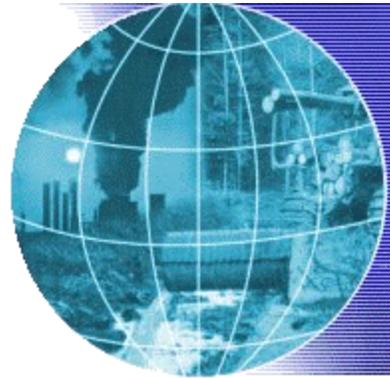


**DIPLOMADOS EN
MEDIO AMBIENTE**

2007



DIPLOMADO EN CONTAMINACION DE AGUAS

**MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL
RIO MAPOCHO**

Relator:

Carlos Espinoza C.

Ingeniero Civil, Ph.D.

Académico Universidad de Chile



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA DE POSTGRADO



INDICE

1. INTRODUCCION	1
1.1 Objetivo General.....	1
1.2 Objetivos Especificos	1
1.3 Caracterización del Sistema	1
1.4 Topología del Sistema.....	2
2. ASPECTOS TEORICOS	5
2.1 Ecuaciones que rigen el sistema a modelar.....	5
2.1.1 Demanda Bioquímica del Oxígeno.....	5
2.1.2 Oxígeno Disuelto	5
2.1.3 Coliformes Fecales.....	6
2.2 Limitaciones de la Modelación	7
3. MODELACION DEL SISTEMA	9
3.1 Aspectos Generales	9
3.2 Información Disponible	9
3.2.1 Datos Para Calibración (Año 1980)	9
3.2.2 Datos la Simulación Situación Actual (Año 1990)	11
3.2.3 Datos la Simulación Situación Futura (Año 2010)	11
3.3 Calibración.....	13
3.4 Modelación Situación Actual	17
3.5 Modelación Futura.....	19
4. DISCUSION Y CONCLUSIONES	24
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	25

1. INTRODUCCION

Este informe presenta una aplicación de un modelo de calidad de aguas superficiales utilizado para cumplir con un requisito del curso CI51J, Contaminación de Recursos Hídricos, y básicamente consiste en la modelación de la calidad de agua de la cuenca del Río Mapocho, desde la confluencia con el Estero El Arrayán hasta su desembocadura en el río Maipo. Este trabajo fue originalmente desarrollado por los alumnos Julio Cornejo y Gonzalo Lobos.

Los parámetros a modelar son: Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Coniformes Fecales.

1.1 Objetivo General

El principal objetivo del presente trabajo es que el alumno realice una aplicación de los conceptos de modelación de calidad de aguas.

1.2 Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos de este trabajo se cuentan los siguientes:

- Implementar un modelo de simulación de calidad de agua.
- Utilizar información histórica para calibrar los parámetros del modelo de calidad de agua.
- Realizar una simulación de la situación actual (año 1990) de la calidad del río Mapocho.
- Utilizar un modelo de calidad de aguas para analizar el impacto de sistemas de tratamiento (situación futura) sobre la calidad de un tramo de un curso de agua.

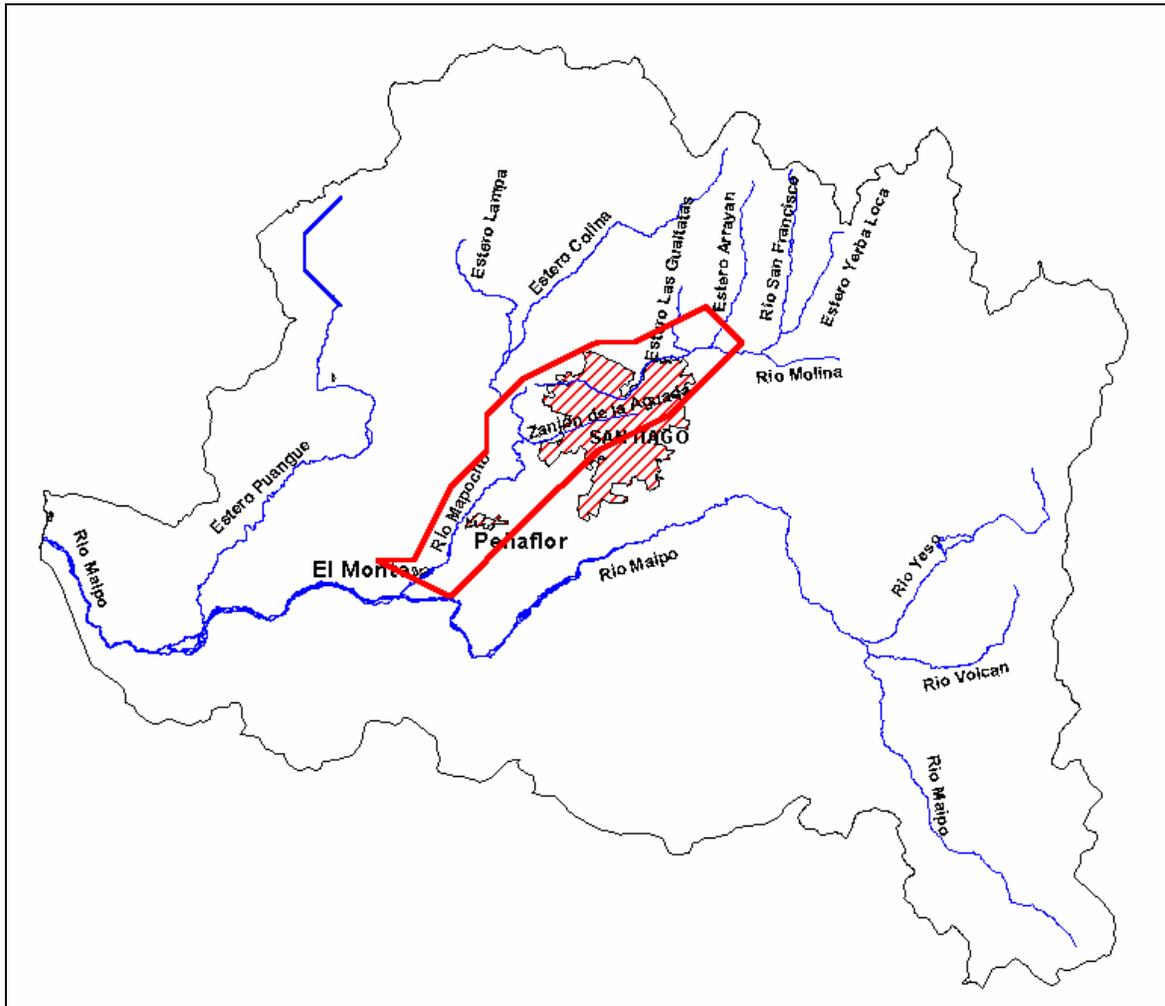
1.3 Caracterización del Sistema

La zona de estudio forma parte de la cuenca hidrográfica del río Maipo, la cual se ubica en Chile Central, entre los 33° 00' y los 34° 15' de latitud sur aproximadamente.

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Mapocho desde su confluencia con el Estero Arrayán hasta su desembocadura en el río Maipo a la altura de la localidad de El Monte, tal como se muestra en la Figura 1.1.

La calidad de las aguas del río Mapocho se encuentra fuertemente deteriorada, producto de los innumerables años en los que ha sido mal tratado y utilizado como basurero y alcantarilla a tajo abierto por decenas de generaciones.

