad, se estableció una red de 22 estaciones de muestreo. Algunas fueron ubicadas en los tributarios con el fin de calcular las cargas incorporadas al río y el resto, en el cuerpo principal para valorar el impacto de estas en la calidad del agua. Las muestras fueron extraídas del centro de la corriente y conservadas en botellas de polietileno. La  $\text{DBO}_5$  se determinó por el método de dilución y siembra.<sup>4</sup> El modelo utiliza la  $\text{DBO}_{\text{última}}$  para las predicciones. Según McGraw-Hill,<sup>5</sup> 1,43 es el valor típico de la razón  $\text{DBO}_{20}/\text{DBO}_5$  empleado para fuentes puntuales de agua negras. Considerando el estado de contaminación del "Almendares" se asumió este valor como probable.

La  $\text{DBO}_5$  se determinó sin supresor de nitrificación, por lo que no fue posible establecer la  $\text{DBO}_{\text{on}}$  por esta vía. En lugar del nitrógeno total Kjeldahl (TKN), se modeló la concentración de iones amonio. El factor 4,57 se utilizó para convertir el nitrógeno amoniacal a  $\text{DBO}_{\text{on}}$ . El OD

y la temperatura se determinaron *in situ*, con el oxímetro de campo (OXI-197, France) y un error de 0,2 mg/L y 0,2 °C respectivamente.

#### Determinación de la Demanda de Oxígeno de los Sedimentos

Con el oxímetro y una sonda (CellOx 325, Francia) se siguió la variación del oxígeno disuelto en un volumen de 1,5 L de agua destilada en contacto con una superficie de  $6,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  de sedimentos extraídos en la vecindad de la fábrica de helados "Coppelia", caracterizados por una elevada componente orgánica.<sup>6</sup> Los resultados se compararon con los obtenidos para una disolución blanco sin la presencia de ellos. La demanda de oxígeno de los sedimentos se determinó según la ecuación 4:

$$\text{DOS} = \frac{\Delta\text{OD} \cdot V}{\Delta T \cdot A} \quad (4)$$

donde:

DOS demanda de oxígeno de los sedimentos [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ].

$\Delta\text{OD}$  variación del oxígeno disuelto con relación al blanco ( $\text{g/L}$ ).

$V(\text{L})$  volumen de agua.

$A$  área de la superficie de sedimentos ( $\text{m}^2$ ).

$\Delta T$  tiempo de medición (d).

#### Calibración-validación del modelo.

Las mediciones de calidad obtenidas en la primera campaña así como los parámetros morfológicos e hidrodinámicos, se emplearon en la obtención de las constantes cinéticas que definen el comportamiento del río como un sistema que integra procesos químicos, físicos y biológicos.<sup>7</sup> A partir de estos parámetros y de consideraciones relacionadas con la influencia de fuentes puntuales o dispersas de DBO, iones amonio y OD, se calibraron los respectivos modelos. Los datos experimentales de la segunda campaña se utilizaron en la validación.

Para el cálculo de los parámetros de calidad a partir de las ecuaciones de Streeter y Pheelps, se empleó el programa de computación Rios EP,<sup>8</sup> concebido como una aplicación sobre Windows de 32 bit, que usa el Borland Delfy 6.0 como lenguaje de programación y el procesador matemático 8087.

El método de prueba y error se utilizó como procedimiento de ajuste durante el proceso de calibración/validación del modelo. Como criterio de comparación, se asumió que los valores resultantes del modelo se encontraran dentro del intervalo

de variación de los resultados experimentales.<sup>9</sup>

#### RESULTADOS Y DISCUSION

Como resultado del examen físico de la zona quedó establecido un modelo conceptual que reconoce 11 segmentos para la modelación (Tabla 1). El primero caracteriza al río antes de recibir la descarga del canal de vertimiento de la EDAR "María del Carmen". En los segmentos 2,3 y 4, se consideran los aportes de este canal, con residuos que han recibido tratamiento primario en el mejor de los casos, de los arroyos "Paila" y "Marinero" respectivamente.

El quinto segmento es de poca extensión, sin embargo, la presencia de rápidos en la antigua represa "El Husillo" brinda al río un aporte no despreciable de oxígeno disuelto. En el sexto, se considera el aporte de materia orgánica incorporada al río a través de fuentes dispersas provenientes fundamentalmente de la población que habita en las riberas del río. En el séptimo, la afluencia del arroyo "Santoyo" con nuevos aportes de aguas residuales de origen doméstico. El segmento siguiente, se define por la presencia de la cascada artificial de la papelera "La Cubana" en el puente de la avenida 51 (Marianao) que propicia una reareación artificial.

