

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

*Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua
para el caso de un río específico en Costa Rica.*

Informe de Trabajo de Graduación para Obtener
el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Elaborado por:
Hernán Villalobos Slon

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Agosto 2008

Villalobos Slon, Hernán

Calibración del modelo matemático QUAL2K para el análisis de calidad del agua para el caso de un río específico en Costa Rica.

Proyecto de Graduación – Licenciatura Ingeniería Civil – San José, Costa Rica.

147h, 29 ils, -32 ref

Resumen

Debido a la problemática ambiental que enfrenta el país en materia de calidad del agua y la necesidad de priorizar proyectos en materia de saneamiento ambiental, se formuló, junto con el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), el presente estudio cuyo objetivo general es: *“Calibrar un modelo matemático para la simulación de la autodepuración en ríos (QUAL2K) que se adapte a la realidad del país, de manera que sirva de herramienta para el análisis de calidad del agua y proyección de impactos en los ríos”*. Ésta investigación utiliza un modelo de calidad del agua (QUAL2K) y técnicas de análisis de simulación de Monte Carlo y dispersión y sensibilidad para calibrar dicho modelo, con el fin de adaptarlo a la realidad de la zona en estudio (Río Damas, Desamparados). Además, como metodología de calificación de cuerpos de agua, se utiliza el *“Índice Holandés de Clasificación para la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales”* establecido en el decreto N.33903 del MINAE, en donde se definen los criterios de usos de los cuerpos de agua superficial, y se establecen cinco categorías de uso potencial del agua y el tratamiento que esta requeriría.

Para el montaje del modelo y la obtención de los datos necesarios para la calibración, se realizaron dos campañas de medición, una en julio y otra en setiembre siguiendo la masa de agua a lo largo del río. Para la calibración del modelo, se utilizó la metodología de simulación de Monte Carlo, la cual disminuyó la incertidumbre del modelo, además el análisis de dispersión y sensibilidad facilitó la escogencia del modelo óptimo de forma objetiva, ya que por medio del coeficiente de determinación, se obtuvo un modelo calibrado que tiene un ajuste mayor al 90% con respecto a los datos observados.

En general, se consiguió formular un modelo que describe las fuentes que afectan en mayor medida el comportamiento del río, sin embargo, el sistema natural estudiado posee muchos factores que afectan su comportamiento, por lo tanto, se ve muy influenciado por la mayoría de las entradas que este tenga, sin importar el tamaño de estas. En la parte media y baja se generan conflictos uso-calidad, debido a que las concentraciones de diferentes determinantes de calidad de agua, superan los estándares definidos para distintos usos del agua como riego, recreación y abastecimiento. Sin embargo, el principal determinante que genera estos conflictos son los coliformes fecales, por lo que, se infiere que el principal problema de la cuenca es bacteriológico.

CALIBRACIÓN, MODELACIÓN, CALIDAD DE AGUA RÍOS, RIO DAMAS, SIMULACION MONTE-CARLO.

Ing Irene Campos, Msc
Escuela Ingeniería Civil

Dedicatoria

A Dios, por la fuerza y sabiduría que me da.
A mis padres y hermanos, por la guía y apoyo.
A Marce, mi novia, a quien debo esto y más.
A mis amigos, por el apoyo.

Agradecimientos

Al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados por la ayuda brindada y en especial a:

- La Dirección de Gestión Ambiental, Ing Carlos Vargas.
- El Laboratorio Nacional de Aguas, Dr Darner Mora.
- Departamentos de Hidrometría, Geog. Gerardo Ramírez.

Al Ing Carlos Vargas, por ayudarme de forma incansable con los trabajos de campo y la coordinación de la tesis.

Al equipo de trabajo de campo, por realizar el “trabajo sucio”, sin queja alguna.

A Marce, por hacer esto posible, por esforzarte al máximo para que saliera, pero sobre todo por la paciencia y ayuda incondicional.

A la Ing Irene Campos por asesorarme en los momentos oportunos y aceptar dirigir mi proyecto.

Al Ing. Freddy Bolaños, por las dosis de presión que me ayudaron a seguir adelante.

A Yen Wu Wu y Daniel Caviedes por ser verdaderos compañeros, guías y amigos durante la carrera.

A Danilo Jiménez por la ayuda en el proyecto y la paciencia ante las consultas.

