

# INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>MODELO MATEMATICO DE CALIDAD DEL AGUA EN UN RÍO</b>	<b>2</b>
2.1	Introducción	2
2.2	Aspectos Generales	2
2.3	Balance de Masas	5
2.4	Régimen Permanente, Compuesto Conservativo	6
2.5	Régimen Permanente, Compuesto No Conservativo	7
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA</b>	<b>9</b>
3.1	Aspectos generales	9
3.2	Consideraciones previas a la modelación de la calidad del agua	9
<b>4.</b>	<b>DESARROLLO DE LOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA</b>	<b>11</b>
<b>5.</b>	<b>EJEMPLOS DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA</b>	<b>12</b>
<b>6.</b>	<b>TRABAJO EN TERRENO</b>	<b>13</b>
<b>7.</b>	<b>APLICACIONES POTENCIALES DE MODELOS DE CALIDAD PARA GESTION DE RECURSOS HIDRICOS</b>	<b>14</b>
7.1	Caso Hipotético N°1	14
7.2	Caso Hipotético N°2	14
7.3	Caso Hipotético N°3	15
7.4	Caso Hipotético N°4	15
7.5	Caso Hipotético N°5	15
7.6	Caso Hipotético N°6	16

## 1. INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento de las ciudades y la producción industrial implica un incremento en la presión sobre los cuerpos de agua superficiales, que son usados como fuente de agua o como receptores de las descargas de aguas residuales. En la mayoría de los casos, estos cuerpos de agua tienen otros usos que imponen restricciones adicionales y pueden generar conflictos ante proyectos productivos. Además, en los últimos cinco años la Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA, ha ido definiendo el marco normativo de la gestión de la calidad de las aguas superficiales. Este marco normativo impone e impondrá restricciones a las emisiones y a los usos, manteniendo un control y monitoreo de los cuerpos receptores, que debieran estar basados en modelos de calidad del agua.

Con el fin de evaluar los planes alternativos de ingeniería para el control y manejo de la calidad del agua suelen emplearse modelos matemáticos que relacionan las entradas de aguas residuales con la calidad del agua del cuerpo receptor. Los diversos grados de tratamiento, la reubicación de los puntos de descarga de aguas residuales, el aumento de los flujos mínimos, los sistemas de tratamiento regional versus plantas múltiples, constituyen algunas de las alternativas específicas cuya influencia sobre la calidad del agua receptora pueden evaluarse mediante la aplicación de los modelos de calidad del agua. Los modelos pueden ayudar también a evaluar el beneficio relativo que se obtiene para la calidad del agua mediante la eliminación de diferentes componentes de los contaminantes.

Los factores que influyen sobre el grado de complejidad del modelo incluyen el tipo de problema de calidad del agua que se desea resolver, las características del cuerpo del agua, la disponibilidad de datos observados, históricos, y actuales sobre la calidad del agua y sobre las descargas de aguas residuales, los riesgos para la salud pública y el ambiente relacionados con el área, la gama disponible de opciones y de estrategias, y el tiempo y los recursos financieros disponibles.

## 2. MODELO MATEMATICO DE CALIDAD DEL AGUA EN UN RÍO

### 2.1 Introducción

Un modelo es una representación el medio ambiente utilizada para simular las condiciones ambientales y su respuesta ante estímulos o impactos determinados. Una vez que el modelo ha sido seleccionado o construido pueden ser evaluados los efectos de la acción propuesta y sus alternativas.

Los modelos más comúnmente utilizados son los modelos matemáticos de diferentes grados de complejidad. También se utilizan modelos físicos cuando las situaciones son demasiado complejas para ser analizadas matemáticamente.

Los modelos matemáticos pueden ser uni, bi o tridimensionales dependiendo de las características físicas del medio a simular, tal como se describe a continuación:

**Modelos unidimensionales:** se utilizan generalmente para representar flujos de aguas en ríos, siendo la dirección considerada el sentido del escurrimiento.

**Modelos bidimensionales:** se utilizan para ríos de gran ancho, en los cuales las concentraciones de contaminantes varían de un lado de la ribera al otro. En estos casos se usa un sistema cartesiano de coordenadas, en el cual una de ellas corresponde al sentido del flujo y la otra a la dimensión lateral.

**Modelos tridimensionales:** encuentran aplicación en estudios de agua subterráneas y en sistemas más complejos de aguas superficiales. Requieren de mayor información que los modelos uni y bidimensionales y también mayor tiempo computacional, por lo que su uso se restringe a problemas de gran magnitud cuando se dispone de recursos suficientes para su aplicación.