Más adelante, confluye con el "Almendares" el arroyo "Mordazo" considerado en el tramo 9. Este arroyo recibe en todo su curso, desde las cabeceras de sus afluentes ubicadas en La Güinera, La Fraternidad y El Calvario, aportes significativos de aguas residuales domésticas no tratadas y los vertimientos industriales de la Cervecería "Miguel Oramas" ("La Polar"). Las descargas al río de los efluentes de las fábricas de compotas "Osito" y de Cervezas "Pedro Marrero" ("La Tropical") definen los segmentos 10 y 11 y aunque presentan pequeño caudal son las mayores en cuanto a DBO.

Para realizar la caracterización hidrodinámica, la sección del río se dividió esta vez en cinco tramos (Tabla 2). Una inyección en disparo del trazador, se aplicó al inicio de cada uno y la estación de medición se ubicó aguas abajo, observando la distancia de buena mezcla.

En el primer tramo, la estación de medición se situó justamente antes de la confluencia del arroyo "Paila" con el "Almendares", incluyendo el aporte del canal de evacua-

**Tabla 1.** Segmentos definidos en la modelación.

No.	Desde	Hasta	Final del segmento (km)	Coordenadas del final del segmento		Fuentes de DBO y(o) OD consideradas en el modelo
				N	O	
1	Nacimiento del río	Antes del canal "María del Carmen".	14,45	23 02' 19"	82 24' 04"	Todas las que vierten antes de la confluencia del canal.
2	Canal "María del Carmen"	Antes del arroyo "Paila".	12,11	23 03' 54"	82 24' 20"	Canal "María del Carmen"
3	Arroyo "Paila".	Antes del arroyo "Marinero".	10,25	23 04' 08"	82 24' 07"	Arroyo "Paila"
4	Arroyo "Marinero"	Antes de la Papelera Moderna.	8,2	23 05' 06"	82 24' 01"	Arroyo "Marinero"
5	Papelera Moderna	Antes del puente "El Husillo".	8,13	23 05' 06"	82 24' 04"	Rápidos
6	Puente "El Husillo"	Antes del puente de la cervecería "La Polar".	5,25	23 05' 54"	82 24' 19"	Fuentes dispersas
7	Puente de la "La Polar"	Antes del puente calle 51.	5,05	23 05' 64"	82 24' 41"	Arroyo "Santoyo"
8	Puente de calle 51	Antes del Arroyo "Mordazo".	4,95	24 06' 05"	84 24' 50"	Cascada artificial
9	Arroyo "Mordazo"	Antes de la fábrica "Osito".	4,77	25 06' 05"	85 24' 19"	Arroyo "Mordazo"
10	Fábrica "Osito"	Antes de la cervecería "La Tropical".	3,93	26 06' 44"	86 24' 62"	Fábrica "Osito"
11	Cervecería "La Tropical"	Puente del Bosque de La Habana.	3,5	27 06' 52"	87 24' 40"	Cervecería "La Tropical"

**Tabla 2.** Segmentos definidos para la determinación de caudal en el río "Almendares".

Segmento	Desde	Hasta	Largo del segmento (km)
1	Canal "María del Carmen"	Arroyo "Paila "	2,94
2	Arroyo "Paila"	Arroyo "Marinero"	1,83
3	Arroyo "Marinero"	Puente de "El Husillo"	2,30
4	Puente de "El Husillo"	Puente de "La Polar"	2,50
5	Puente de "La Polar"	Puente del Bosque	2,13

ción de los residuos de la planta de tratamiento en "María del Carmen" (Fig. 1). De forma independiente, se midió el caudal del canal para calcular el del río, antes de la incorporación de la carga.

En el segundo segmento, la medición se realizó antes de la confluencia del arroyo "Marinero", adicionando solo el aporte del arroyo "Paila". En el tercer tramo, se incluyó, además, el caudal del arroyo "Marinero". Este segmento termina antes de la zona de rápidos ubicada en las cercanías del puente de "El Husillo". A manera de comprobación, se determinó el caudal del "Marinero" de forma independiente. El cuarto comprendió los rápidos y su parte final se ubicó antes de la afluencia del arroyo "Santoyo". El último tramo incluyó el aporte de los arroyos "Santoyo" y "Mordazo" y la cascada de la papelera de puen-

tes grandes. En este caso, por problemas de accesibilidad no fue posible subdividir el tramo. El caudal del "Santoyo" se determinó de forma independiente para calcular el del "Mordazo", considerando que no se producía otro aporte significativo de caudal.

