

HACIA UNA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE CURVAS DE CALIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (CdF)*

Sandra Rocío Castiblanco Montes**

Adela María Duque Hoyos**

Andrés Eduardo Torres Abello***

Resumen: en la literatura se pueden encontrar algunos métodos europeos para definir políticas de vertimientos urbanos de tiempos de lluvia en los ríos. Uno de ellos, el llamado método danés, intenta definir límites de vertimientos por medio de la construcción de curvas Calidad-duración-Frecuencia (CdF), teniendo como criterio de calidad la supervivencia piscícola. Se piensa que tales curvas podrían ayudar en el dimensionamiento de estructuras de tratamiento de aguas, en el diseño de lineamientos ambientales y sanitarios e incluso en desarrollos urbanos sostenibles. El presente artículo intenta definir (desde un punto de vista teórico) una metodología para la construcción de curvas CdF para los ríos colombianos por medio de analogías con métodos hidrológicos, teniendo como criterio mínimo de calidad la supervivencia de los peces.

Palabras clave: estructuras de tratamiento de aguas, políticas de vertimientos urbanos, curvas CdF.

Abstract: In order to define policies for urban waste of rainy periods in the rivers, several methods may be found in the European literature. One of them, the so called Danish method, tries to define limits of waste by constructing Quality-duration-Frequency (CdF) curves, based on the survival of fish. It is believed that such curves could help in the sizing of water treatment structures, in the design of environmental

* Fecha de recepción: 31 de marzo de 2003. Fecha de aceptación para publicación: 2 de octubre de 2003.

** Ingenieras civiles, Pontificia Universidad Javeriana.

*** Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, máster en Ingeniería Civil, INSA, Francia. Profesor instructor, Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Miembro de los grupos de investigación Hidrociencias e Informática y Métodos Matemáticos Aplicados. Correo electrónico: andres.torres@javeriana.edu.co.

and sanitation guidelines, and even in the sustainability of urban developments. This paper intends to define (theoretical framework only) a methodology for the construction of CdF curves for the Colombian rivers by means of analogies with hydrological methods, having like minimum criterion of quality measured by the survival of fish.

Key words: Water treatment structures, urban waste policies, CdF curves.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se presenta un evento de lluvia, el agua puede arrastrar toda la suciedad que encuentra a su paso. En las ciudades, estas aguas arrastran aceites, materia orgánica y diferentes contaminantes de la atmósfera y en el campo arrastran pesticidas, abono, etc. [Itsemap Ambiental, 1994]. Se puede afirmar que los *vertimientos urbanos en tiempos de lluvia* (VUTL) son todas las aguas que después de caer sobre una cuenca urbanizada se unen al medio receptor sin pasar por un sistema de depuración, es decir, un tratamiento previo [Torres, 2002].

Para caracterizar el agua existen ciertos parámetros comúnmente utilizados como los sólidos en suspensión, las materias oxidables, el oxígeno disuelto, etc. Sin embargo, se puede decir que el conjunto (sistema saneamiento, medio acuático) es un sistema complejo, ya que está constituido por un gran número de elementos (contaminantes caracterizados por parámetros) unidos entre ellos de una manera no muy clara. Las relaciones entre éstos elementos son numerosas y sus acciones pueden tener influencia en sentidos opuestos sobre el sistema. La complejidad implica que toda acción sobre un elemento (medio receptor) puede tener numerosas consecuencias, generalmente imposibles de prever [Chocat, 1999/2000, citado en Torres, 2002]. Por lo anterior, para medir la calidad global del agua se piensa que el mejor enfoque es el análisis de las comunidades presentes en el medio, puesto que presentan ciclos de vida largos y escaso poder de movimiento, lo cual permite la acción directa y continua de sustancias que alteran las condiciones del medio acuático donde viven. Se puede afirmar que el pez, cuando su población es superior al resto de los organismos con que comparte el mismo hábitat, es un indicador de la calidad del agua, puesto que se encuentra invariablemente en un ecosistema de características definidas y fácilmente identificables [Gómez, 1998], además es un organismo observable a simple vista, siendo éstas las razones por las cuales la mayor parte de los investigadores lo consideran el mejor indicador de calidad del agua.

A causa del afán por controlar la contaminación existente, algunos países europeos vieron la necesidad de desarrollar diferentes métodos para controlar la calidad global del agua, que pueden incluir desde índices de contaminación hasta curvas Calidad-duración-Frecuencia (CdF). El objetivo de este trabajo es definir una metodología para la construcción de curvas CdF con la ayuda de un organismo acuático como bioindicador.