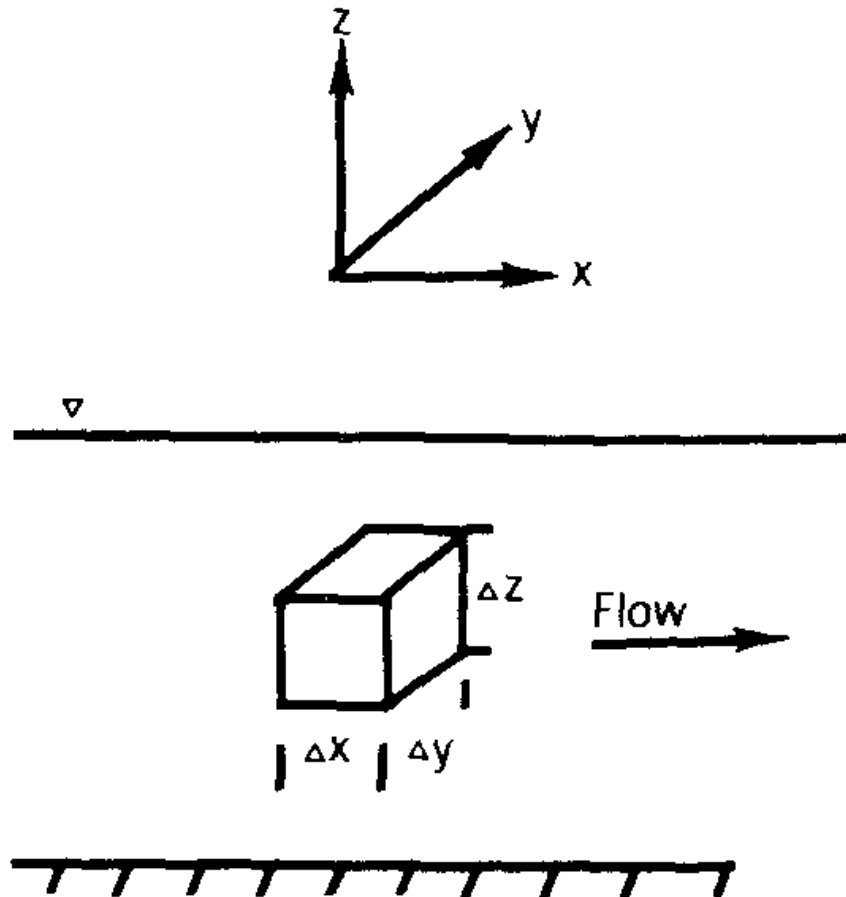
Los modelos pueden ser **dinámicos** o de **estado estacionario**. Los dinámicos proveen información acerca de la calidad del agua tanto en la dirección (o distancia aguas abajo de una descarga) como en el tiempo y los estacionarios suponen que existe variación sólo en el espacio (no existe cambios de los indicadores en el tiempo), como por ejemplo una descarga continua y constante. Estos son de menor grado de dificultad y de menor costo de aplicación que los modelos dinámicos.

Los parámetros a modelar, al igual que el tipo de modelo a emplear, deben ser identificados antes de iniciar aplicación del mismo. Debe tenerse presente que modelar un gran número de parámetros puede resultar no sólo muy oneroso sino también en muchos casos redundante e innecesario.

### 2.2 Aspectos Generales

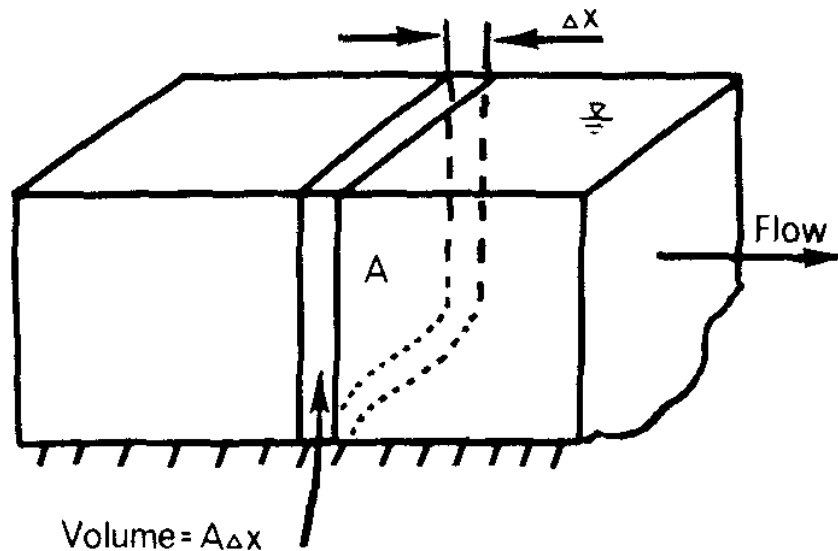
Para formular una relación determinística entre los residuos descargados al ambiente y la calidad del agua resultante, ambas en términos de un mismo compuesto, podemos considerar un pequeño volumen de río donde la coordenada  $x$  se alinea con la longitud del río, la coordenada  $y$  con su ancho, y la coordenada  $z$  con la profundidad del río, tal como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1**  
**Volumen Infinitesimal en un Río**