El arreglo de aforo utilizado junto a las mediciones de calidad del agua, permitió determinar casi todas las contribuciones de carga consideradas en el proceso de modelación y mostró condiciones de flujo muy deprimidas en la primera campaña (Tabla 3). Esta es precisamente, la condición más frecuente del río. Tanto el caudal del cauce principal como el de los tributarios es mucho menor que los usados en el proceso de validación de los modelos. La segunda campaña se realizó luego del paso del ciclón "Irene" por la ciudad de La Habana. La DBO de

las descargas de la fábrica de computas "Osito" y de la cervecería "Pedro Marrero" utilizada en el modelo, fue la reportada en el inventario de fuentes contaminantes del informe de la cuenca del "Almendares" (Informe, Consejo de la Cuenca Almendares-Vento, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Ciudad de La Habana, 1998.). No se hace referencia acerca de los tenores de  $\text{NH}_4^+$  y OD, por lo que no pudieron ser considerados durante la modelación.

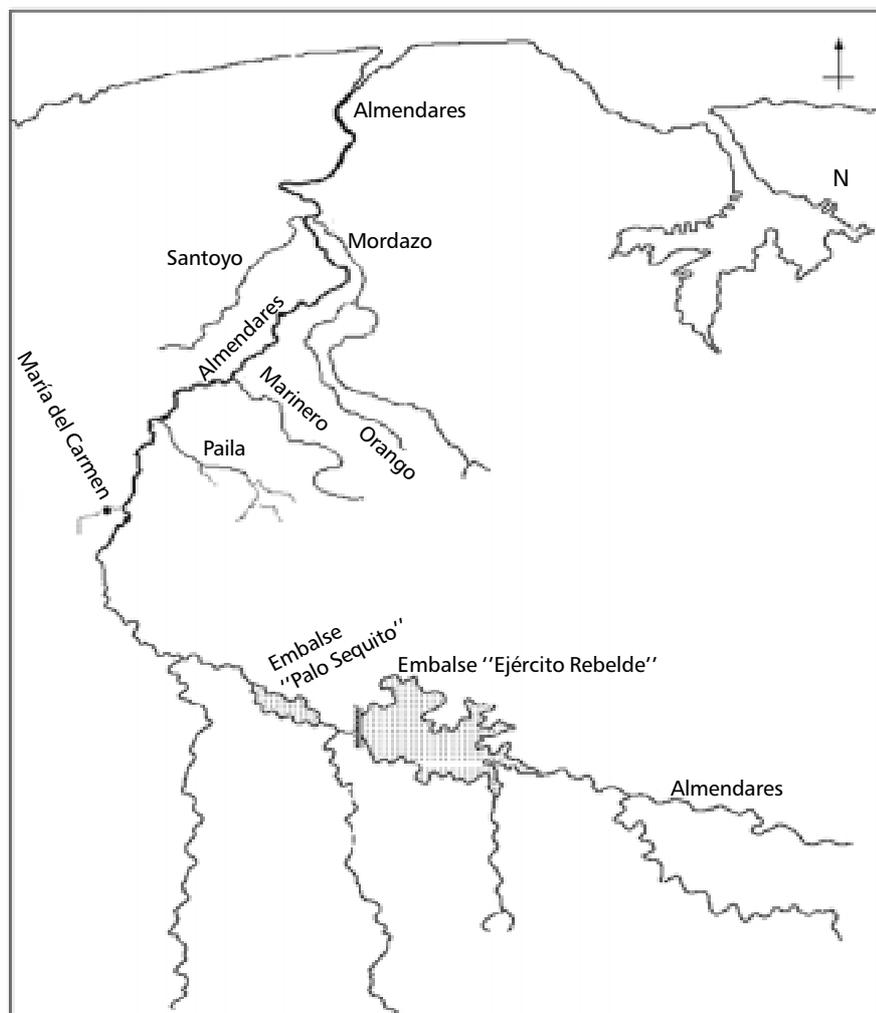
Con relación a las fuentes dispersas, se estimó la incorporación de una descarga equivalente a 778 kg/(d · km) de DBOc, considerando una población de aproximadamente 50 000 personas en el segmento 6 del modelo conceptual y una producción per cápita de 45 g/d de DBO.<sup>10</sup>

Las DBO se reportan con la incertidumbre expandida para un 95% de confianza.<sup>10</sup> El OD y la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , con la desviación estándar.