Figura 1.1
Ubicación del Area de Estudio



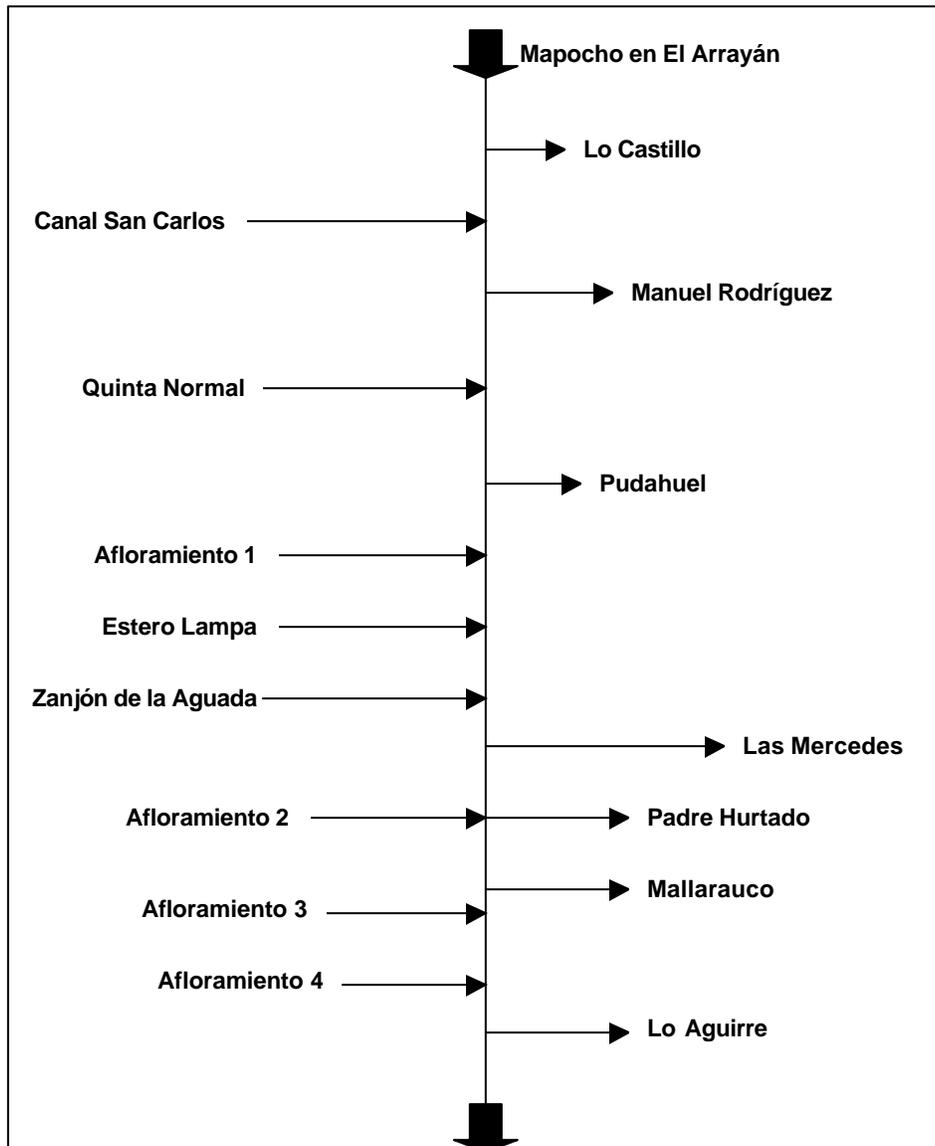
1.4 Topología del Sistema

El sistema a modelar se representa esquemáticamente en la Figura 1.2, en la que se puede apreciar que a lo largo del río Mapocho existen una serie de entradas y salidas de caudal. En la Tabla 1.1 se muestran los diversos nodos que se definieron para la modelación del río, su identificación o nombre, su ubicación o kilometraje y el tipo.

Tabla 1.1
Nodos de Interés en el Sistema

Nodo	Nombre	Kilometraje km	Tipo
1	El Arrayán	0.0	Aporte
2	Lo Castillo	8.0	Salida
3	Canal San Carlos	15.4	Aporte
4	Manuel Rodríguez	21.1	Salida
5	Quinta Normal	27.5	Aporte
6	Pudahuel	37.4	Salida
7	Afloramiento 1	41.1	Aporte
8	Estero Lampa	42.5	Aporte
9	Zanjón de la Aguada	49.1	Aporte
10	Las Mercedes	52.6	Salida
11	Afloramiento 2	62.0	Aporte
12	Padre Hurtado	62.0	Salida
13	Mallarauco	70.0	Salida
14	Afloramiento 3	73.0	Aporte
15	Afloramiento 4	84.1	Aporte
16	Lo Aguirre	87.3	Salida
17	Río Mapocho	95.1	Salida

Figura 1.2
Diagrama Unifilar del Sistema



2. ASPECTOS TEORICOS

2.1 Ecuaciones que rigen el sistema a modelar

2.1.1 Demanda Bioquímica del Oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) mide el oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar, degradar o estabilizar la materia orgánica, es decir, mide solamente las materias orgánicas biodegradables, no mide contaminantes específicos.

Por motivos de simplicidad para el modelo desarrollado en este trabajo se adopto la siguiente expresión para describir el comportamiento de la DBO.

$$L(x) = L_0 \cdot e^{-\frac{k_1 - k_2}{u} \cdot x} \quad (1)$$

donde

- L_0 : DBO al inicio del tramo de río, mg/L
- u : Velocidad de escurrimiento, Km/día
- k_1 : Constante de oxidación de la materia orgánica, 1/día
- k_2 : Coeficiente de reoxigenación atmosférica, 1/día
- x : Distancia desde el origen del tramo de río, Km

2.1.2 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (OD) proviene de la aeración y de la fotosíntesis. Mientras que el consumo del oxígeno se produce por la respiración de los organismos, la demanda de la materia orgánica y del sedimento y de la oxidación de inorgánicos.

Las concentraciones de oxígeno disuelto en agua varían diaria y estacionalmente por:

- Especies de fitoplancton presentes
- Penetración de luz
- Disponibilidad de nutrientes
- Temperatura
- Salinidad
- Movimientos del agua
- Presión parcial del O_2 atmosférico en contacto con agua
- Espesor del film superficial
- Tasas de consumo por organismos acuáticos y procesos de oxigenación y descomposición.

Luego, el oxígeno disuelto está dado por la siguiente expresión

$$D = C_s - OD \quad (2)$$

en que:

- CS : Concentración de saturación de oxígeno a 20 °C y 1 atm, mg/L
D : Déficit de oxígeno, mg/L
OD : Oxígeno Disuelto, mg/L

El déficit de oxígeno se encuentra dado por la siguiente expresión:

$$D(x) = \frac{L_0 \cdot k_1}{k_2 - k_1 - k_3} \cdot \left(e^{-\frac{k_1+k_3}{u} \cdot x} - e^{-\frac{k_2}{u} \cdot x} \right) + D_0 \cdot e^{-\frac{k_2}{u} \cdot x} \quad (3)$$

En donde:

- L_0 : DBO al inicio del tramo de río, mg/L
 D_0 : Déficit de oxígeno al inicio del tramo de río, mg/L
 k_1 : Constante de oxidación de la materia orgánica, 1/día
 k_2 : Constante de reoxigenación, 1/día
 k_3 : Constante de sedimentación, 1/día
 u : Velocidad de escurrimiento, Km/día
 x : Distancia desde el origen del tramo de río, Km

2.1.3 Coliformes Fecales

Los coliformes fecales presentan una buena correlación con la contaminación fecal presente en el agua, la supervivencia de los coliformes fecales es relativamente corta e inferior a los coliformes no fecales, por lo tanto su detección en concentraciones altas es indicativo de contaminación fecal reciente, debido a que los coliformes fecales no se multiplican fuera del intestino de los mamíferos.

Los coliformes fecales son un parámetro oficial en diversos países para evaluar la contaminación de origen fecal y fijar criterios de calidad en aguas utilizadas en recreación, regadío, crianza de animales o uso industrial.

La siguiente expresión muestra el decaimiento de la población de coliformes fecales.

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\frac{k_b}{u} \cdot x} \quad (4)$$

Donde:

- N_0 : Número más probable al inicio del tramo de río, NMP/100 mL
 k_b : Constante de decaimiento, 1/día
 u : Velocidad de escurrimiento, Km/día
 x : Distancia desde el origen del tramo de río, Km

2.2 Limitaciones de la Modelación

El modelo desarrollado presenta una serie de suposiciones y simplificaciones, que pueden llegar a ser las principales causas de diferencia en los valores observados y calculados de los parámetros de interés.

Las suposiciones y simplificaciones son las siguientes.

- La primera consiste en despreciar el coeficiente de dispersión turbulenta ($\varepsilon = 0$). Esto implica que el sistema es considerado como flujo pistón.
- La segunda corresponde a suponer nulo el efecto de la resuspensión de sedimentos de fondo, lo que influye en la disminución de los parámetros de DBO y por lo tanto la modelación en general tiende a subestimar el valor de este parámetro. Por su parte el valor del oxígeno disuelto estará sobreestimado.
- Se asume conocido y constante el valor de la tasa de decaimiento de los coliformes fecales. Lo que implica que no se calibran los valores asociados a este parámetro.
- Las condiciones de flujo en el tramo de río en estudio se asumen conocidas y constantes dentro de los períodos definidos y se determinan a partir de curvas de descarga características de cada tramo de río.