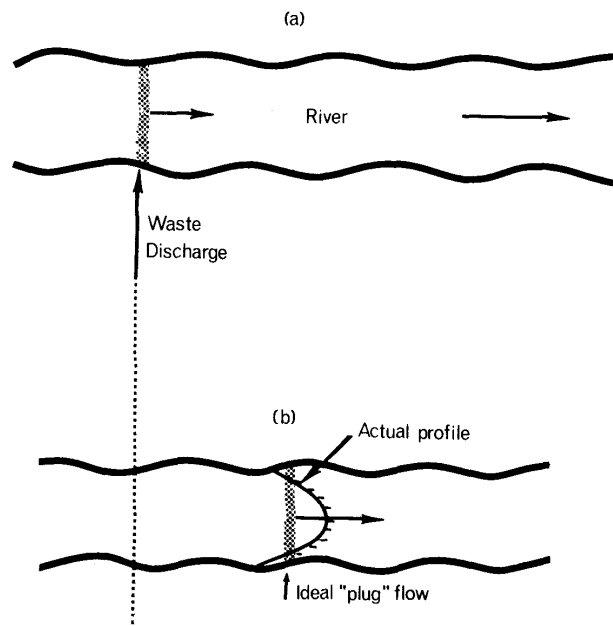
En muchos ríos y esteros, es posible considerar al cuerpo de agua como homogéneo con respecto a las variables de calidad del agua en las direcciones transversal y vertical. El compuesto contaminante varía o "tiene un gradiente" sólo en la dirección del río. Este tipo de sistema se conoce como unidimensional, en contraste con cuerpos de agua con variaciones importantes en las tres direcciones o sistemas tridimensionales. La Figura 2 muestra un sistema unidimensional en el cual el área de escurrimiento es  $A$  y el espesor del elemento de control es  $\Delta x$ .

**Figura 2**  
**Elemento Infinitesimal en un Sistema Unidimensional**



Para muchas situaciones relacionadas con la calidad del agua en ríos y esteros es posible asumir que el medio es no dispersivo, es decir, cada elemento del material contaminante fluye en la dirección de la corriente (agua abajo). No existe mezcla debido a difusión o dispersión. Esto se conoce como *flujo pistón* y se ilustra en la Figura 3.

**Figura 3**  
**Ilustración de Flujo Pistón en un Río**



## 2.3 Balance de Masas

La masa total del compuesto  $C$  [ $M/L^3$ ] que entra a través de la sección de control en la Figura 2, en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es:

$$Q \cdot C \cdot \Delta t \quad (1)$$

donde  $Q$  es el caudal en el río. De manera similar, la masa de contaminante que sale del volumen de control a través de una cara situada a una distancia  $\Delta x$  de la zona de entrada está dada por:

$$(Q + \Delta Q) \cdot \left( C + \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \Delta t \quad (2)$$

A partir de las definiciones anteriores, la variación de la masa del compuesto  $C$  dentro del volumen de control debido a la entrada y salida de contaminante, así como también debido a reacciones simples, sobre el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es:

$$V \cdot \Delta C = Q \cdot C \cdot \Delta t - (Q + \Delta Q) \cdot \left( C + \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x \right) \cdot \Delta t \pm K \cdot V \cdot C \cdot \Delta t \quad (3)$$

donde  $K$  [ $1/T$ ] representa el coeficiente de una reacción de primer orden que describe la pérdida o ganancia del compuesto  $C$ .

Al expandir la ecuación (3) y dividir por el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , y el volumen  $V (= A \cdot \Delta x)$ , se tiene:

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta x} - \frac{\Delta Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \pm K \cdot C \quad (4)$$

Si ahora tomamos el límite cuando el tamaño de la separación,  $\Delta x$ , y el intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , se aproximan a cero podemos escribir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{C}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \pm K \cdot C \quad (5a)$$

o escrito en forma más reducida:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial (Q \cdot C)}{\partial x} \pm K \cdot C \quad (5b)$$

Las ecuaciones (5a) y (5b) representan la ecuación diferencial básica para el estudio de un sistema simple y no dispersivo. Como se indicó anteriormente, este modelo asume que no existe mezcla (o dispersión) y se conoce comúnmente como *modelo advectivo* o *modelo de máximo gradiente*.

Si la variable  $C$  representa un compuesto conservativo,  $K=0$ . El flujo, el área perpendicular, así como el coeficiente de decaimiento pueden ser funciones de la distancia y tiempo.

Comúnmente se considera el origen del eje  $x$  en la ubicación de una descarga. De esta manera, una condición de borde característica es:

$$C = C_0(t) \quad \text{en} \quad x = 0 \quad (6)$$

donde  $C_0(t)$  es la concentración del compuesto  $C$  en la localización de la descarga.

## 2.4 Régimen Permanente, Compuesto Conservativo

En esta situación,  $K$  es igual a cero, y los otros dos parámetros de la ecuación (5), así como la concentración de la descarga se suponen constantes. Para efectos de simplificar aún más el análisis supongamos que el resto de los parámetros no varían con el espacio.

De esta manera, el supuesto de régimen permanente permite escribir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad \text{y} \quad C = C_0 \quad \text{en} \quad x = 0$$

El supuesto de coeficientes constantes en el espacio permite escribir:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{y} \quad A = A_0$$

De esta manera, la ecuación (5) se puede escribir como:

$$0 = -\frac{Q}{A_0} \cdot \frac{dC}{dx} = -u \cdot \frac{dC}{dx} \quad (7)$$

donde  $u$  es la velocidad de la corriente.