2. LOS MÉTODOS EXISTENTES

2.1. LOS MÉTODOS EUROPEOS

En España se desarrolló una metodología basada en ciertos índices que se aplican a los macroinvertebrados presentes en el medio para analizar la calidad biológica del agua. Estos índices son:

- BILL [Prat, 1994]: índice relacionado con el cambio del tiempo y la contaminación a partir de los organismos macroinvertebrados.
- FBILL [Prat, 1994]: índice a partir del BILL, que adopta adicionalmente el nivel taxonómico para clasificar los niveles de calidad del agua.
- BMWP (*Biological Monitoring Working Party*) [Sánchez-Ortega, 1988, citado en Diputació de Barcelona, 2001]: índice aditivo que suma puntos de acuerdo con el nombre de la familia encontrada; éstas tienen un valor de 1 a 10 según su sensibilidad a la polución.
- QBR [Diputació de Barcelona, 2001]: índice que relaciona la calidad de la vegetación sobre las orillas de los ríos; asigna una puntuación de 0 a 100 teniendo en cuenta la cobertura, la estructura y la diversidad de especies vegetales.
- ECOSTRIMED [Diputació de Barcelona, 2001]: índice ecológico integrado que mide el estado de salud del sistema fluvial, teniendo en cuenta los peces, la calidad del hábitat, la calidad de la vegetación sobre la orilla, parámetros físico-químicos, entre otros.

En otros países europeos se utilizan diferentes métodos para fijar límites de contaminación de vertimientos, entre los cuales los más importantes son [Torres, 2002]:

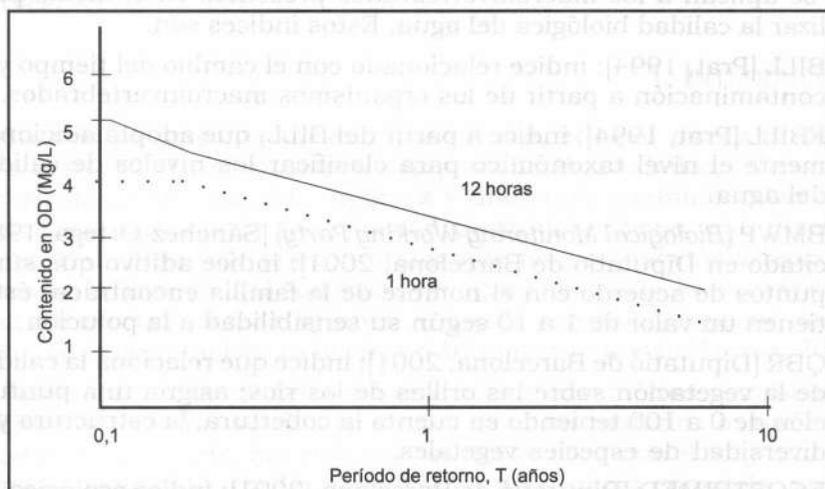
- Método de la agencia *Rhin-Meuse*: método francés que considera que se deben tener en cuenta los impactos sobre el medio natural desde el tiempo seco hasta los eventos más lluviosos gradualmente.
- Método UPM: método británico que categoriza los vertimientos combinados (aguas residuales y lluvias) como satisfactorios y no satisfactorios a partir de los impactos visuales y la calidad del agua.
- AQUATOX [US EPA, 2002]: modelo de simulación para los ecosistemas acuáticos de agua dulce, que predice el signo de varios agentes contaminantes, tales como alimentos y tóxicos orgánicos y sus efectos sobre el ecosistema, incluyendo peces, invertebrados y plantas acuáticas.

2.2. EL MÉTODO DANÉS

Otro de los métodos europeos es el danés [Torres, 2002]; éste define como causa principal de la contaminación de vertimientos la degradación de la calidad de los cursos de agua (el contenido de materia degradable) con la concentración de oxígeno como el criterio fundamental de calidad de la misma. Este método se adapta a aquellas si-

tuaciones en las que la preservación de la vida piscícola es muy importante. El método presenta una serie de curvas de Calidad-duración-Frecuencia (CdF), como la que se muestra en la Figura 1, para definir los objetivos de la calidad de los cursos de agua en tiempos de lluvia.

Figura 1. Criterio para la concentración aceptable en oxígeno disuelto en ciprínidos (Curvas CdF)



Fuente: [Torres, 2002, adaptado de Bertrand-Krajewski, 1985].

Para diferentes tipos de peces estas curvas permiten definir un objetivo expresado en concentración de oxígeno disuelto —por debajo del cual no es recomendable situarse— en función de un periodo de retorno fijado.

Las curvas CdF sirven para fijar políticas que conduzcan a reducir los costos de las soluciones de saneamiento adoptadas en las comunidades (como plantas de tratamiento, por ejemplo), ya que determinan el nivel máximo de contaminación que se puede tolerar para conservar el medio receptor en un estado aceptable, desde el punto de vista de la vida piscícola, en función del periodo de retorno del evento contaminante. A pesar de la importancia que pueden tener estas curvas para futuros desarrollos urbanos, no se tiene ninguna evidencia de la existencia de una metodología que sirva para construirlas

2.3. BIOINDICADORES

Un organismo es un indicador de calidad de agua cuando se encuentra invariablemente en un ecosistema de características definidas y cuando su población es, en porcentaje, superior a la del resto de los organismos con los que comparte el mismo hábitat.