Las siguientes expresiones muestran las relaciones de velocidad y altura de escurrimiento en función del caudal de los tramos definidos.

Tramo 1: Mapocho en Arrayán - San Carlos

$$u = 0,493 \cdot Q^{0,493} \quad (5a)$$

$$H = 0,21 \cdot Q^{0,323} \quad (5b)$$

Tramo 2: San Carlos – Mapocho en Rinconada

$$u = 0,201 \cdot Q^{0,431} \quad (6a)$$

$$H = 0,364 \cdot Q^{0,434} \quad (6b)$$

Donde

- u : Velocidad promedio en el tramo del cauce, m/s
H : Altura de Escurrimiento de agua en el tramo, m
Q : Caudal asociado al tramo, m³/s

- Para la calibración se utilizó datos históricos de caudales medios diarios correspondientes a los meses de abril, mayo y junio, debido a que estos ajustan en mejor forma los parámetros de calibración. En tanto que en las simulaciones de las situaciones actual y futura, se utilizó datos de caudales medios mensuales.
- La temperatura del agua se asume constante e igual a 15° C. Por lo tanto las constantes de decaimiento del modelo se corrigen ya que estas están dadas para 20°, utilizando la siguiente expresión:

$$k_{15} = k_{20} \cdot q(k)^{(15-20)} \quad (7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \theta(k_1) &= 1.047 \\ \theta(k_2) &= 1.024 \\ \theta(k_3) &= 1.024 \\ \theta(k_b) &= 1.047 \end{aligned}$$

- Los parámetros correspondientes a cada tramo están definidos por las siguientes expresiones.

Tabla 2.1
Constantes del Modelo

Tramo	k_1 [1/día]	k_2 [1/día]	k_3 [1/día]	k_b [1/día]
Mapocho Arrayán - San Carlos	0,05 – 0,20	$124,89 \cdot Q^{-1,326}$	0 - 6	2,03
San Carlos - Mapocho en Rinconada	0,05 – 0,20	$124,89 \cdot Q^{-1,326}$	0 - 6	2,03

3. MODELACION DEL SISTEMA

3.1 Aspectos Generales

Para enfrentar la modelación del sistema, se utilizan las ecuaciones que rigen el sistema de calidad y la información disponible bajo los supuestos y simplificaciones descritas anteriormente. La modelación propiamente tal, consiste en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

- Calibración de los parámetros que rigen el comportamiento de la DBO y de OD (ecuaciones 1 y 2 respectivamente), además de una verificación del comportamiento de los coliformes fecales (parámetro k_f de la ecuación 4). Esta calibración se realiza para los datos disponibles del año 1980.
- Simulación del comportamiento de la DBO, del OD y de los coliformes fecales para los datos disponibles del año 1990, que para efectos de este trabajo es considerada como la situación actual.
- Simulación del comportamiento de la DBO, del OD y de los coliformes fecales para una situación futura correspondiente a los datos estimados para el año 2010.

3.2 Información Disponible

A continuación se muestra la información disponible a utilizarse en los procesos de calibración y las posteriores simulaciones. Esta información se puede agrupar en tres clases, correspondientes a los períodos de 1980, 1990 y 2010.

3.2.1 Datos Para Calibración (Año 1980)

La Tabla 3.1 muestra la información de caudales medios diarios para el período abril-junio del año 1980 en los nodos definidos en el punto 1.4.

En la Tabla 3.2 se muestran los valores asociados a DBO, OD y coliformes fecales, correspondientes a las descargas históricas medias mensuales del año 1980.

En las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran valores medios, máximos y mínimos de DBO, OD y coliformes fecales, respectivamente, medidos en el año 1980, los cuales se utilizarán para el proceso de calibración.

Tabla 3.1
Caudales Medios Diarios Abril a Junio (Año 1980)

Nodo	Nombre	Kilometraje km	Aporte m³/s	Extracción m³/s
1	El Arrayán	0.0	7.9	
2	Lo Castillo	8.0		1.31
3	Canal San Carlos	15.4	22.46	
4	Manuel Rodríguez	21.1		2.78
5	Quinta Normal	27.5	2.92	
6	Pudahuel	37.4		0.42
7	Afloramiento 1	41.1	1.13	
8	Estero Lampa	42.5	2	
9	Zanjón de la Aguada	49.1	2	
10	Las Mercedes	52.6		8.25
11	Afloramiento 2	62.0	2.22	
12	Padre Hurtado	62.0		0.79
13	Mallarauco	70.0		0.83
14	Afloramiento 3	73.0	2.22	
15	Afloramiento 4	84.1	2.22	
16	Lo Aguirre	87.3		0.95
17	Río Mapocho	95.1	29.74	

Tabla 3.2
Características de las Descargas Históricas (Año 1980)

Nodo	Nombre	DBO mg/l	OD mg/l	Coliformes NMP/100ml
1	Mapocho en Arrayán	0.40	10.60	52
3	Canal San Carlos	12.60	10.20	200000
5	Quinta Normal	280.00	0.00	10000000
7	Afloramiento 1	1.90	8.20	0
8	Estero Lampa	9.60	1.80	200
9	Zanjón de la Aguada	50.00	4.00	10000000
11	Afloramiento 2	1.90	8.20	0
14	Afloramiento 3	1.90	8.20	0
15	Afloramiento 4	1.90	8.20	0

Tabla 3.3
Valores Observados de Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)

Nodo	Nombre	DBO observada		
		Mínima	Media	Máxima
1	El Arrayán	0.4	0.5	0.7
3	Pedro de Valdivia	10.3	16.6	21
6	Pudahuel	33.7	43.4	49.5
10	Las Mercedes	14.6	21.1	26
14	Peñaflor	15.2	20.2	22.8
16	El Monte	20.9	23.2	25.5

Tabla 3.4
Valores Observados de Oxígeno Disuelto (mg/L)

Nodo	Nombre	OD observada		
		Mínima	Media	Máxima
1	El Arrayán	8.8	10.2	10.9
3	Pedro de Valdivia	8.7	9.7	10.5
4	Manuel Rodríguez		8.5	
6	Pudahuel	3.2	6.6	8.8
10	Las Mercedes	4.6	5.6	6.7
14	Peñaflor	6.3	7.3	7.7
16	El Monte	7.1	8.3	11.4

Tabla 3.5
Valores Observados de Coliformes Fecales (Coliformes/100 mL)

Nodo	Nombre	Coliformes observados		
		Mínima	Media	Máxima
1	El Arrayán	4.9E+01	5.2E+01	1.3E+02
2	Lo Castillo	4.9E+01	1.9E+02	1.2E+04
3	Pedro de Valdivia	2.2E+05	5.4E+05	9.2E+05
4	Pudahuel	3.0E+05	1.7E+06	9.2E+06
10	Las Mercedes	1.4E+06	2.4E+06	4.5E+06
14	Peñaflor	1.1E+05	2.3E+05	4.5E+05
16	El Monte	3.3E+04	1.3E+05	7.0E+05

3.2.2 Datos la Simulación Situación Actual (Año 1990)

La Tabla 3.6 muestra la información de caudales medios mensuales para los períodos octubre-enero, febrero-mayo y junio-septiembre, respectivamente, para el año 1990 en los nodos definidos en el punto 1.4.

3.2.3 Datos la Simulación Situación Futura (Año 2010)

La Tabla 3.7 muestra la información de caudales medios mensuales estimados para los períodos octubre-enero, febrero-mayo y junio-septiembre, respectivamente, correspondientes al año 2010 en los nodos definidos en el punto 1.4.

En la Tabla 3.8 se muestran los valores asociados a DBO, OD y coliformes fecales, correspondientes a las descargas medias estimadas para el año 2010, considerando en funcionamiento las distintas plantas de tratamiento que mejoran la calidad de las descargas.