La solución de la ecuación (7) es obviamente una constante, el valor de la cual se puede determinar a partir de la condición de borde en la descarga. La concentración  $C_0$  se puede calcular con un balance de masas en la descarga tal que:

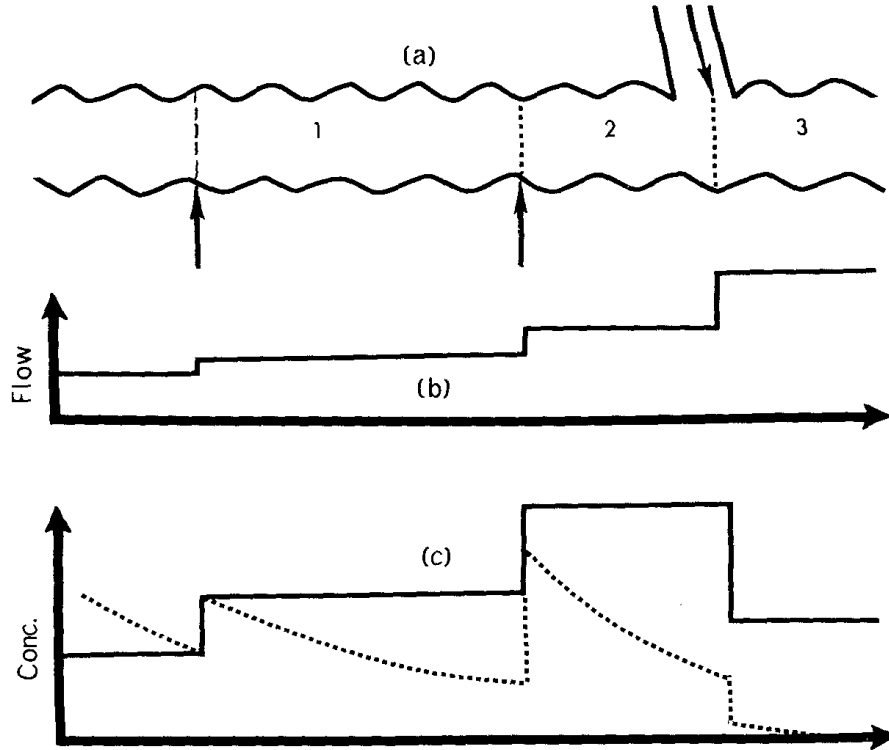
$$C_0 = \frac{Q_R \cdot C_R + Q_D \cdot C_D}{Q_R + Q_D} \quad (8)$$

donde  $Q_R$  y  $C_R$  son el caudal y la concentración en el río antes de la descarga, mientras que  $Q_D$  y  $C_D$  representan el caudal y la concentración de la descarga misma.

La Figura 4 ilustra en forma gráfica la solución anterior. De esta manera, en la Figura 4a se tiene un río en el cual existen dos descargas y un tributario que se ubica aguas abajo de las

descargas. La Figura 4b muestra el aumento de flujo debido a las descargas y el tributario, mientras que la Figura 4c muestra la disminución de la concentración en el río, en línea sólida, por efecto de dilución debido a las descargas y el tributario.

**Figura 4**  
**Distribución Espacial de Contaminante Conservativo**



## 2.5 Régimen Permanente, Compuesto No Conservativo

En este caso la ecuación (5) se puede escribir como:

$$0 = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{dC}{dx} - \frac{C}{A} \cdot \frac{dQ}{dx} - K \cdot C \quad (9)$$

Si nuevamente se supone que el caudal y el área transversal son constantes, y sólo se considera descargas puntuales, la ecuación (9) se puede escribir como:

$$0 = -\frac{Q}{A_0} \cdot \frac{dC}{dx} - K \cdot C = -u \cdot \frac{dC}{dx} - K \cdot C \quad (10)$$

con la condición de borde:

$$C = C_0 \quad \text{en} \quad x = 0$$



La integración de la ecuación (10) permite escribir:

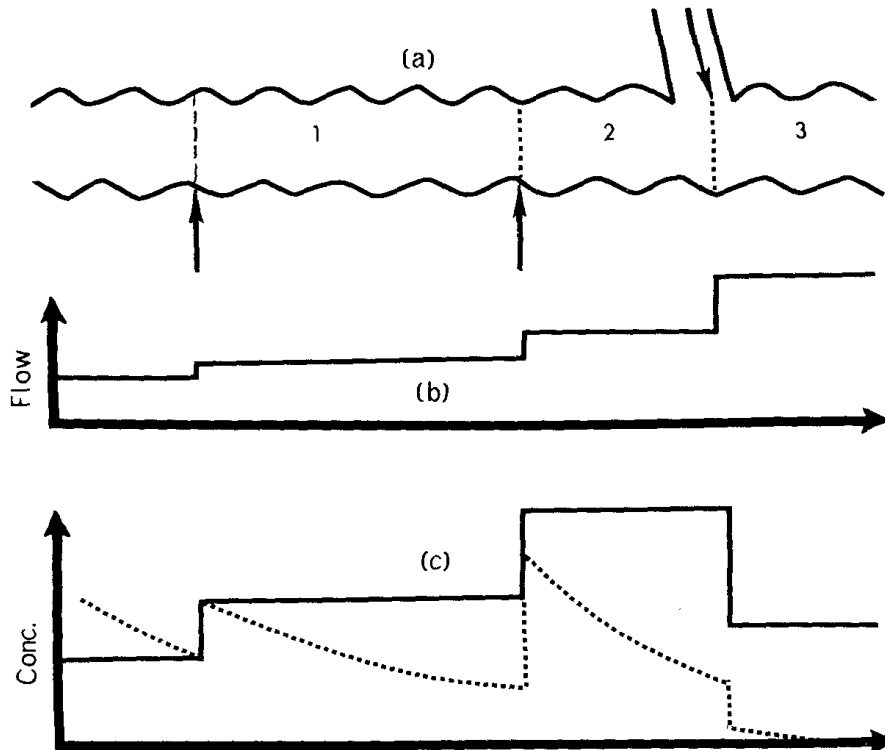
$$C(x) = C_0 \cdot \exp\left[-\frac{K}{u} \cdot x\right] \quad (11)$$