Resulta alarmante la baja concentración de oxígeno disuelto en los tributarios. Con excepción del arroyo "Santoyo" en ambas campañas, del canal "María del Carmen" en la segunda y del arroyo "Marinero" en la primera, el resto en mayor o menor medida, contribuyen de forma agresiva a la disminución del oxígeno disuelto en el río, sobre todo, en la primera campaña, en la que el oxígeno se mantiene en casi

**Tabla 3.** Caudal y mediciones de OD, DBO<sub>5</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de los tributarios.

Tributario	Primera campaña				Segunda campaña			
	Q (m <sup>3</sup> /s)	DBO <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	OD	Q (m <sup>3</sup> /s)	DBO <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	OD
Río								
"Almendares" antes de "María del Carmen"	0,39 ± 0,05	20,12 ± 6,20	0,03 ± 0,001	4,80 ± 0,24	1,80 ± 0,15	41,00 ± 12,71	0,13 ± 0,01	5,9 ± 0,30
"María del Carmen"	0,14 ± 0,03	37,04 ± 11,47	10,70 ± 1,18	1,25 ± 0,06	0,42 ± 0,04	41,85 ± 12,97	2,82 ± 0,31	4,14 ± 0,21
"Paila"	0,02 ± 0,01	60,21 ± 18,60	4,14 ± 0,44	0,13 ± 0,01	0,06 ± 0,01	70,63 ± 21,90	1,54 ± 0,17	1,22 ± 0,06
"Marinero"	0,23 ± 0,04	29,11 ± 8,99	3,48 ± 0,38	3,31 ± 0,17	0,67 ± 0,06	37,41 ± 11,60	3,66 ± 0,40	0,73 ± 0,04
Fuentes dispersas	0,36 ± 0,06				0,36 ± 0,06			
"Santoyo"	0,45 ± 0,04	8,03 ± 2,48	7,74 ± 0,85	4,82 ± 0,24	0,65 ± 0,06	9,05 ± 2,79	2,26 ± 0,25	4,20 ± 0,21
"Mordazo"	0,67 ± 0,06	8,96 ± 2,78	9,51 ± 1,05	1,50 ± 0,08	0,99 ± 0,08	16,15 ± 4,96	5,37 ± 0,59	1,81 ± 0,09
Fábrica "Osito"	(2,0 ± 0,2) · 10 <sup>-3</sup>	2 800			(2,0 ± 0,2) · 10 <sup>-3</sup>	2 800		
"La Tropical"	(2,0 ± 0,2) · 10 <sup>-3</sup>	2 800			(2,0 ± 0,2) · 10 <sup>-3</sup>	2 800		
<b>TOTAL</b>	<b>2,26 ± 0,12</b>				<b>4,78 ± 0,41</b>			



**Fig. 1.** Cuenca del Río "Almendares".

toda la zona en concentraciones inferiores a 3 mg/L (Figuras 2 y 3).

Si se considera al río "Almendares" como un cuerpo receptor de

categoría B, según la norma cubana,<sup>12</sup> propia para ríos utilizados en actividades recreativas que presuponen el contacto directo con el

agua, y(o) la utilización de esta para regadío de cultivos, resulta inadmisibles el vertimiento de descargas que provoquen la disminución del oxígeno disuelto en el río a concentraciones de 3 mg/L.

Los rápidos de "El Husillo", el arroyo "Santoyo" y sobre todo, la cascada artificial de la papelera "La Cubana" en el puente de la avenida 51, imprimen una notable mejoría a la calidad del agua que es nuevamente lesionada sobre todo, por las descargas de la fábrica de computas "Osito" y de la cervcería "Pedro Marrero".

Por inspección visual, el modelo obtenido ajusta adecuadamente los resultados experimentales de OD, tanto para los usados en la calibración como para los empleados en la validación.

La norma cubana,<sup>11</sup> también se refiere a la DBO<sub>5</sub> y limita a 40 mg/L el promedio para descargas de aguas residuales, requisito este incumplido por la mayoría de los tributarios.

Durante la primera campaña (Fig. 4) la DBO<sub>20</sub> en el río llega a alcanzar magnitudes realmente preocupantes (120 mg/L). No se debe olvidar que son representativos de época de estío. Por otra parte, las condiciones tan favorables de caudal de la segunda campaña, debido al paso del ciclón "Irene", posibilitaron una relativa homogeneidad en las DBO<sub>20</sub> (Fig. 5), las cuales oscilaron entre 45 y 65 mg/L, a pesar de que en algunos casos (arroyos "Paila" y "Marinero"), la carga incorporada al río resultó superior que durante la primera.