Es importante reconocer el gran valor que tiene la bioindicación como un método para evaluar la calidad del agua. La presencia de una comunidad en un cuerpo de agua determinado es un índice indiscuti-

ble de las condiciones que allí prevalecen y de que las fluctuaciones de contaminación que pueden presentarse no son lo suficientemente fuertes como para provocar un cambio significativo en la misma.

Se conocen cerca de cien índices de bioindicación [Roldán, 1999]. Varios autores [Prat y Ward, 1994] consideran que los bioindicadores de mayor popularidad son los macroinvertebrados acuáticos, puesto que tienen la ventaja de poseer un tiempo de vida largo y se pueden observar a simple vista. Les siguen en popularidad las algas, los protozoos y las bacterias.

En la actualidad se han discutido algunos métodos biológicos para la evaluación de la calidad del agua [Prat, 1998]. En cuanto a las especies, los macroinvertebrados, las macrófitas y las algas se consideran como indicadores puntuales de materia orgánica, eutrofización y acidificación. A su vez Prat [1998] comparó los diferentes bioindicadores y llegó a la conclusión de que los macroinvertebrados ofrecen métodos más sensitivos, económicos y simples, que son seleccionados por la mayor parte de los investigadores como los mejores indicadores de calidad del agua.

En estos momentos existen tres enfoques principales para evaluar la respuesta de las comunidades de los macroinvertebrados a la contaminación, a saber: el *sapróbico*, el de *diversidad* y el *biótico*.

En el mantenimiento de un estado óptimo para el desarrollo de un ecosistema fluvial se presentan como parámetros de gran importancia la concentración de amoníaco y los nitritos, el fósforo y los nitratos, los cloruros y los sulfatos, la DQO, los sólidos en suspensión y el oxígeno disuelto. La Tabla 1 muestra dichos parámetros y las variables de medición asociadas.

Tabla 1. Función e indicación de parámetros de mantenimiento de la calidad de un ecosistema fluvial

Parámetro	Indicador de
Concentración de amoníaco y nitritos	Toxicidad del medio
Fósforo y nitritos	Potencialidad de episodios de eutrofización
Cloruros y sulfatos	Actividad humana en la zona
DQO, Amoníaco, nitritos, sólidos en suspensión y oxígeno disuelto	Grado de habitabilidad de las aguas para la vida piscícola

Fuente: adaptado de [Diputació de Barcelona, 2001].

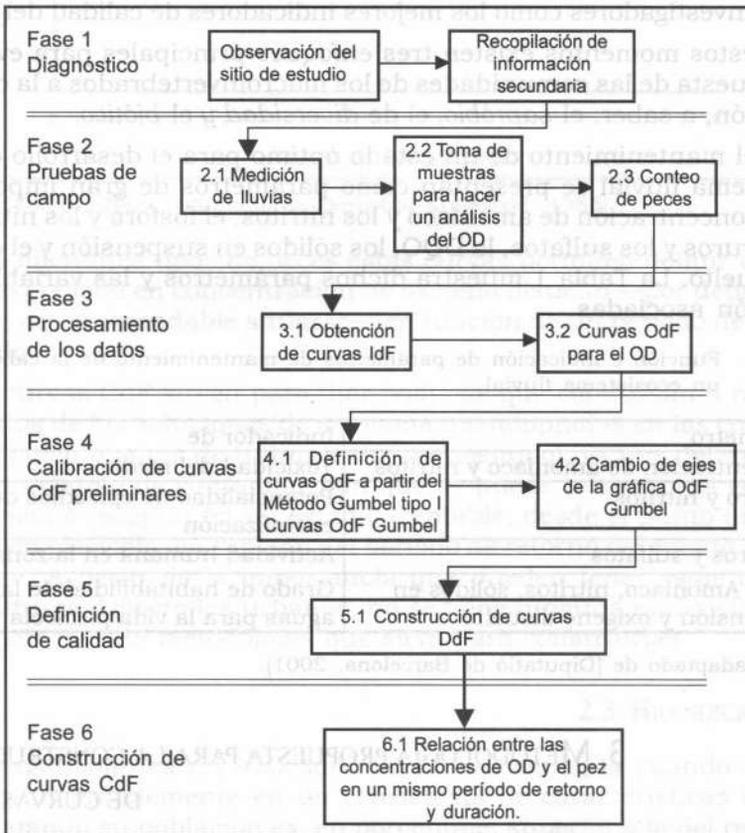
3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS CdF

Se puede afirmar que el comportamiento del oxígeno disuelto con respecto a la duración y el período de retorno es similar al comportamiento de la intensidad de lluvias con respecto a las mismas variables. Para un periodo de retorno alto (eventos de baja frecuencia), las lluvias tienen una intensidad alta por lo cual aparecen eventos ex-

tremos; de igual forma, para eventos con periodo de retorno alto los eventos contaminantes van a tener también una concentración de oxígeno disuelto muy baja, lo cual es un evento poco común. Asimismo se podría decir que entre la concentración de oxígeno disuelto y la duración, con pasos de observación muy pequeños, se encuentran eventos extremos, tanto para la intensidad de las lluvias como para la concentración de oxígeno disuelto. Debido a lo anterior, la metodología presentada en este artículo proviene de métodos heredados de la hidrología.