Al sustituir la expresión para la concentración  $C_0$  que se presenta en la ecuación (8) se puede obtener:

$$C(x) = \left( \frac{Q_R \cdot C_R + Q_D \cdot C_D}{Q_R + Q_D} \right) \cdot \exp\left[-\frac{K}{u} \cdot x\right] \quad (12)$$

En contraste con la ecuación (8) se observa que para el caso de un compuesto no conservativo, su concentración decae en forma exponencial con la distancia en el río. La ecuación (12) es válida en todo un tramo de río hasta que una nueva descarga cambia las condiciones de borde. Los esquemas de la Figura 5 muestran, con línea punteada, la variación de la concentración de un compuesto no conservativo.

**Figura 5**  
**Distribución Espacial de Contaminante No Conservativo**



### **3. ANÁLISIS DEL IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA**

#### **3.1 Aspectos generales**

Los impactos en la calidad del agua significan cambios en los indicadores ambientales debidos a acciones de una actividad o proyecto determinado. A modo de ejemplo, las descargas de aguas residuales de un proyecto industrial pueden disminuir la concentración de oxígeno disuelto en un curso receptor, representando un impacto negativo en la calidad de sus aguas. En este sentido, también se debe considerar la magnitud del impacto, ya que resulta bastante diferente disminuir el oxígeno disuelto en un mg/L, que en 3 ó 4.

Previo a la elección de una o varias técnicas o formulación de modelos para el análisis de la calidad del agua, resulta necesario conocer los criterios y los estándares de calidad del agua establecidos comúnmente en la normativa nacional específica. Los criterios de calidad del agua se definen como los niveles esperados de concentraciones de constituyentes que aseguran su calidad para usos específicos. Por otra parte, los estándares de calidad corresponden a normativas legales que limitan la concentración de diversos constituyentes en el agua. En general se tienen estándares de calidad para cursos de agua y estándares para descargas de efluentes en dichos cursos. De lo anterior se concluye que un criterio de calidad está asociado al logro de un objetivo mientras que un estándar corresponde a un valor límite que permite cumplirlo.

En el país se han establecidos estándares para consumo humano, bebida de animales, vida acuática, uso recreativo y riego, además de aquellos establecidos para situaciones específicas como por ejemplo para descargas a sistemas de alcantarillado y residuos industriales líquidos específicos según tipo de industria.

#### **3.2 Consideraciones previas a la modelación de la calidad del agua**

Al inicio del proceso de análisis de calidad del agua se deben identificar aquellos aspectos del proyecto que podrían afectar el medio ambiente hídrico. Considerando recursos superficiales y subterráneos, tanto en cantidad como en calidad. Se deben asimismo definir los requerimientos de agua así como las descargas residuales conjuntamente con sus obras asociadas. Estas descripciones se realizan generalmente en forma relativamente cualitativa.

Luego, la tarea siguiente consiste en seleccionar variables específicas que sean indicadores ambientales representativos factibles de cuantificar, de modo que cuando se realice el análisis de esta variable ambiental se pueda superponer sobre los valores de la variable en la Línea de Base a aquellos estimados considerando el proyecto y así predecir los posibles impactos en la calidad del agua.

La selección adecuada tanto del tipo como del número de los indicadores ambientales es una actividad de gran importancia. Cuantificar una multitud de parámetros por una parte puede significar un esfuerzo demasiado grande y en cierto modo puede impedir concentrarse en los de mayor transcendencia. Por otra parte, un número limitado de indicadores puede no ser adecuado para un análisis completo del proyecto en términos de sus desechos y, por lo tanto, no lograr una interpretación cabal de los impactos reales en el medio.

La Tabla 3.1 contiene una lista de posibles indicadores. Esta tabla no pretende ser exhaustiva, ya que corresponde al evaluador seleccionar aquellos de mayor significado para el proyecto en consideración. En todo caso en la lista adjunta se incluyen los parámetros que más frecuentemente son considerados en el análisis de la calidad del agua. La selección final debe basarse en la naturaleza del proyecto, así como también en las características locales y regionales del medio donde se insertará entre otros aspectos.