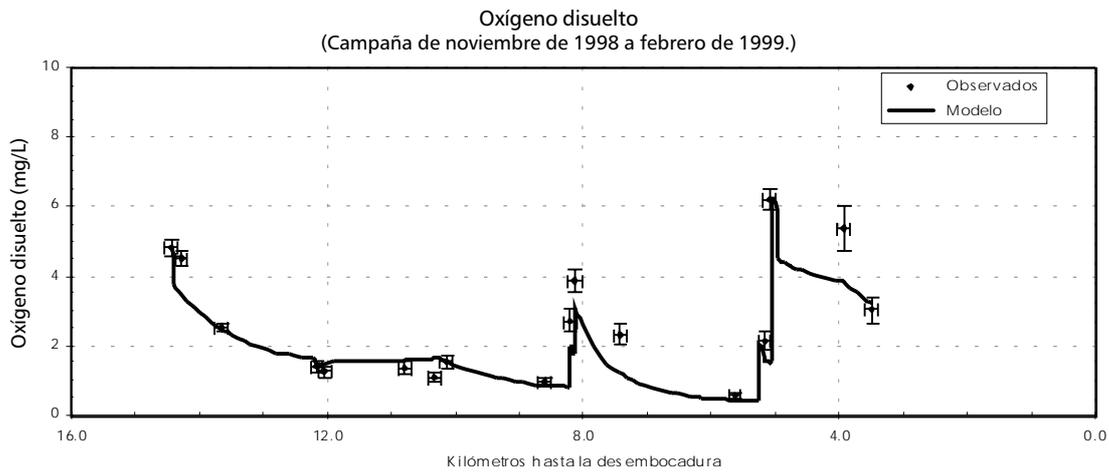


Fig. 2. Datos experimentales y modelo de OD para la primera campaña.

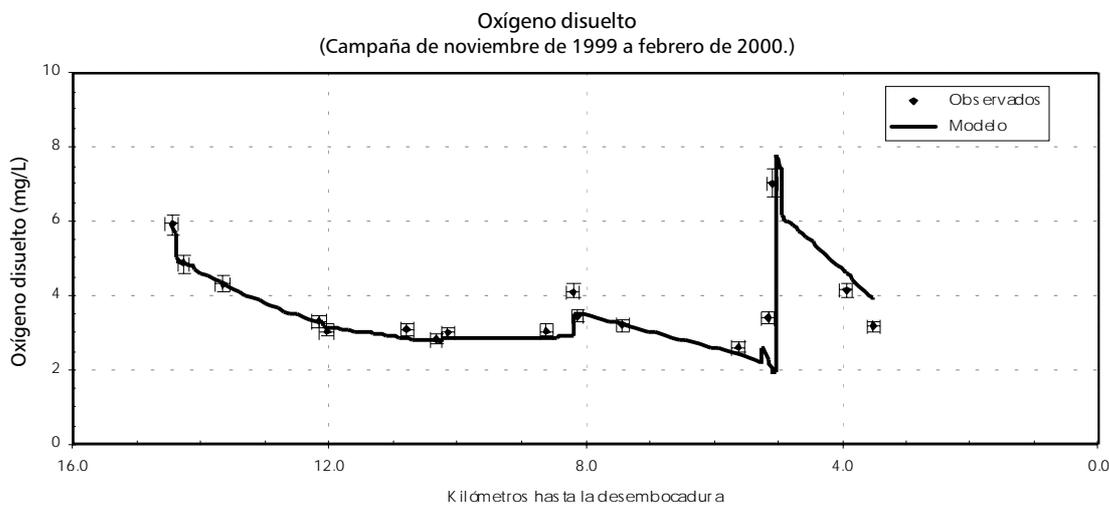


Fig. 3. Datos experimentales y modelo de OD para la segunda campaña.