Comité asesor

Ing. Irene Campos

Directora del proyecto

Ing. Carlos Vargas

Asesor del proyecto

Ing. Freddy Bolaños

Asesor del proyecto

ÍNDICE CONCEPTUAL

CAPITULO 1: Introducción.....	1
1.1 Aspectos generales.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.1 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.1 Alcances del Proyecto.....	4
1.1 Limitaciones del Proyecto.....	4
CAPITULO 2: Marco Teórico.....	6
2.1 Calidad de Agua en Ríos.....	6
2.1.1. Clasificación de Calidad de Agua en Ríos.....	8
2.1.2. Autodepuración.....	12
2.2 Modelo QUAL2K.....	12
2.3 Metodología de Calibración.....	18
2.3.1 Método Simulación de Monte Carlo	18
2.3.2 Metodología de Incertidumbre Generalizada.....	19
CAPITULO 3: Descripción del Área de Estudio.....	22
3.1 Ubicación.....	22
3.2 Red Fluvial.....	23
3.3 Topográfica.....	25
3.4 Uso del Suelo.....	25
3.5 Alcantarillado Sanitario.....	28
CAPITULO 4: Campañas de Medición.....	31
4.1 Metodología.....	31
4.1.1. Gira de reconocimiento.....	32
4.1.2. Gira de selección de los puntos.....	32

4.1.3. Campaña de Tiempos de Viaje.....	35
4.1.4. Campaña de Calibración.....	37
4.2 Resultados Campañas de Medición.....	38
4.2.1 Parámetros hidráulicos.....	38
4.2.1.1 Secciones Transversales.....	38
4.2.1.2 Pendientes de Fondo.....	39
4.2.2 Aforos.....	40
4.2.3 Análisis de Datos de Campo.....	42
4.2.3.1 pH.....	42
4.2.3.2 Temperatura.....	44
4.2.3.3 Conductividad.....	46
4.2.4 Análisis de Laboratorio.....	47
4.2.4.1 Oxígeno Disuelto.....	47
4.2.4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno, Total y Disuelta.....	49
4.2.4.3 Sólidos Totales.....	52
4.2.4.4 Demanda Química de Oxígeno, Total y Soluble.....	56
4.2.4.5 Nitrógeno.....	58
4.2.4.5.1 Nitrógeno Orgánico.....	59
4.2.4.5.2 Nitrógeno Amoniacal.....	60
4.2.4.5.3 Nitrógeno Total Kjeldahl.....	61
4.2.4.6 Nitratos.....	63
4.2.4.7 Fósforo.....	64
4.2.4.7.1 Fósforo Total.....	64
4.2.4.7.2 Fósforo Soluble Reactivo.....	65
4.2.4.8 Coliformes Fecales.....	67
4.2.4.9 Escherichia Coli.....	68
4.2.4.10 Alcalinidad.....	69
4.2.4.11 Dureza Total.....	70
4.2.4.12 Grasas y Aceites	72

CAPITULO 5: Modelación.....	73
5.1 Metodología.....	73
5.1.1. Formulación Numérica.....	73
5.1.2. Conceptualización.....	74
5.1.3. Condiciones de Frontera.....	74
5.1.4. Tramos.....	74
5.1.5. Fuentes.....	75
5.1.5.1 Fuentes Difusas.....	75
5.1.5.2 Fuentes Puntuales.....	76
5.2 Datos de Entrada.....	77
5.2.1 Indicadores Calidad del Agua.....	77
5.2.2 Información Hidráulica.....	78
5.2.3 Radiación Solar.....	79
5.2.4 Información Meteorológica.....	80
5.2.5 Constantes de Calidad del Agua.....	80
5.3 Variables Respuesta.....	81
5.3.1 Perfil de Temperatura.....	81
5.3.2 Reaireación.....	81
5.3.3 Parámetros de Calidad del Agua.....	83
CAPITULO 6: Calibración.....	84
6.1 Metodología.....	84
6.2 Datos de entrada.....	85
6.2.1 Datos observados.....	86
6.2.2 Parámetros.....	86
6.2.3 Datos simulados.....	87
6.3 Análisis de dispersión y sensibilidad.....	87
6.4 Análisis de resultados del modelo calibrado.....	93
6.4.1 Perfiles para el Sistema Holandés de Valoración.....	94
6.4.2 Perfiles complementarios.....	98
6.4.3 Otros perfiles modelados.....	101

CAPITULO 7: Conclusiones y Recomendaciones.....	104
7.1 Conclusiones.....	104
7.2 Recomendaciones.....	106
Bibliografía.....	108
ANEXOS.....	I
Anexo A: Procedimiento para la implementación del modelo QUAL2K.....	I
Anexo B: Tabulación de datos campañas de medición.....	XIII
Anexo C: Tabulación de datos modelados.....	XIX