**Tabla 3.1**  
**Ejemplo de Indicadores de Calidad del Agua**

	<b>Indicador</b>
Aguas superficiales y aguas subterráneas	Normas de calidad del agua, Temperatura, pH, Conductividad, Turbiedad, Sólidos Disueltos Totales, Sólidos Suspendidos Totales, DBO <sub>5</sub> , DQO, Oxígeno Disuelto, Alcalinidad, Nitratos, Nitritos, Amonio, Nitrógeno Kjeldahl, Fosfato, Sulfatos, Cloruros, Hierro, Manganeso, Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio, Silice, Mercurio, Cadmio, Arsénico, Plomo, Cobre, Coliformes Totales y Fecales, Pesticidas.

Independiente del número de indicadores ambientales seleccionados, ellos deben permitir un adecuado análisis, tanto del medio ambiente afectado como de los impactos derivados del proyecto en estudio. Ambientes únicos y muy sensibles deben ser descritos con mayor grado de detalle a través de indicadores que permitan conocer en profundidad el área en cuestión y los posibles efectos del proyecto.

#### 4. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

En la aplicación de los modelos se identifican cinco fases: desarrollo del modelo, calibración, validación, aplicación del modelo y análisis de sensibilidad.

**Desarrollo del modelo:** en la actualidad existen múltiples modelos del tipo “envasados” para las más diversas aplicaciones. Muchos de ellos son extremadamente simples, mientras que otros son de una gran complejidad. La selección de un modelo “envasado” para una aplicación específica depende fundamentalmente del alcance del análisis a realizar y del tipo y calidad de la información disponible o a obtener. Cabe resaltar nuevamente que a mayor complejidad del modelo, más es la cantidad y la calidad de la información requerida para su aplicación. No debe desecharse la alternativa de desarrollar un modelo específico para una situación en particular. La tarea no es difícil y permite en muchas ocasiones representar más adecuadamente el problema de interés.

**Calibración:** la calibración consiste en aplicar el modelo a un conjunto conocido de datos y analizar los resultados simulados. Luego se deben conciliar los valores observados con los estimados por el modelo. Esto se realiza ajustando los parámetros del modelo, de modo tal que los valores simulados coincidan con los observados dentro de un margen de error aceptable. Para calibrar un modelo existen diferentes técnicas, tales como ajuste de curvas y métodos numéricos de identificación de parámetros. La calibración debe realizarse hasta que haya una coincidencia de, a lo menos, un 80% entre los valores observados y los simulados; de otra manera el modelo no va a ser confiable al ser utilizado en la etapa de predicción.

**Validación:** una vez calibrado el modelo, éste debe ser aplicado a un segundo conjunto de datos conocidos. El modelo debería ser capaz de reproducir estos valores, de otro modo su validez será dudosa.

**Aplicación del modelo:** consiste básicamente en la utilización del modelo calibrado y validado en el análisis de los impactos en la calidad del agua de la acción en estudio. Primeramente se aplica el modelo a la situación sin acción y luego a la situación con acción. La diferencia entre ambos resultados representa el impacto de la acción. El modelo también puede utilizarse para analizar el impacto de las medidas mitigantes, o aún para proponerlas en caso que la situación con acción represente una condición ambiental poco satisfactoria.

**Análisis de sensibilidad:** comúnmente se hace necesario evaluar las variaciones que presentan los resultados al alterar algunos parámetros del modelo. El análisis de sensibilidad indica los márgenes dentro de los cuales el modelo es confiable; es decir, establece los valores críticos de los parámetros en donde los valores simulados dejan de corresponder con los reales. Estos valores deben ser informados conjuntamente con los resultados del estudio.

## 5. EJEMPLOS DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

A continuación y en forma resumida, se entregan en la Tabla 5.1 algunas características y aplicaciones típicas de los modelos más comúnmente usados en estudios de calidad del agua.

**Tabla 5.1**  
**Ejemplos de Modelos de Calidad del Agua**

<b>MODELO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS Y OBSERVACIONES</b>
Modelo de la Zona de Mezcla	Modelo muy simple de balance de masa. Estimación rápida de los impactos en la calidad del agua.
Modelos de Oxígeno Disuelto	Basados en la ecuación de Streeter-Phelps, incorporan múltiples términos que incluyen entre otros efectos del bentos y respiración algas. Gran aplicabilidad a descargas de residuos que demandan oxígeno. Generalmente unidimensionales, aunque también pueden ser bi y tridimensionales.
Modelos para Descargas Térmicas	Considera adiciones algebraicas de temperatura en forma de calor (energía). Permiten establecer zonas de impacto (bidimensional o tridimensional) producto de descarga de aguas de enfriamiento.
Modelos de Escorrentía	Establecen efectos de un proyecto en términos de la cantidad y distribución temporal de la escorrentía.
Modelos de Aguas Subterráneas	Gran variedad de modelos uni, bi y tridimensionales disponibles. Consideran tanto transporte de agua como de contaminantes. También pueden incluirse efectos térmicos. Aplicables a medios saturados y no saturados. Generalmente de mayor complejidad matemática que los modelos de aguas superficiales, requiriendo técnicas numéricas para la resolución de las ecuaciones sustentables.
Modelos de Calidad del Agua	Incluyen modelos hidrológicos y existen en gran número. Ejemplos de estos modelos son:  Qual II. Estado estacionario y dinámico. Aplicable a ríos. Simula Clorofila a, Amonia, Nitratos, Nitritos, Fosfatos, DBO, Oxígeno Disuelto, Coliformes, Sustancias Conservativas y Temperatura.  Similares al anterior son el WASP y varios otros desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y el United States Geological Survey (USGS). De los modelos hidrológicos de gran uso se pueden mencionar el Stanford Watershed Model, y los modelos SWMM y HEC-1 y HEC-2.