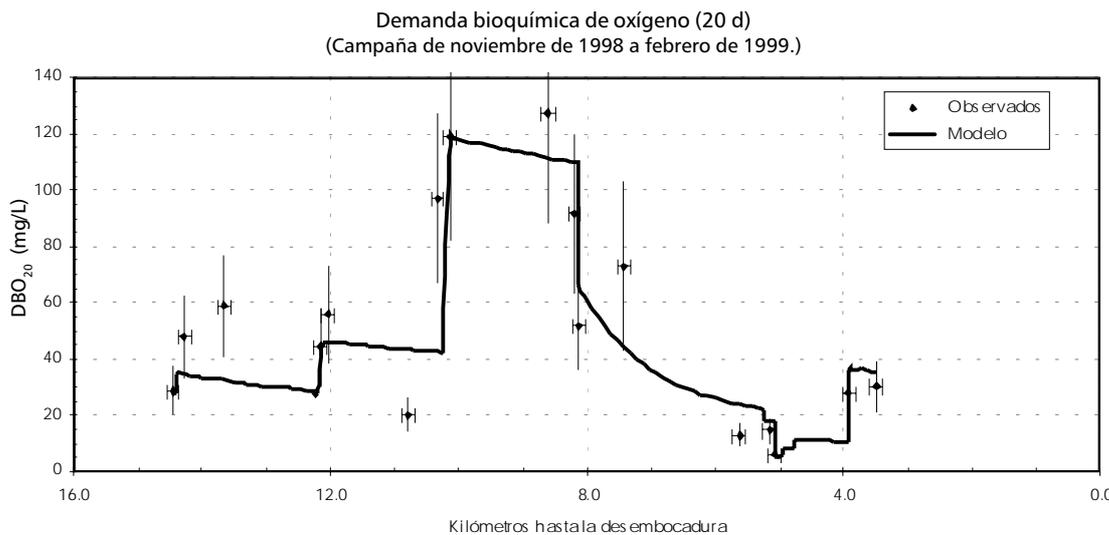


Fig. 4. Datos experimentales y modelo de la DBO<sub>20</sub> para la primera campaña.

Durante la etapa de calibración, se logró describir con el modelo teórico de Streeter y Phelps el 82,35 % de los resultados experimentales del OD y

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, y el 88,24 % de la DBO<sub>20</sub>. En la validación, el comportamiento de los tres parámetros fue mejor descrito por el modelo seleccionado, con un 100 %

de ajuste para los datos de DBO<sub>20</sub> y de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y un 88,24 % para el OD.

Se destaca el buen ajuste de los resultados experimentales de la

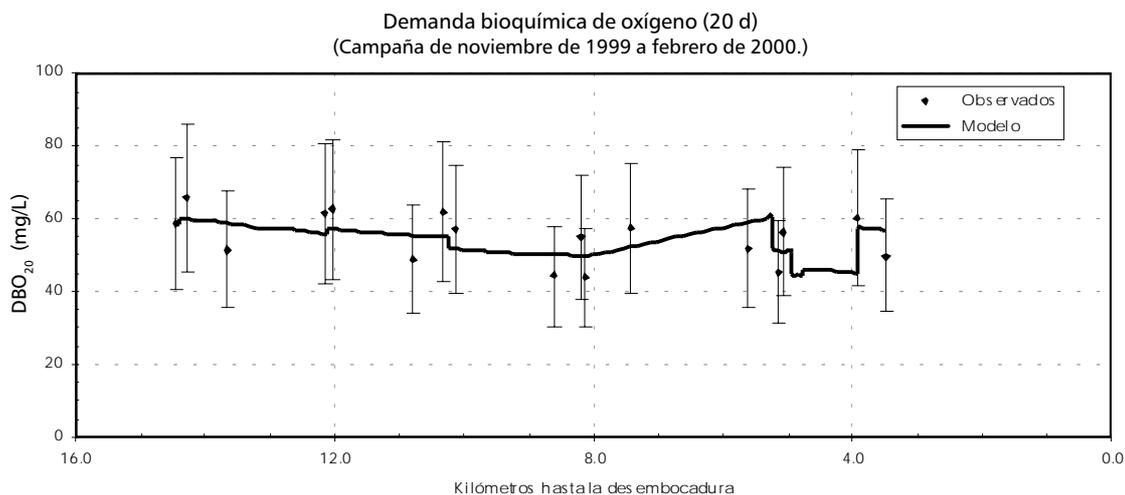


Fig. 5. Datos experimentales y modelo de la  $DBO_{20}$  para la segunda campaña.