Tabla 3.6
Caudales Medios Mensuales (Año 1990)

Nodo	Nombre	Dist. km	Octubre a Enero		Febrero a Mayo		Junio a Septiembre	
			Aporte m ³ /s	Extrac m ³ /s	Aporte m ³ /s	Extrac m ³ /s	Aporte m ³ /s	Extrac m ³ /s
1	El Arrayán	0.0	10.85		3.45		5.20	
2	Lo Castillo	8.0		2.50		1.86		1.30
3	Canal San Carlos	15.4	15.63		13.50		12.43	
4	Manuel Rodríguez	21.1		9.22		5.72		2.76
5	Quinta Normal	27.5	2.92		2.92		2.92	
6	Pudahuel	37.4		1.41		0.87		0.42
7	Afloramiento 1	41.1	1.13		1.13		1.13	
8	Estero Lampa	42.5	2.11		1.08		2.38	
9	Zanjón de la Aguada	49.1	0.82		0.99		3.62	
10	Las Mercedes	52.6		8.81		8.51		8.24
11	Afloramiento 2	62.0	2.22		2.22		2.22	
12	Padre Hurtado	62.0		2.62		1.63		0.78
13	Mallarauco	70.0		2.73		1.7		0.72
14	Afloramiento 3	73.0	2.22		2.22		2.22	
15	Afloramiento 4	84.1	2.22		2.22		2.22	
16	Lo Aguirre	87.3		3.14		1.95		0.94
17	Río Mapocho	95.1	9.69		7.49		19.18	

Tabla 3.7
Caudales Medios Mensuales Octubre-Enero (Año 2010)

Nodo	Nombre	Dist. km	Octubre a Enero		Febrero a Mayo		Junio a Septiembre	
			Aporte m ³ /s	Extrac m ³ /s	Aporte m ³ /s	Extrac m ³ /s	Aporte m ³ /s	Extrac m ³ /s
1	El Arrayán	0.0	10.85		3.45		5.20	
2	Lo Castillo	8.0		2.50		1.86		1.30
3	Canal San Carlos	15.4	15.63		13.5		12.43	
4	Manuel Rodríguez	21.1		9.22		5.72		2.76
5	Quinta Normal	27.5	8.00		8.00		8.00	
6	Pudahuel	37.4		1.41		0.87		0.42
7	Afloramiento 1	41.1	1.13		1.13		1.13	
8	Estero Lampa	42.5	2.11		1.08		2.38	
9	Zanjón de la Aguada	49.1	1.50		1.50		1.50	
10	Las Mercedes	52.6		8.81		8.51		8.24
11	Afloramiento 2	62.0	2.22		2.22		2.22	
12	Padre Hurtado	62.0		2.62		1.63		0.78
13	Mallarauco	70.0		2.73		1.70		0.72
14	Afloramiento 3	73.0	2.22		2.22		2.22	
15	Afloramiento 4	84.1	2.22		2.22		2.22	
16	Lo Aguirre	87.3		3.14		1.95		0.94
17	Río Mapocho	95.1	15.45		13.08		22.14	

Tabla 3.8
Características de las Descargas Futuras (Año 2010)

Nodo	Nombre	DBO mg/l	OD mg/l	Coliformes Coli/100ml
1	El Arrayán	0.40	10.60	52
3	Canal San Carlos	0.40	10.60	52
5	Quinta Normal	0.40	10.60	52
7	Afloramiento 1	1.90	8.20	0
8	Estero Lampa	0.40	10.60	200
9	Zanjón de la Aguada	0.40	10.60	52
11	Afloramiento 2	1.90	8.20	0
14	Afloramiento 3	1.90	8.20	0
15	Afloramiento 4	1.90	8.20	0

3.3 Calibración

En primer término en el proceso de modelación se calibrarán los parámetros que rigen el comportamiento de la DBO y el OD (ecuaciones 1 y 2, respectivamente). Para ello se utiliza la información contenida en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5, es decir los caudales medios diarios del período abril-junio, descargas históricas medias mensuales y valores medidos de DBO y OD.

En segundo término se realizará una verificación del comportamiento de los coliformes fecales, dado que el parámetro, k_b , que gobierna el comportamiento de los coliformes es considerado constante e igual a $2,03 \text{ día}^{-1}$ para los fines de este trabajo.

El modelo se desarrolló en base al software Microsoft Excel. En una planilla de dicho software se implementaron las ecuaciones (1) a (8). Los cálculos asociados a cada una de las ecuaciones señaladas se realizaron para cada uno de los nodos indicados en el punto 1.4. Además se debe indicar que en los nodos en que existe una descarga hacia el río Mapocho se calculó mediante mezcla completa la calidad del agua resultante a la salida del nodo.

Para ajustar la calibración, se consideran dos expresiones para calcular el error asociado a los cálculos del modelo.

- Para la DBO se utiliza:

$$F_1 = \sqrt{\frac{(DBO_{calc} - DBO_{obs})^2}{n_{DBO}}} \quad (8)$$

donde

DBO_{calc} : Demanda Bioquímica de Oxígeno calculada
 DBO_{obs} : Demanda Bioquímica de Oxígeno medida
 n_{DBO} : Número de observaciones

- Para el Oxígeno disuelto se utiliza

$$F_2 = \sqrt{\frac{(OD_{calc} - OD_{obs})^2}{n_{OD}}} \quad (9)$$

OD_{calc} : Demanda Bioquímica de Oxígeno calculada
 OD_{obs} : Demanda Bioquímica de Oxígeno medida
 n_{OD} : Número de observaciones

Luego el problema consiste en minimizar la siguiente función objetivo:

$$MIN \quad FO(DBO; OD) = F_1 + F_2 \quad (10)$$

sujeto a las siguientes restricciones.

$$\begin{aligned} 0,05 &\leq k_1 \leq 0,2 \\ k_2 &= 124,89 \cdot Q^{-1,326} \\ 0 &\leq k_3 \leq 6 \end{aligned} \quad (11)$$

Este proceso se realizó mediante la utilización de la herramienta Solver contenida en Microsoft Excel.

La información utilizada para el proceso de calibración corresponde a los caudales contenidos en la Tabla 3.1, mientras que las calidades de las descargas corresponden a la información contenida en la Tabla 3.2. Por otra parte, para comparar los valores calculados con datos observados se utilizó la información contenida en las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

En la Tabla 3.9 se muestran los valores calibrados de las distintas constantes. En dicha tabla se puede apreciar que la constante k_3 adquiere un valor igual a 0 en varios de los tramos analizados. La Figura 3.1 muestra el balance de flujos para en cada uno de los nodos definidos con anterioridad.

En la Figura 3.2 se muestran los valores de DBO calculados (en color rojo) y los observados (en color azul) una vez calibradas las constantes. Se obtuvo un valor de 4.72 para la función objetivo (F1) de la DBO definida anteriormente. Se puede observar que los valores se ajustan aceptablemente.

En la Figura 3.3 se muestran los valores de OD calculados (en color rojo) y los observados (en color azul) una vez calibradas las constantes. Se obtuvo un valor de 0.91 para la función objetivo (F2) del OD definida anteriormente. Se puede observar que los valores se ajustan de mejor forma que los de DBO.

En la Figura 3.4 se comprueba que el valor adoptado para el parámetro k_6 , que describe el comportamiento de la población de coliformes fecales es adecuado, ya que los valores calculados son similares a los medidos.