Para la construcción de curvas CdF se plantean las siguientes fases: diagnóstico, pruebas de campo, procesamiento de los datos, calibración de curvas preliminares, definición de calidad y la construcción de las curvas CdF definitivas. La Figura 2 presenta la metodología propuesta de forma esquemática.

Figura 2. Metodología propuesta para la construcción de curvas CdF



Fuente: presentación de los autores.

3.1. FASE 1: DIAGNÓSTICO

3.1.1. OBSERVACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

Se trata de una identificación preliminar de la zona de estudio que permita determinar la posible información necesaria para desarrollar la metodología. Esta información tiene que ver con el número de habitantes y los hábitos alimenticios que estén relacionados con los peces, entre otros. Es indispensable observar la red de acueducto existente, como también el sistema de depuración, el cual cumple un papel importante en la construcción y los resultados de la metodología a desarrollar.

3.1.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Se sugiere que la información mínima a recolectar sea la siguiente:

- Características generales de la zona (clima, economía y tipo de vegetación).
- Características generales de las comunidades de peces existentes (población piscícola predominante, reacción de dichas poblaciones a la contaminación).
- Características generales del sistema de saneamiento pluvial (sistema de alcantarillado, manejo de las aguas lluvias, intensidad de la lluvia en el sitio de estudio, sistemas de tratamiento de aguas, etc.).

3.2. FASE 2: PRUEBAS DE CAMPO

3.2.1. MEDICIÓN DE LLUVIAS

Es necesario expresar la cantidad de lluvia, Δh , como la altura de lluvia precipitada y acumulada. La medida característica de lluvia se puede decir que es la altura pluviométrica dada en mm y medida diariamente [Monsalve, 1995]. Se debe tener también en cuenta la duración del evento de lluvia medido en minutos. Es recomendable desarrollar la medición de lluvias cada diez minutos, con el fin de obtener datos más precisos que permitan una visión más clara del comportamiento en el sitio de estudio.

3.2.2. TOMA DE MUESTRAS PARA HACER UN ANÁLISIS DEL OXÍGENO DISUELTO (OD)

La *American Society for Testing and Materials N° 148-1* plantea los métodos de muestreo del oxígeno disuelto de Winkler y el electrométrico, que pueden ser utilizados indistintamente.

3.2.3. CONTEO DE PECES

Comprende las labores de inspección de la zona para examinar las características del fondo, la detección de los peces y la toma de muestras.

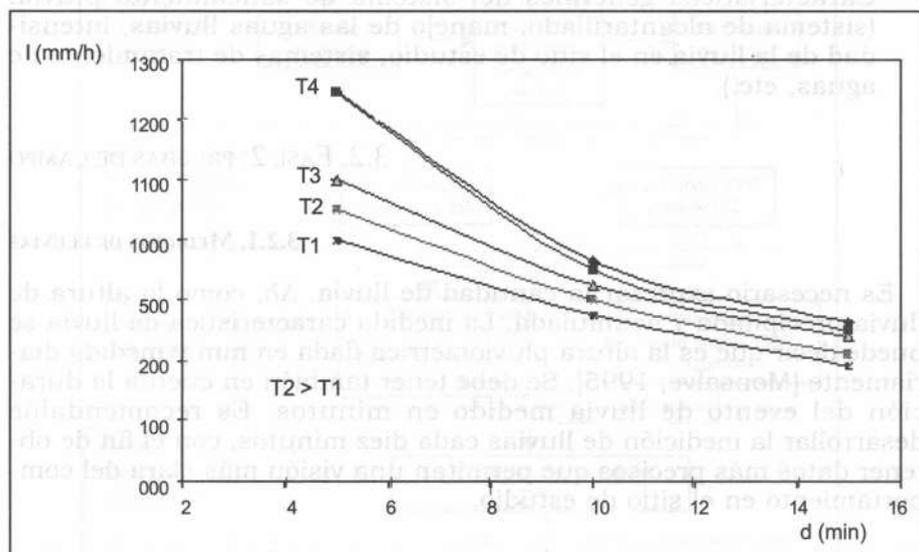
La recolección de muestras se puede realizar con caña de pescar, arpón, flecha, redes, trampas, una encuesta en la cesta de los pescadores, etc. [Ramírez, 1998]. Existe otro método de recolección llamado Radiofaro (Bio Sonics, Seattle), el cual permite inyectar pequeñas unidades eléctricas (10 mm x 2,1 mm) embebidas en cristal en la cavidad abdominal de un pez, utilizando un dispositivo semejante a una jeringa. La etiqueta es activada por medio de una unidad excitadora que evoca una señal distinta, la cual permite reconocer el pez y procesar inmediatamente los datos.