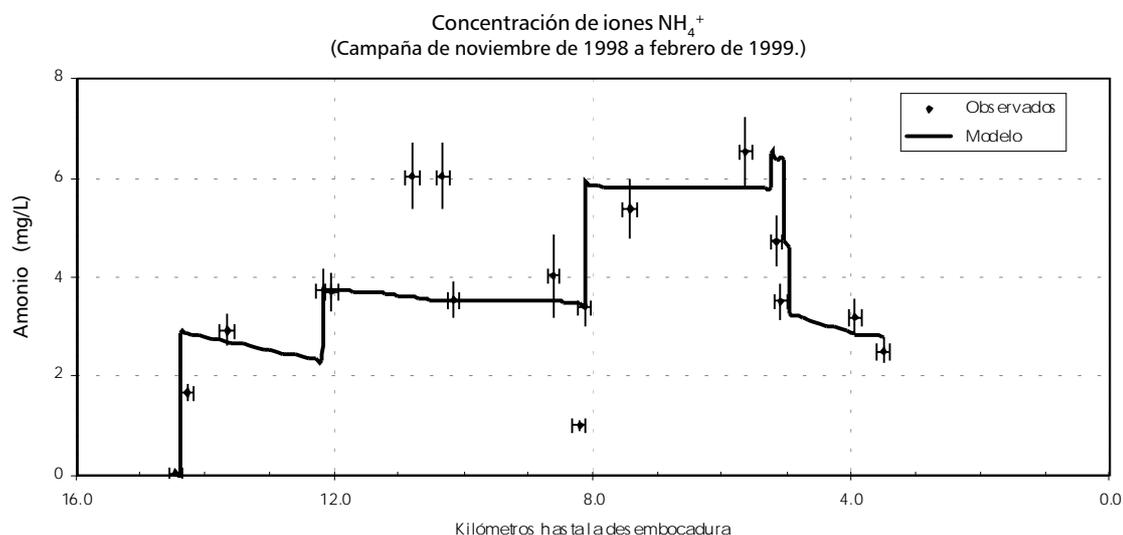


Fig. 6. Datos experimentales y modelo de  $NH_4^+$  para la primera campaña.

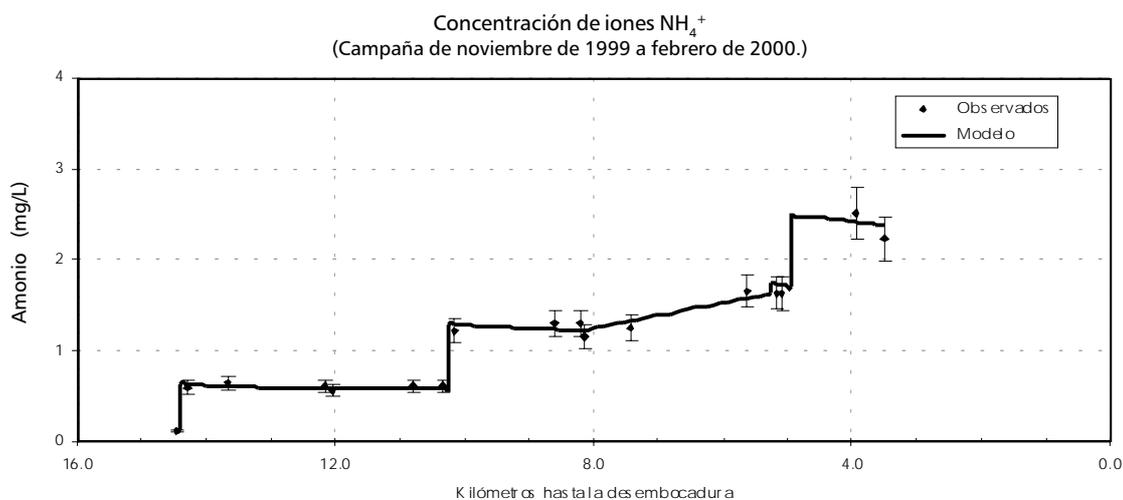


Fig. 7. Datos experimentales y modelo de  $NH_4^+$  para la segunda campaña.

concentración de iones amonio ( Figuras 6 y 7), a pesar de no haberse tenido en cuenta la participación del nitrógeno orgánico en el consumo

de oxígeno. No obstante, la determinación del nitrógeno total Kjeldahl (TKN) podría ajustar la descripción de la cinética del proceso.

Durante la calibración del modelo, se consideró la incorporación de cargas puntuales de OD de 82,5 y 547 kg/d, en los segmentos 5 y 8 a

causa de los rápidos y de la cascada artificial respectivamente. Los valores se estimaron multiplicando el incremento de OD observado justamente después de los rápidos o la cascada, por el caudal del río. En correspondencia con el caudal y los tenores de oxígeno disuelto, se determinó que durante la segunda campaña se incorporaron al río cargas de 153 y 1792 kg/d de oxígeno.

En las dos etapas del proceso, se consideró la influencia de los sedimentos en el consumo del oxígeno disuelto. Si  $1,85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  fue el valor calculado para el segmento 2, con cuyos sedimentos se realizó la determinación experimental de la DOS, se estimó el 80 % de ese valor para los segmentos 3, 4, 6 y 9. Por otra parte, no se tuvo en cuenta la influencia de la respiración y la fotosíntesis.