Tabla 3.9
Valores Calibrados de las Constantes del Modelo (15°C)

Tramo	Constantes a 15°C			
	k_1	k_2	k_3	k_b
	1/día	1/día	1/día	1/día
El Arrayán-Lo Castillo	0,397	2,937	1,440	1,613
Lo Castillo-Canal San Carlos	0,397	3,046	1,481	1,613
Canal San Carlos-Manuel Rodríguez	0,397	1,358	0,000	1,613
Manuel Rodríguez-Quinta Normal	0,040	1,386	0,000	1,613
Quinta Normal-Pudahuel	0,196	1,357	0,000	1,613
Pudahuel-Afloramiento 1	0,397	1,361	0,000	1,613
Afloramiento 1-Estero Lampa	0,397	1,350	2,026	1,613
Estero Lampa-Zanjón de la Aguada	0,397	1,333	0,037	1,613
Zanjón de la Aguada-Las Mercedes	0,397	1,317	5,179	1,613
Las Mercedes-Afloramiento 2	0,040	1,393	0,000	1,613
Afloramiento 2-Padre Hurtado	0,040	1,370	0,000	1,613
Padre Hurtado-Mallarauco	0,040	1,378	0,000	1,613
Mallarauco-Afloramiento 3	0,040	1,386	0,000	1,613
Afloramiento 3-Afloramiento 4	0,040	1,364	0,000	1,613
Afloramiento 4-Lo Aguirre	0,040	1,343	0,000	1,613
Lo Aguirre-Río Mapocho	0,397	1,352	4,814	1,613

Figura 3.1
Balance de Flujos

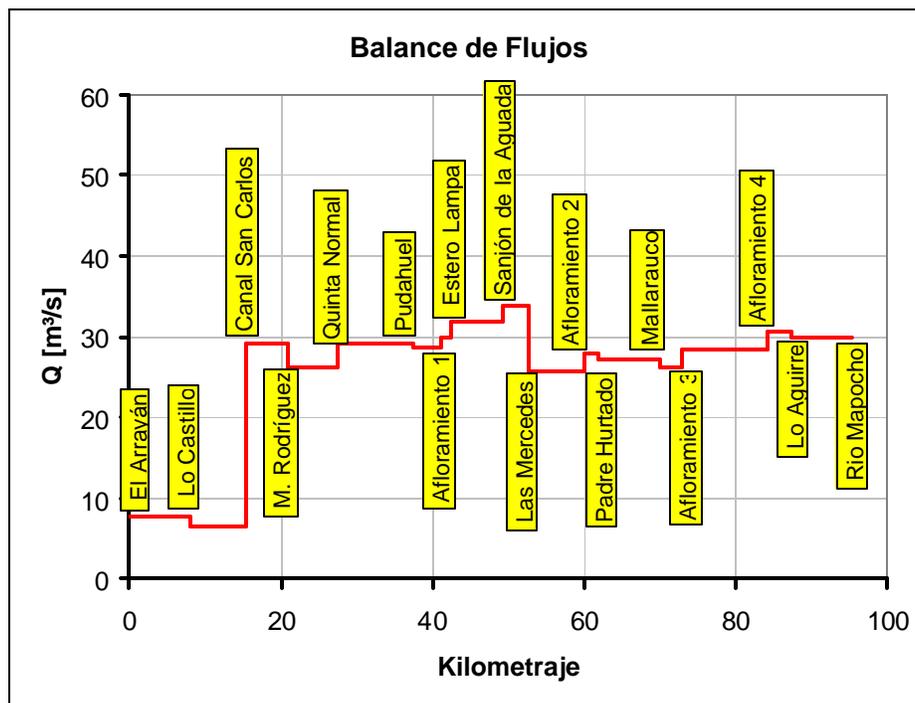


Figura 3.2
Calibración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

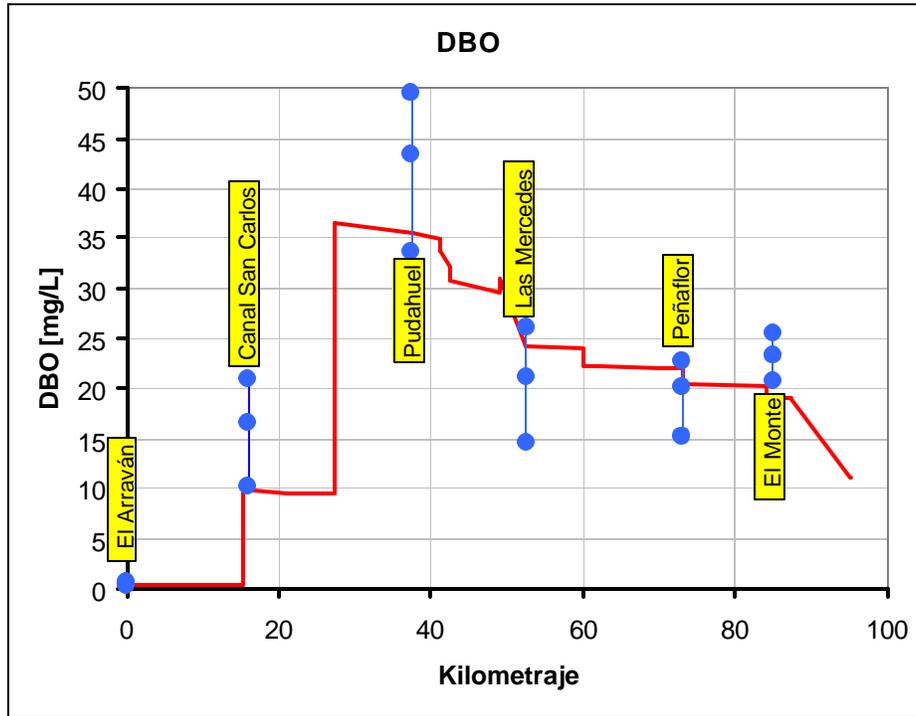


Figura 3.3
Calibración del Oxígeno Disuelto

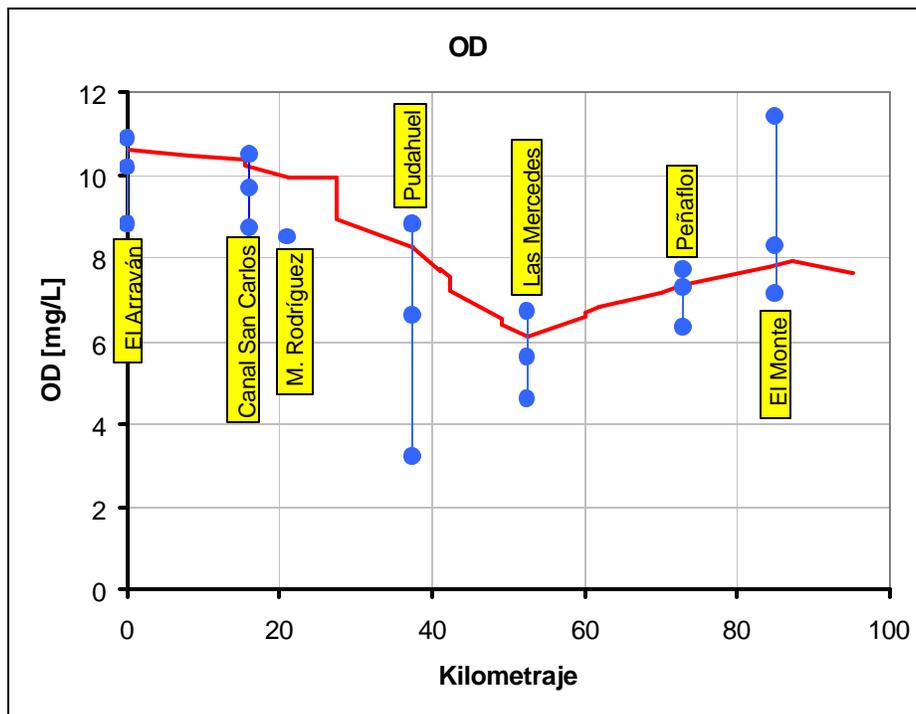
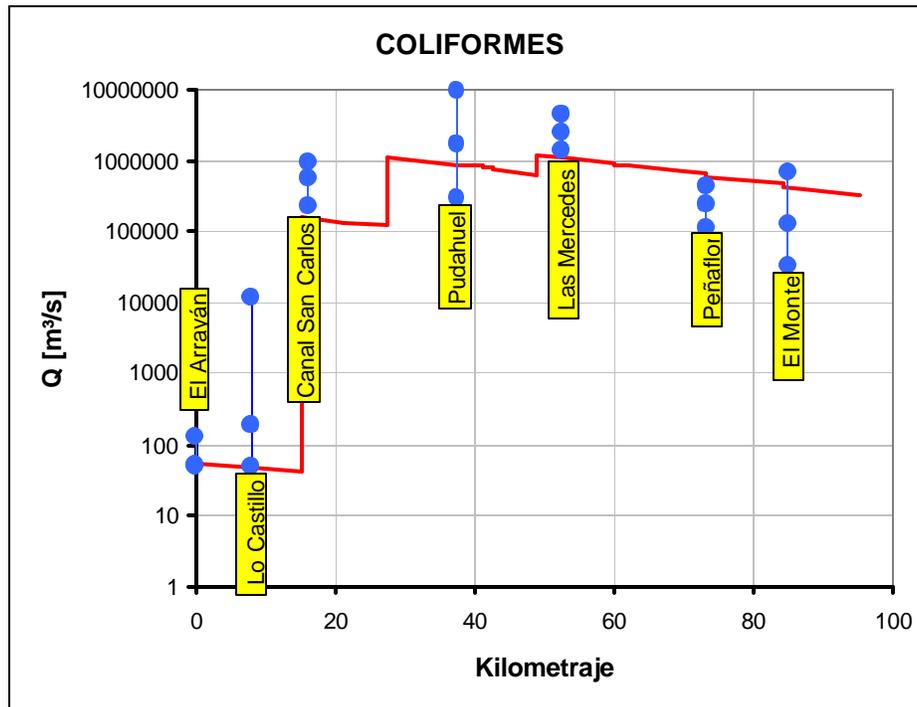