La modelación constituye una herramienta poderosa en el análisis de calidad del agua. Sin embargo, la validez de los resultados de un modelo dependen grandemente de la calidad de información disponible. No se puede pretender utilizar un modelo sin realizar primeramente un análisis crítico de los datos y también de los resultados del mismo.

## 6. TRABAJO EN TERRENO

La recopilación de antecedentes existentes tales como información bibliográfica, datos estadísticos históricos (escorrentía, pluviosidad, etc.), entrevistas a lugareños y autoridades regionales y gubernamentales, puede proveer datos valiosos para una adecuada descripción del medio a considerar. Sin embargo, en muchas ocasiones resulta necesario complementar la información histórica con programas de muestreo de calidad del agua, especialmente si ella es escasa o muy antigua o presenta deficiencias en cuanto a metodología de muestreo o de análisis.

Un plan de monitoreo orientado a la caracterización de calidad del agua a través de un modelo debe incluir los siguientes elementos: programa detallado de recolección de muestras que de cuenta de las variaciones estacionales relevantes; descripción de métodos de análisis a emplear, y metodología de presentación y manipulación de la información, incluyendo análisis estadístico de la misma. Se deben también especificar, en un plan de monitoreo, los siguientes aspectos: ubicación de los puntos de muestreo, parámetros a analizar, frecuencia de muestreo y metodología de recolección y conservación de las muestras. En la Tabla 6.1 se resumen algunas consideraciones con respecto a los puntos antes mencionados.

**Tabla 6.1**  
**Consideraciones para la Elaboración de un Plan de Muestreo**

ACTIVIDAD	CONSIDERACIONES
Ubicación de los puntos de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proveer adecuada descripción de la calidad del agua.</li> <li>• Tener en cuenta si los parámetros son conservativos o no conservativos.</li> <li>• Características físicas del curso de agua.</li> <li>• Acceso a los lugares de muestreo y distancia a laboratorios (conservación de las muestras).</li> </ul>
Frecuencia de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tres elementos básicos:</li> <li>• Hora del día</li> <li>• Estación del año</li> <li>• Cuan seguido muestrear</li> </ul>
Metodología de recolección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestras puntuales o muestras compuestas.</li> <li>• Empleo de equipos automáticos de muestreo.</li> <li>• Mediciones de velocidad y caudales.</li> </ul>
Técnicas analíticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preservación de las muestras.</li> <li>• Uso de técnicas estandarizadas de análisis.</li> <li>• Control de calidad de los laboratorios.</li> </ul>

## **7. APLICACIONES POTENCIALES DE MODELOS DE CALIDAD PARA GESTION DE RECURSOS HIDRICOS**

### **7.1 Caso Hipotético N°1**

La Superintendencia de Servicios Sanitarios, en conjunto con el Ministerio de Salud, desean establecer objetivos de calidad para las aguas superficiales chilenas, en cada una de las cuencas que conforman el territorio nacional. Dichos objetivos de calidad deben maximizar el beneficio neto social y, por lo tanto, deben considerar por una parte los beneficios de tener un ambiente más limpio y, por otra, los costos de manejo y control de las descargas contaminantes.

Existen antecedentes que permiten evaluar el costo del tratamiento o manejo de las descargas contaminantes a diferentes niveles, pero no se sabe a ciencia cuál será el resultado en los cuerpos de agua naturales de dichas medidas.

Se pide establecer un procedimiento que permita aproximarse al establecimiento de un objetivo de calidad ambiental óptimo, en un sentido social.

### **7.2 Caso Hipotético N°2**

La Corporación de Administración de la cuenca de los ríos Maipo-Mapocho ha establecido los usos prioritarios de las aguas de la cuenca y la calidad que se requiere mantener para hacer posibles estos usos, como una función del espacio y del tiempo.

Entre estos usos están, para el río Maipo, fuente de abastecimiento de agua potable en la parte superior, riego en la parte media y media inferior y abastecimiento de agua potable en la parte inferior.

Para el río Mapocho los usos establecidos son abastecimiento de agua potable y riego en la parte superior, riego y uso estético en la parte media, riego y recreación en la parte inferior.

Para mantener la calidad deseada en el agua de los ríos es preciso que las descargas contaminantes no sobrepasen determinados límites, dependientes entre otras cosas, del caudal natural de dilución, de la época del año, etc.

Diseñar un procedimiento que permita a las autoridades de la Corporación establecer los límites de calidad de las descargas contaminantes. Indicar las hipótesis adoptadas para establecer dicho procedimiento.

### **7.3 Caso Hipotético N°3**

La Empresa AGUAS ANDINAS, consciente de que a través de sus sistemas de alcantarillado llega la mayor parte de las aguas servidas y los residuos industriales de Santiago a los ríos de la cuenca, ha decidido elaborar un plan de tratamiento de estos efluentes de aquí al año 2020.