### CONCLUSIONES

Fue calibrado y validado el modelo combinado, advectivo de estado estacionario de Streeter y Phelps para describir el comportamiento del oxígeno disuelto, la demanda de oxígeno carbonácea y de la concentración de iones amonio, a lo largo de la sección estudiada. El modelo puede emplearse para valorar alternativas de saneamiento del río "Almendares".

Resultó válido el modelo conceptual definido que incluye: la selección de los límites de los segmentos, la ubicación de las descargas puntuales o dispersas y la consideración del estado permanente en la descarga de las fuentes contaminantes y de la morfología del río.

### BIBLIOGRAFIA

1. Borroto J., Domínguez J., Abreu A.M., Ortueta M. Estudios de contaminación y transporte de poluentes en el río Almendares con técnicas de trazadores y modelos matemáticos. Memorias del III Taller de la Cátedra de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Sección Modelación Ambiental. Ciudad de La Habana, 1997.
2. Plata A., Moser M. Guide to the Safe Handling of Radioisotopes in Hydrology. IAEA, Viena, 37, 1990.
3. Domínguez J., Borroto J., Abreu A.M., Ortueta M., Pérez E. Medición de caudal en el río Almendares empleando  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  como radiotrazador. Serie Contribución a la Educación y Protección Ambiental, Vol. Hombre y Medio Ambiente, Editorial Academia, Ciudad de La Habana, 173, 1998.
4. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th edition Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Método de dilución y siembra, 1998.
5. McGraw-Hill Series in Water resources and Environmental Engineering. Models for Water Quality Management. England, 13, 1981.
6. Pérez E., Domínguez J., Borroto J. calidad de agua del río Almendares. Especiación sólida de trazas de metales en sedimentos del río Almendares. Contribución a la Educación y Protección Ambiental, Editorial Academia, Ciudad de La Habana, Vol. 0, 10, 1999.
7. Domínguez J., Borroto J., Pérez E. y otros. Determinación de parámetros del modelo de calidad de agua del río Almendares. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. Sección Química Ambiental. Editorial Academia, Ciudad de La Habana, Vol. 2, 2001.
8. Hernández A., Domínguez J., Borroto J. Water Quality Software. Instec Rios EP, V. 1, 2002.
9. Montalvo J.F. y Perigó Perigó E. Valoración de la calidad ambiental en la zona NE del Golfo de Batabanó por medio de los métodos de análisis multivariado. Contribución a la Educación y Protección Ambiental. Sección Química Ambiental. Editorial Academia, Ciudad de La Habana. Vol. 3, 2002.
10. EURACHEM/CITAC Guide. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements. Second Edition, 2000.
11. NC 27:1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones.

**ozoney®**  
NUEVO OZONIZADOR DOMÉSTICO

OZONEY® está diseñado para para desinfectar pequeños volúmenes de agua para beber, lavar los alimentos que se ingieren crudos, enjuagar la vajilla y los utensilios de cocina, así como para la higiene bucal y otros usos.

OZONEY® puede convertirse en un gran aliado para la salud, ya que permite obtener agua de elevada calidad sin tener que hervir el agua o adquirir agua embotellada, porque al emplearlo se dispone de todas las ventajas que proporciona el ozono, entre las que se encuentra su elevado poder germicida. Su poder desinfectante es mayor que el de todos los agentes de este tipo que se emplean hasta el momento.

OZONEY® es ideal para oficinas, el hogar u otros lugares donde se requieran pequeños volúmenes de agua para consumo humano con elevada calidad.



#### Características técnicas

- Alimentación: 110 V-CA +/- 10 %.
- Frecuencia: 50 Hz .
- Concentración de ozono en el agua: 0,4 ppm (mínimo).
- Caudal de agua recomendado: 1,5 a 2 L/min .
- Potencia: 10 VA (máximo).
- Dimensiones: (195X285X185) mm .
- Peso: 1,8 kg .



**Centro de Investigaciones del Ozono**

Calle 230 y 15, No. 1313, Siboney, Playa, Apartado Postal 6412, Ciudad de La Habana, Cuba.

Teléfonos: (53-7) 271-9264; 271-2089. Fax: (53-7) 271-0233. E-mail: [ozono@infomed.sld.cu](mailto:ozono@infomed.sld.cu) <http://www.ozono.cubaweb.cu>