Figura 3.4
Comparación de Valores de Coliformes Fecales Observados y Medidos



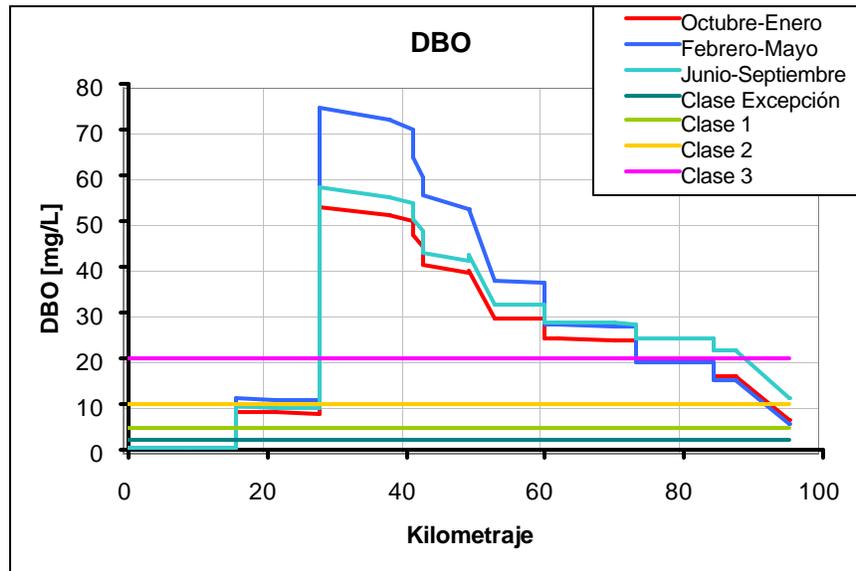
3.4 Modelación Situación Actual

En este capítulo se requiere estudiar la conducta del modelo confeccionado, realizando simulaciones con información más actualizada y analizando el comportamiento del sistema del río Mapocho.

La información utilizada para la simulación de la situación actual corresponde a los caudales contenidos en la Tabla 3.6, correspondiente al período Octubre-Enero, Febrero-Mayo y Junio-Septiembre, respectivamente. Mientras que las calidades de las descargas corresponden a la información contenida en la Tabla 3.8. Para realizar un análisis crítico de la situación generada a partir de la operación del modelo se utiliza la “Norma Secundaria de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Aguas Marinas”.

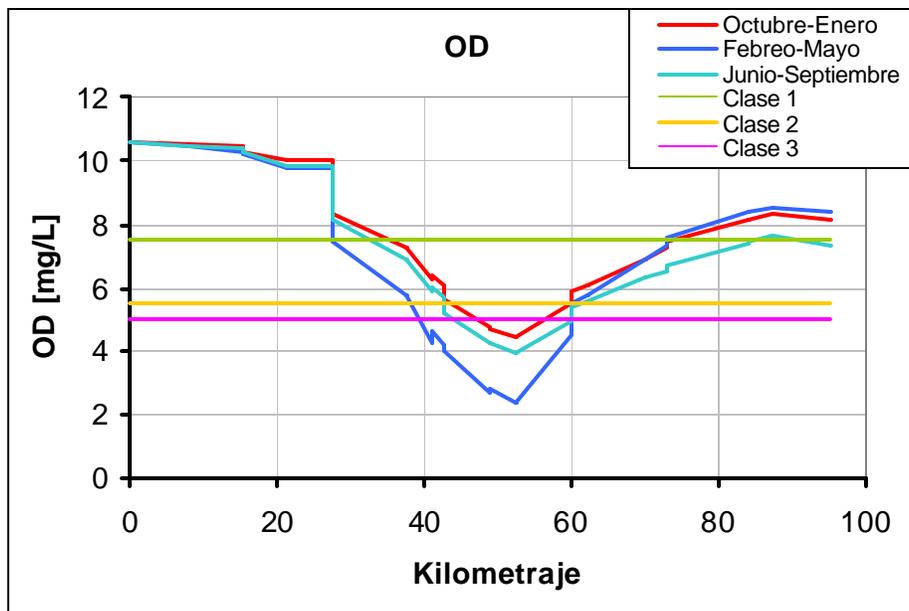
La Figura 3.5 muestra el comportamiento de la DBO para la situación generada con los caudales del año 1990. En este gráfico se aprecia que el río Mapocho, aguas abajo de la confluencia con el Canal san Carlos, presenta un fuerte aumento de la DBO, ubicando sus rangos peor que el valor límite de la clase 3 según la Norma antes señalada. Sin embargo aguas abajo del afloramiento 4, se aprecia una mejora de la calidad del río, respecto de este parámetro, quedando en la clase 3.

Figura 3.5
Demanda Bioquímica de Oxígeno para la Situación Actual



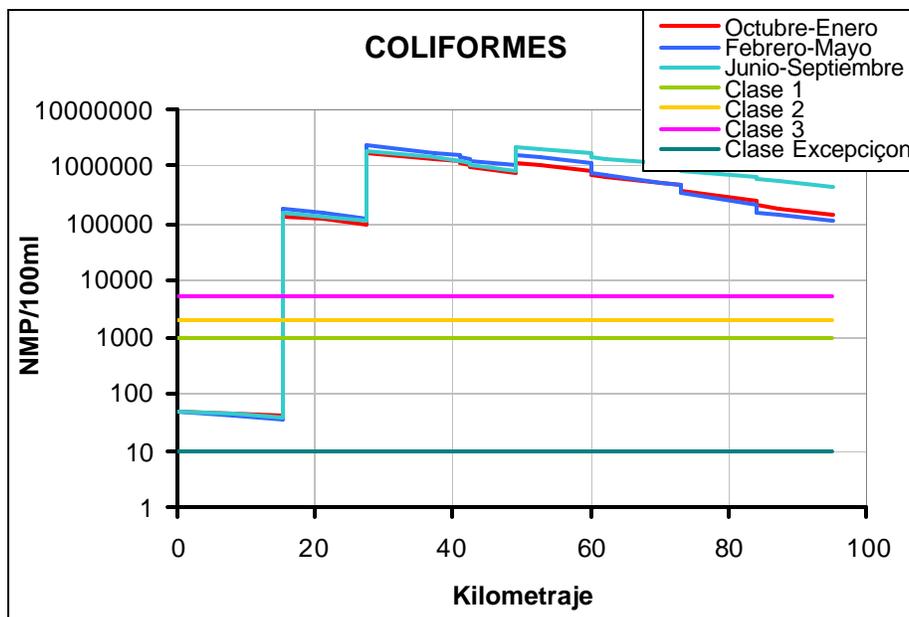
La Figura 3.6 muestra el comportamiento del OD para la situación actual. En este gráfico se aprecia que el río Mapocho, según la Norma, presenta sus rangos asociados a la clase 1 hasta Quinta Normal, El tramo siguiente corresponde a un rango de OD de clase 2, cuyo término varía entre Pudahuel y el afloramiento 1 según el período estacional. Desde el kilómetro 40 hasta Padre Hurtado se aprecia que el rango de OD corresponde a clase 4, volviendo a clase 2 hasta el afloramiento 4, donde pasa nuevamente a clase 1.

Figura 3.6
Oxígeno Disuelto para la Situación Actual



En la Figura 3.7 se presenta el comportamiento de los Coliformes fecales a lo largo del río Mapocho. En este gráfico se aprecia que los valores de coliformes, según la Norma, indicarían que la calidad del río en casi toda su extensión se presenta peor que la clase 3, salvo aguas arriba de la confluencia entre el río y el Canal San Carlos en que la calidad se encuentra en el rango de la clase 1.