3.3. FASE 3: PROCESAMIENTO DE DATOS

3.3.1. OBTENCIÓN DE CURVAS IdF

Para obtener las curvas IdF se recomienda hacer un análisis frecuencial de lluvias utilizando cualquier método encontrado en la literatura especializada [Monsalve, 1995]. A partir de series de intensidades pluviográficas es posible encontrar los periodos de retorno T en una duración d de lluvias específica. La Figura 3 muestra las curvas IdF características.

Figura 3. Curvas IdF



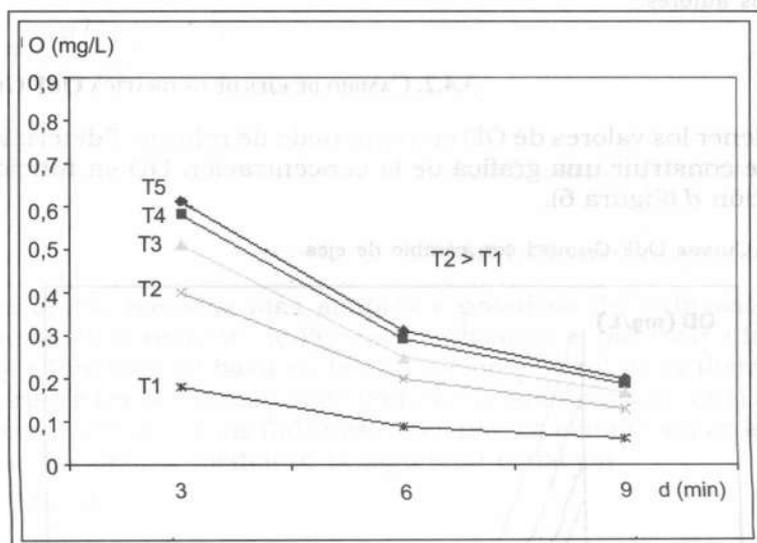
Fuente: los autores.

3.3.2. CURVAS OdF PARA EL OXÍGENO DISUELTO

Cuando se tienen los datos de los cambios del oxígeno disuelto tomados en campo a través de varios años, simultáneamente con el reporte de las lluvias, se procesan los datos de una forma similar al método para hacer curvas Intensidad-duración-Frecuencia. Para ello se recomienda el siguiente procedimiento:

- Se considera una muestra de N eventos medidos durante P años.
- Se escoge un paso de observación del oxígeno d , por ejemplo 10 minutos. Para simplificar los cálculos d debe ser un múltiplo entero del paso de tiempo Δt de discretización del OD.
- Para cada evento, recorriendo el conjunto del histograma por pasos de tiempo Δt , se busca el periodo de duración d durante el cual la concentración C es la mínima de las concentraciones promedio.
- Se dispone de N valores de concentración mínima puesto que es el caso más crítico de OD sobre la duración d .
- Se ordenan N valores en forma decreciente.
- De ahí en adelante se realiza el mismo procedimiento para encontrar el periodo de retorno T y la frecuencia F de acuerdo con las duraciones deseadas.
- Luego se grafican las concentraciones de OD con los valores de duración y periodo simultáneamente obteniendo así las curvas OdF (Figura 4).

Figura 4. Curvas OdF



Fuente: los autores.

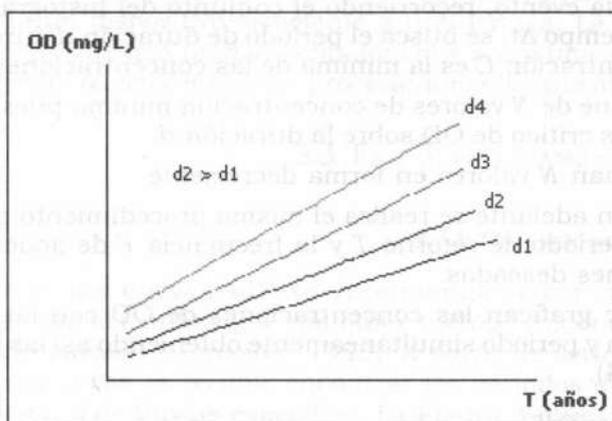
3.4. FASE 4: CALIBRACIÓN DE LAS CURVAS OdF

3.4.1. DEFINICIÓN DE CURVAS OdF A PARTIR DEL MÉTODO GUMBEL TIPO I (CURVAS OdF GUMBEL)

Para definir normas de calidad es necesario correlacionar los datos por algún método estadístico; en cuanto a la relación concentración-duración-frecuencia, los datos se pueden ajustar al método Gumbel

tipo I [Monsalve, 1995]. Al llevar los datos encontrados a una escala Gumbel se obtienen las curvas OdF Gumbel que se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Curvas OdF Gumbel