Existiendo numerosas descargas distribuidas en toda la extensión de la cuenca y estando los efectos de éstas relacionados entre sí, desea saber cual sería el efecto en la calidad de las aguas bajo diferentes alternativas de eficiencia de remoción y programas progresivos de implantación. Establecer una metodología para abordar el problema de AGUAS ANDINAS.

### **7.4 Caso Hipotético N°4**

Se ha determinado que los principales problemas de contaminación de un río del sur de Chile se originan por la eutroficación producida en un embalse en la parte superior, por la descarga de dos grandes centros industriales en la parte media y la descarga de aguas servidas de una ciudad en la parte media inferior. A pesar de la capacidad de autopurificación y dilución del río, su contaminación afecta principalmente a una importante ciudad ubicada en la parte inferior, la cual debe incurrir en altos costos de tratamiento para abastecer de agua potable a la población.

En la desembocadura del río se ha debido discontinuar la explotación de un centro de cultivo de mariscos debido a los graves problemas de calidad originados por las razones mencionadas. La ciudad y el centro de cultivos afectados han recurrido a la justicia y han obtenido el derecho a una indemnización de parte de los contaminadores. El juez que instruye la causa ha solicitado a una empresa consultora que distribuya el valor de la indemnización entre los causantes de la contaminación, en forma proporcional al efecto causado por sus descargas.

Diseñar un método para distribuir el valor de la indemnización en forma justa y equitativa.

### **7.5 Caso Hipotético N°5**

Una explotación minera ubicada en la cabecera de un río que abastece de agua potable a una importante ciudad chilena ubicada en le valle central cuenta con tranques de relaves los cuales, a pesar de todas las medidas de seguridad que ha implantado la superintendencia de la mina, ocasionalmente ha tenido algunas fugas.

Estas fugas son controladas rápidamente, pero aún así, el material descargado viaja río abajo y eventualmente afecta las bocatomas de la planta de agua potable, incrementando especialmente el contenido metálico de las aguas. Resulta relativamente fácil estimar el tiempo que tarda la mancha contaminante en llegar a las bocatomas, pero no así la duración, y distribución de las concentraciones a lo largo del tiempo.

Debido a que existen excelentes relaciones entre la planta de agua potable y el establecimiento minero, éste último avisa a la planta cada vez que ocurre un accidente, de manera que ésta pueda suspender las captaciones y tomar las providencias correspondientes. Sin embargo, debido al temor y la tensión que producen estos eventos en el personal de la planta de agua potable, ésta ha pedido al establecimiento minero que diseñe un sistema que permita saber no sólo el tiempo aproximado de llegada de la mancha, sino también la magnitud y evolución de las



concentraciones. Diseñar un sistema que satisfaga las aspiraciones de la planta de agua potable.

## **7.6 Caso Hipotético N°6**

La Dirección de Riego del MOP desea incorporar el riego una gran superficie agrícola, actualmente mal explotada, mediante la construcción de un canal que captaría una importante fracción del caudal en la parte alta de un río de la zona centro-sur de Chile. Aunque bajo las actuales condiciones el río tiene capacidad de dilución suficiente como para mantener condiciones de calidad relativamente buenas durante gran parte del año, a pesar de las descargas de aguas servidas, se teme que luego de la construcción del canal la dilución no será suficiente y que en las épocas críticas del año se podrían producir algunos problemas de calidad, dependiendo de los caudales naturales que ocurran en el río.

La Comisión Regional del Medio Ambiente, COREMA, ha indicado que es estrictamente necesario que se haga una evaluación del impacto ambiental de la operación del canal de riego, en que se evalúe con la mayor precisión posible el efecto que tendría ésta en la calidad de las aguas superficiales a lo largo del río.

## REFERENCIAS

CHAPRA, SC. Surface Water Quality Modelling. McGraw Hill. 1997.

CHAPRA, S.C. & TORAPCHAK S.D. A chlorophyll model and its relationship to phosphorus loading plots for lakes, Water Resources Research, 12(6): 1260 – 1264, diciembre 1976.

HYDROSCIENCE, INC. Simplified mathematical modeling of water quality. Environmental Protection Agency, marzo 1971.

LEE, G.F; RAST, W.E.; JONES, R.A. Eutrophication of Water bodies: insights for an age – old problem. Environmental Science & Technology, 12(8): 900 – 908,, 1978.

O'Connor, P.J. & Mueller, J.A. A water quality model of chlorides in the Great Lakes. Jour. Of San. Eng. Div., ASCE, Proc. Paper 7470, 96 (SA4): 955 – 975, 1970.

SALAS, H. Resumen del segundo encuentro del proyecto regional. Desarrollo de metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos, CEPIS/OPS, 1983.

STREETER, H.W. & PHELPS, E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. Public Health Bulletin 146. U.S. Public Health Service, Washington, D.C., 1925

THOMANN, R.V. Systems analysis and water quality management. McGraw Hill Book Co., New York City, 1972.

THOMANN RV and JA MUELLER. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. 1987.

VOLLENWEIDER, R.A. The scientific basis for lake and stream eutrofication with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication functions. OECD, Tech. Report No. DAS/CSI/68.37, París, 1968.