Figura 3.7
Coliformes Fecales para la Situación Actual



3.5 Modelación Futura

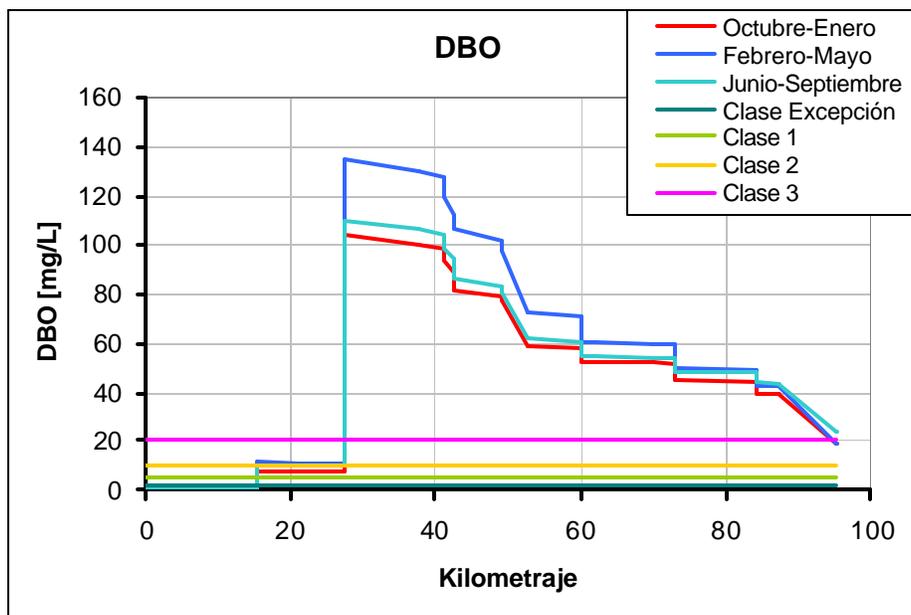
En este capítulo se requiere estudiar la conducta del modelo confeccionado, para realizar una proyección futura del comportamiento de los parámetros de calidad en el curso de las aguas del río Mapocho. Para ello se realizan simulaciones con información proyectada de los caudales en el río para el año 2010 y se analiza la conducta del sistema para el caso en que las descargas al río Mapocho continúan con el mismo comportamiento de la situación actual (efluentes sin tratamiento) y se compara con el caso en que las plantas de tratamiento proyectadas operan mejorando la calidad de las descargas.

La información utilizada para la simulación de la situación futura corresponde a los caudales contenidos en la Tabla 3.7, correspondiente al período Octubre-Enero, Febrero-Mayo y Junio-Septiembre, respectivamente. Mientras que las calidades de las descargas corresponden a la información contenida en la Tabla 3.8.

En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestra el comportamiento de la DBO para la situación sin y con tratamiento respectivamente. Se puede apreciar que para la situación sin tratamiento la mayor parte del río Mapocho se encuentra en una calidad peor que la clase 3, a excepción de los tramos Arrayán-San Carlos donde se presenta con calidad de excepción y en tramo San Carlos-Quinta Normal donde la calidad se presenta en clase 2 en el

período de Junio-Enero, mientras que para la época de menor caudal (Febrero-Mayo) la calidad es inferior alcanzando la clase 3. Por su parte, para la situación con tratamiento se puede observar claramente una mejora sustancial de la calidad del río en toda su extensión; presentándose con calidad de excepción en todo el tramo analizado.

Figura 3.8
Demanda Bioquímica de Oxígeno para la Situación Futura
(Caso Descargas sin Tratamiento)



En las Figuras 3.10 y 3.11 se muestra el comportamiento del OD para la situación sin y con tratamiento respectivamente. Se puede apreciar que para la situación sin tratamiento el río Mapocho presenta una calidad correspondiente a la clase de excepción desde el Arrayán hasta Quinta Normal. A partir de este punto la calidad se deteriora rápidamente, incluso, alcanzando un estado anaeróbico para los meses de menor caudal entre el afloramiento 1 y aguas abajo del Zanjón de la Aguada. El tramo entre Quinta Normal y el afloramiento 3 presenta una calidad clase 3, mejorando hacia aguas abajo del afloramiento 3 pasando a calidad clase 1. Para el caso en que las descargas son tratadas, se puede observar claramente una mejora sustancial de la calidad del río en toda su extensión; presentándose con calidad de excepción en todo el tramo analizado.

En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestra el comportamiento de los coliformes fecales para la situación sin y con tratamiento respectivamente. Se puede apreciar que para la situación sin tratamiento el río Mapocho en el tramo Arrayán –San Carlos presenta una calidad correspondiente a la clase, mientras que para el resto del río la calidad se encuentra pero que el límite establecido por la clase 3.

Para el caso en que las descargas son tratadas, se observa una mejora notoria en la calidad a lo largo de todo el río. Desde el Arrayán hasta el afloramiento 4 se presenta con calidad 1 y a partir de este punto el río se ubica en calidad de excepción.

Figura 3.9
Demanda Bioquímica de Oxígeno para la Situación Futura
(Caso Descargas con Tratamiento)

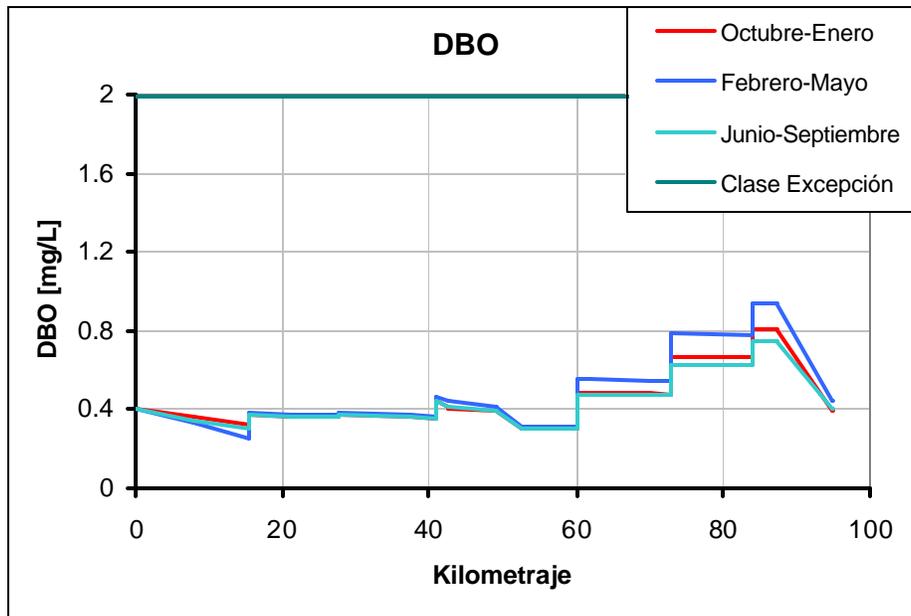


Figura 3.10
Oxígeno Disuelto para la Situación Futura
(Caso Descargas Situación Actual)

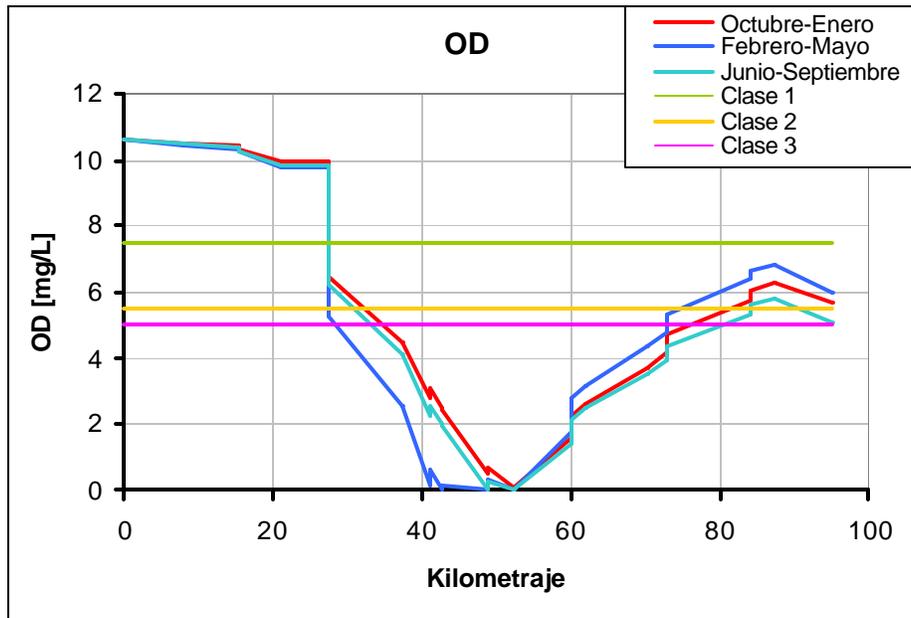


Figura 3.11
Oxígeno Disuelto para la Situación Futura
(Caso Descargas con Tratamiento)