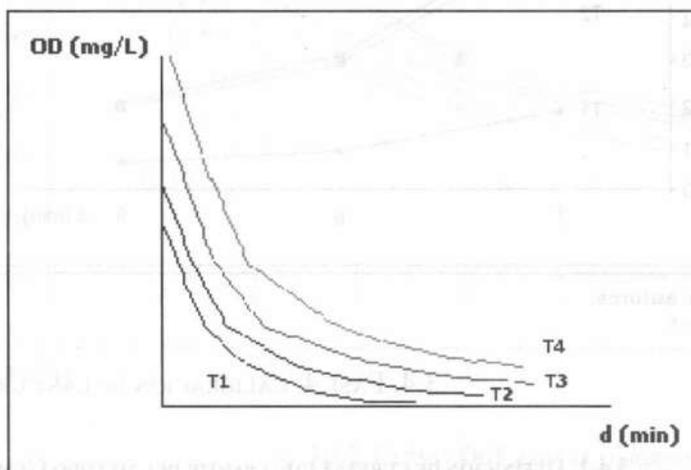


Fuente: los autores.

3.4.2. CAMBIO DE EJES DE LA GRÁFICA OdF GUMBEL

Al obtener los valores de OD en un periodo de retorno T determinado se puede construir una gráfica de la concentración OD en función de la duración d (Figura 6).

Figura 6. Curvas OdF Gumbel con cambio de ejes



Fuente: los autores.

Al graficar en escala logarítmica se puede derivar la relación entre C y d [Monsalve, 1995]:

$$\text{Log } C = \text{Log } K + p \text{ Log } (d) \quad (1)$$

donde:

d: duración (min)

C: concentración (mg/l)

p: pendiente de la curva logarítmica

K: valor de concentración para una duración de 1(mg/l)

Así mismo se puede establecer la relación

$$C = \frac{K}{(d+b)^p} \quad (2)$$

La magnitud del coeficiente *b* se encuentra por aproximaciones sucesivas, después de lo cual se determina el exponente *p* en forma gráfica. El coeficiente *K* es una función del periodo de retorno *T* y puede expresarse como $K=a \cdot T^c$, con *a* y *c* como parámetros regionales.

Al sustituir el valor de *K* de la primera ecuación, se obtiene la expresión general para el análisis del CdF

$$C = \frac{aT^c}{(d+b)^p} \quad (3)$$

3.5. FASE 5: DEFINICIÓN DE LA CALIDAD

3.5.1. CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DdF

Uno de los métodos más simples y prácticos de estimación de la población es la relación de Peterson utilizando el pez marcado [Beck, 1955]. El método se basa en la suposición general de la distribución aleatoria de los peces marcados. Por tanto, cuanto mayor es el número de peces marcados, más fiable es el cálculo. La estimación de la población se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$D = MC/R \quad (4)$$

donde:

D: estimación de la población

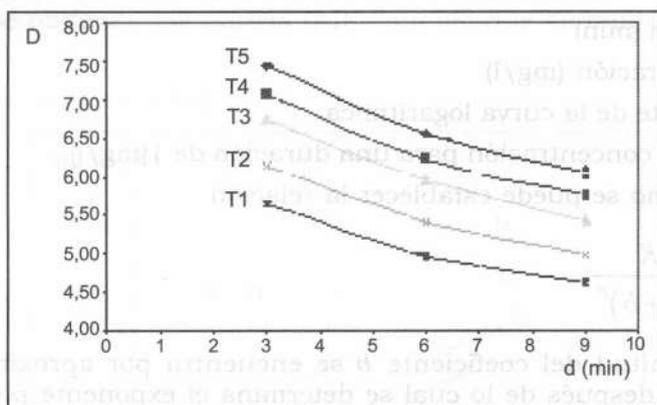
M: número de peces marcados y liberados

C: tamaño de la muestra de recaptura, los marcados y no marcados

R: número de peces marcados y recapturados

Así se construye la gráfica que permite estimar la población *D* en una duración *d* determinada así como en un periodo de retorno *T*, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Curvas DdF



Fuente: los autores.

3.6. FASE 6: CONSTRUCCIÓN DE CURVAS CdF

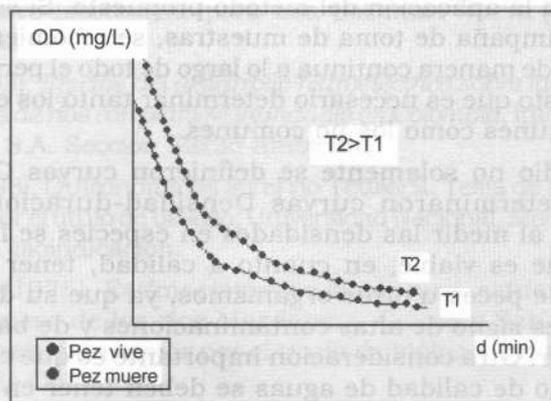
3.6.1. RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE OD Y EL PEZ EN UN MISMO PERÍODO DE RETORNO Y DURACIÓN

Con las curvas resultantes de muestras tomadas de oxígeno disuelto durante varios años se tiene una relación de las variables de periodo, duración y concentración, en este caso de OD; es decir, que si se tiene una duración y un periodo dados, se podrá leer una concentración determinada [Torres, 2002]. Lo anterior permite analizar un pez y notar su comportamiento ante dicha concentración. El organismo debe estar ubicado dentro de la cuenca y se tomarán en cuenta los efectos causados por la corriente, el clima, el espacio y el ecosistema. A la vez, se le imposibilitará su escapatoria, limitando un área donde justamente aguas arriba se inyectará la concentración de OD que se quiere observar.