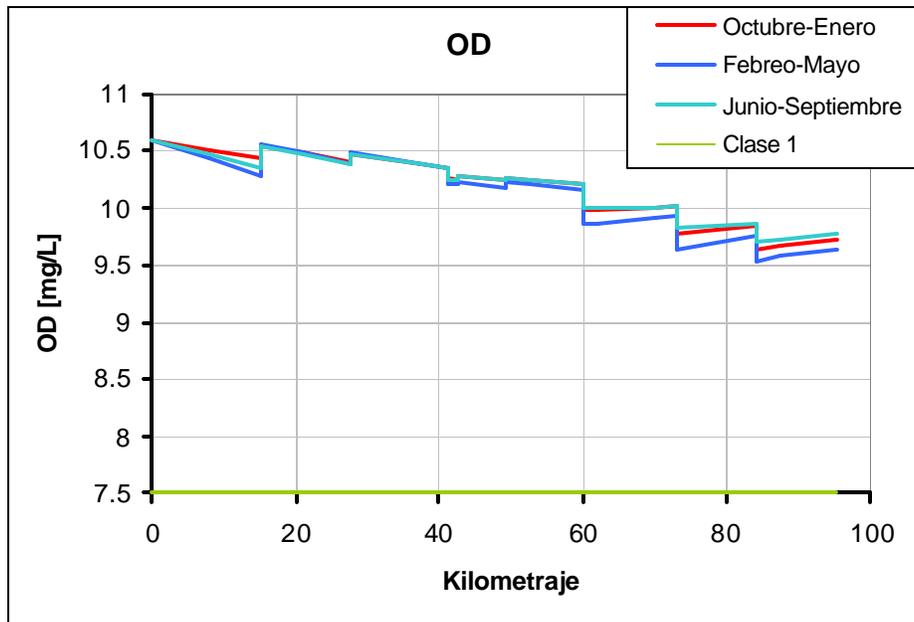


Figura 3.12
Coliformes Fecales para la Situación Futura
(Caso Descargas Situación Actual)

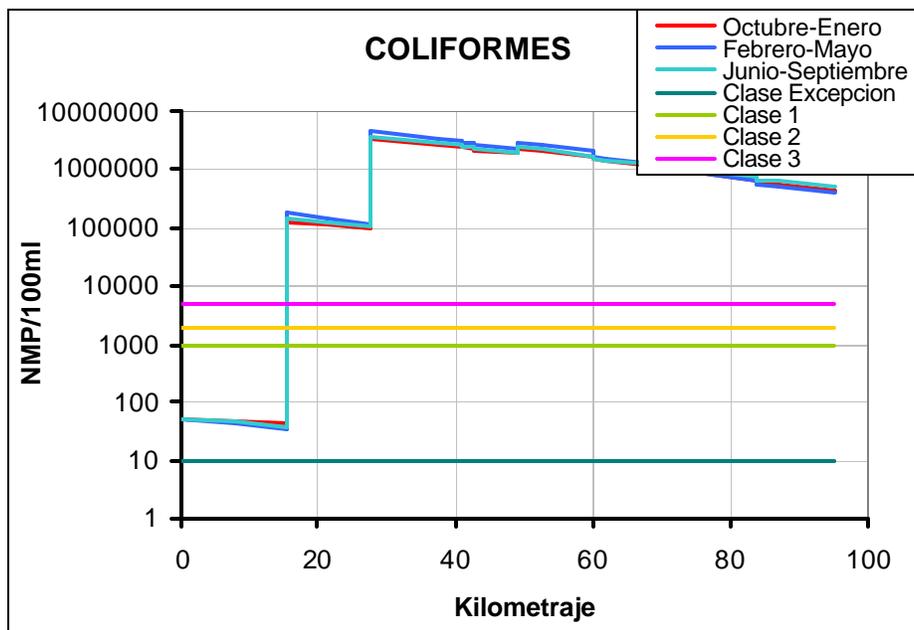
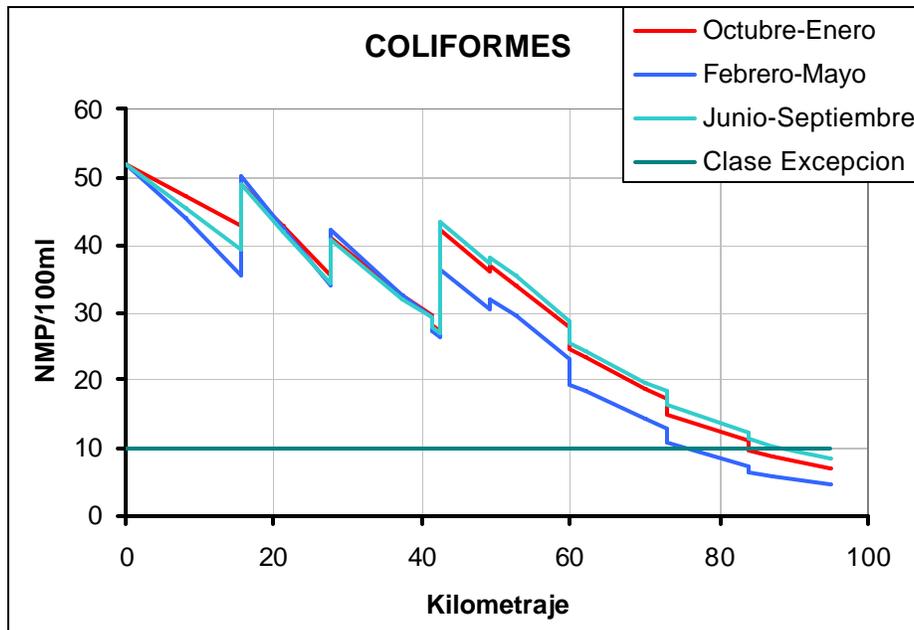


Figura 3.13
Coliformes Fecales para la Situación Futura
(Caso Descargas con Tratamiento)



4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En primera instancia se debe establecer que los resultados entregados por la modelación realizada en términos generales presentan una buena coherencia con lo esperado. Sin embargo, existen algunas discrepancias en ciertas estaciones, donde en general los valores para DBO se presentan subestimados, lo cual se explicaría por las simplificaciones del modelo, especialmente en lo referido a la resuspensión de los sedimentos (término que no fue considerado).

Otra deficiencia del modelo es la simplificación excesiva del sistema de flujo, ya que por una parte no se desarrolló un modelo de flujo representativo del tramo de río, adoptando que las condiciones de flujo en el tramo de río en estudio son conocidas y constantes dentro de los períodos definidos y se determinan a partir de curvas de descarga características de cada tramo de río. Por otra parte cabe señalar que los tramos de tiempo escogidos de caudales para evaluar el modelo debiese ser mensual y no cuatrimestral como se realizó.

En general, se puede establecer que debido a la poca información disponible no se procedió a realizar una validación del modelo, situación que hubiese aportado a una mayor confiabilidad del modelo.

En cuanto a los resultados entregados por el modelo se puede señalar que a futuro la calidad del río Mapocho mejorará sustancialmente para los tres parámetros analizados producto de la entrada en operación de las plantas de tratamiento proyectada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Comisión Nacional del Medio Ambiente, Instrucción para la Dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Aguas Marinas, 2003.
- Fuentealba, R. Memoria para Optar al de Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 1988.
- Oyarzún, L. Memoria para Optar al de Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 1981.
- Sancha, Ana María. Apuntes del Curso de Calidad de Aguas, Universidad de Chile, 2002.