Como el propósito de las curvas CdF es cuantificar el comportamiento de los peces a distintas concentraciones de OD, en una duración constante y unos periodos de retorno determinados, es posible realizar un análisis de supervivencia de los peces, tal como se muestra en la Figura 8.

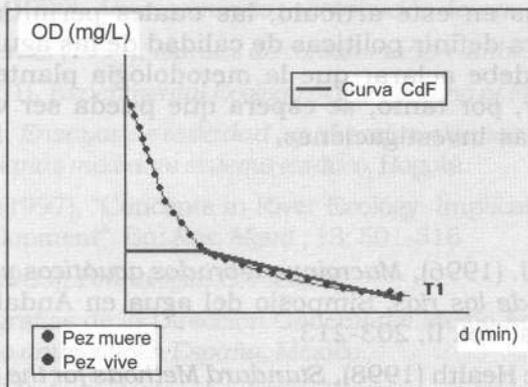
Al tener claro el comportamiento del organismo frente a las situaciones existentes en la zona, es posible definir una trayectoria que determinará las normas de calidad a desarrollar en el área de estudio. La Figura 9 muestra dicha trayectoria.

Figura 8. Curvas CdF preliminares



Fuente: los autores.

Figura 9. Curvas CdF



Fuente: los autores.

De esta forma se garantiza la supervivencia de la especie del pez cuando hay una concentración de OD más alta a una menor duración del evento. Cabe anotar que a una mayor duración del evento con una concentración de OD más pequeña y con un período de retorno que puede ser de una magnitud considerable, se está arriesgando la vida de la especie.

4. CONCLUSIONES

Es necesario enfatizar que la metodología presentada, tomada de la hidrología, no proviene de un enfoque físico riguroso, es más bien una propuesta para tratar de fijar políticas de vertimientos. Por tanto, con ella no se pretende ser precisos en los resultados puesto que se trata de seres vivos cuyo comportamiento es complejo y depende de la combinación de múltiples variables.

En nuestro medio no siempre se cuenta con toda la información necesaria para la aplicación del método propuesto. Si se decide llevar a cabo una campaña de toma de muestras, se recomienda que éstas sean tomadas de manera continua a lo largo de todo el periodo de tiempo escogido, puesto que es necesario determinar tanto los eventos contaminantes comunes como los no comunes.

En el estudio no solamente se definieron curvas CdF, sino que además se determinaron curvas Densidad-duración-Frecuencia (DdF), ya que al medir las densidades en especies se llegó a la conclusión de que es viable, en cuanto a calidad, tener en cuenta la numeración de peces u otros organismos, ya que su desaparición o disminución es signo de altas contaminaciones y de baja calidad del medio receptor. Otra consideración importante es que cuando se realiza un estudio de calidad de aguas se deben tener en cuenta todos los organismos, puesto que cada uno de ellos juega un papel importante en el equilibrio del ecosistema acuático; este efecto se despreció en este trabajo. En el marco del presente estudio se propusieron otras metodologías basadas en la densidad de los peces, que no fueron presentadas en este artículo, las cuales permitirían maneras alternativas para definir políticas de calidad de las aguas de los ríos. Por último, se debe aclarar que la metodología planteada es puramente teórica y, por tanto, se espera que pueda ser validada en el marco de futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- Alba-Tercedor, J. (1996), *Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos*, Simposio del agua en Andalucía (SIAGA), Almería, Vol. II, 203-213.
- American Public Health (1998), *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Scope and Application of Methods, Washington D.C., 1-1 - 1-8.
- American Public Health (1989), *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, Madrid.
- American Society for Testing and Materials N° 148-1. *Procedimientos de muestreo de oxígeno disuelto*.
- Beck W.M. (1955), Juggeted method for reporting biatic data. En: Sewage ind. Waste, 27, 1193-1197.
- Colombia, Invermar (2001), *Establecimiento de valores indicativos del grado de contaminación de tóxicos químicos y microorganismos de origen fecal, como base para la expedición de normativas de la calidad de las aguas marinas de Colombia*. Anexo 2.
- Colombia, Ministerio de Defensa Nacional (2000), *Anuario Científico*, Bogotá.
- Diputació de Barcelona (2001), *Estudis de la qualitat ecológica del rius*, 11-37.

- Ellis, M. M. (1946), *Determination of Water Quality*, Washington D.C.
- Fundación Nuevo Liberalismo para una Colombia Nueva (1985), *Ecología*, Bogotá.
- García, L. (1993), *Efectos del desarrollo hidroeléctrico sobre las poblaciones de peces de ríos con planicie inundable en Colombia*, Interconexión Eléctrica S.A. Sección Medio Ambiente.
- Gómez, J. (1998), Quironómidos en el río Teusacá. Tesis de grado para otorgar por el título de biólogo; Universidad Nacional, Macroinvertebrados en la bioindicación.
- Granados, J. (1975), Estimaciones de la captura, esfuerzo y población pesquera de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Trabajo de grado para optar por el título de biólogo. Universidad Nacional de Colombia.
- Gunnerson, C. G. (1964), "Diurnal and random variations of dissolved oxygen in surface water", Verh. Intern Verein. En: *Limnology*, 15: 307-321.
- Hernández, A. (1990), *Depuración de las aguas residuales*, Madrid.
- Hernández, A. (1990), *Abastecimiento y distribución del agua*, Madrid.
- Itsemap Ambiental (1994), *Manual de contaminación ambiental*, Madrid.
- Ivlev, V. S. (1961), *Experimental Ecology of the Feeding of Fishes*, New Haven.
- Lara, C. (1993), *Ensayos de toxicidad aguda sobre algunas especies icticas colombianas mediante sistema estático*, Bogotá.
- Lorenz, C. M. (1997), "Concepts in River Ecology: Implications for Indicator Development". En: *Res. Mgmt.*, 13: 501-516
- Margaleff, R. (1983), *Limnología*, Barcelona.
- México. Monografías de la Dirección General del Medio Ambiente (1987), *El medio ambiente en España*, México.
- Molano, J. (1954), *Limnología colombiana*, Bogotá.
- Monsalve, G. (1995), *Hidrología en la ingeniería*, Bogotá, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Montoya, D. F. (1992), *Pruebas de toxicidad aguda, LC50' en especies icticas continentales mojarra amarilla*, Bogotá.
- Munné, A., Solá, C. y Prat, N. (1998), "QBR: un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera". En: *Tecnología del agua*, 175: 20-37.
- Oliveras, J. (1998), *Els microorganismos filamentosos i els protozous en la depuració d'aigües del sector industrial*, Barcelona.
- Pérez, G. R. (1999), "Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua". En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23: 375-387.
- Prat, N., González, G. y Millet, X. (1986), "Comparación crítica de dos índices de calidad del agua ISQA y BILL". En: *Tecnología del agua*, 31: 33-49.

- Prat, N. y Ward, J. V. (1994), "The tamed river". En: Margalef, R., *Limnology now: A paradigm of Planetary Problems*, Elsevier Science B.V.
- Prat, N. (1998), Bioindicadores de calidad de aguas. Manuscritos curso bioindicadores de calidad de agua, Universidad de Antioquia, Medellín.
- Ramírez, A. (1998), *Limnología Colombiana: aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*, primera edición, Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Roldán, G. P. (1999), "Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua". En: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 23, 375-378.
- Sheldon, A. L. (1969), "Equitability Indices: Dependence on the species count". En: *Ecology*, 50: 466-467.
- Simpson, E. H. (1949), "Measurement of Diversity". En: *Nature*, 163, 688.
- Torres, A. (2002), "Contaminantes de los vertimientos urbanos en tiempos de lluvia". En: *Notas de clase de hidrología urbana*.
- U.S. Geological Survey Water Supply, N° 1454, *Procedimientos de muestreo de oxígeno disuelto*.
- US EPA (2002), AQUATOX for Windows: A modular Fate and Effects model for Aquatic Ecosystems release 1. 1. Volume 2. Technical Documentation EPA -823- R - 64-002.
- Vargas, I. (1989), *Inventario preliminar de la ictofauna de la hoya hidrográfica del Quindío*, Corporación Autónoma del Quindío.
- Washington, H. G. (1984), "Diversity, biotic and similarity indices". En: *Water res*, 18: 653-694.
- Wilhem, J. L. y Dorris, T. C. (1966), "Species Diversity of Benthic Macroinvertebrates in a Stream Receiving Domestic and Oil Refinery Effluents". En: *Am. Midl. Nat.*, 76: 427.
- Winberg, G. G. (1960), "Rate of Metabolism and Food Requirements of Fishes". En: *Fish*. Translation series, 194, 202.
- Zamora-Muñoz, C. y Alba-Tercedor, J. (1996), "Bioassessment of organically polluted Spanish rivers, using a biotic index and multivariate methods". En: *J.N.Am Benthol. Soc.*, 15:332-352.
- Zúñiga de Cardoso, M. C. (1997), "Indicadores ambientales de calidad de agua en la cuenca del río Cauca". Universidad del Valle, En: *Bioindicadores ambientales de la calidad del agua*, Cali.