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Físico-Química del Agua para cuerpos receptores.....	8
Tabla 2.2. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal.....	9
Tabla 2.3. Clasificación de los Cuerpos de Agua según el uso potencial, y tratamiento que requiera.....	10
Tabla 2.4. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de las aguas de cuerpos superficiales para las clases establecidas.....	11
Tabla 2.5. Variables estado del modelo.....	16
Tabla 3.1 Lugares que abarca la cuenca.....	23
Tabla 3.2 Parámetros de la cuenca.....	24
Tabla 3.3 Usos del suelo.....	27
Tabla 4.1. Sitios de monitoreo.....	34
Tabla 4.2 Distribución de cuadrillas de trabajo.....	36
Tabla 4.3 Pendientes longitudinales.....	40
Tabla 5.1. Coeficientes y exponentes de las curvas de descarga.....	79
Tabla 5.2. Coeficientes de reaireación.....	82
Tabla 6.1. Rango de variación de los parámetros.....	87
Tabla 6.2. Parámetros óptimos primera campaña.....	92
Tabla 6.3. Parámetros óptimos segunda campaña.....	92
Tabla A1. Aforos cauce principal.....	XIV
Tabla A2. Aforos afluentes.....	XIV
Tabla A3. Muestreos en el río campaña de medición 1.....	XV
Tabla A4. Muestreos en los afluentes campaña de medición 1.....	XVI
Tabla A5. Muestreos en el río campaña de medición 2.....	XVII
Tabla A6. Muestreos en los afluentes campaña de medición 2.....	XVIII
Tabla A7. Puntaje Sistema Holandés de Valoración.....	XX
Tabla A8. Resultados modelados Alk, SRP, Conductividad, NT.....	XXI
Tabla A9. Resultados modelados Coliformes.....	XXII
Tabla A10. Resultados modelados Temperatura, NO ₃ , pH, SST.....	XXIII
Tabla A11. Resultados modelados OD, ODs, DBO, NH ₄	XIX

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Resumen Esquemático del Marco Teórico.....	6
Figura 2.2. Ciclo del Nitrógeno.....	14
Figura 2.3. Ciclo del Fósforo.....	15
Figura 2.4. Balance de Flujo.....	15
Figura 2.5. Balance de masa.....	17
Figura 2.6. Cinética del modelo y proceso de transferencia de masa.....	17
Figura 2.7. Diagrama de flujo de calibración con el método de Monte-Carlo.....	19
Figura 3.1. Fotografía Aérea de la cuenca Río Damas.....	22
Figura 3.2. Red Fluvial cuenca Río Damas.....	24
Figura 3.3 Modelo de elevación digital.....	25
Figura 3.4 Usos del suelo.....	27
Figura 3.5 Cobertura actual del alcantarillado sanitario.....	28
Figura 3.6 Cobertura futura del alcantarillado sanitario.....	29
Figura 3.7 Tanques sépticos en la cuenca.....	30
Figura 4.1 Esquema Metodológico Mediciones de Campo.....	31
Figura 4.2 Esquema Pictórico Río Damas.....	33
Figura 4.3. Puntos de muestreo en la cuenca Río Damas.....	34
Figura 4.4. Puntos de Aforo.....	35
Figura 4.5 Estimación de Parámetros Hidráulicos.....	39
Figura 4.6 Molinetes usados.....	40
Figura 4.7 Transformaciones del Nitrógeno.....	58
Figura 5.1. Esquema del Modelo.....	76
Figura A1: Procedimiento para la implementación del modelo QUAL2K.....	IV
Figura A2: Fuentes QUAL2K.....	XI
Figura A3: División en tramos en modelo QUAL2K.....	XI
Figura A4: Constantes de calidad del agua modelo QUAL2K.....	XI
Figura A5: Información meteorológica modelo QUAL2K.....	XII
Figura A6: Rangos parámetros de calibración.....	XII
Figura A7: Gráficos de dispersión y sensibilidad.....	XII

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráficos 4.1 a 4.4. Secciones transversales (Dimensiones de los ejes en metros).....	39
• Gráfico 4.1. Damas 1: Guatuso.....	39
• Gráfico 4.2. Damas 2: Patarrá.....	39
• Gráfico 4.3. Damas 4: San Antonio.....	39
• Gráfico 4.4. Damas 5: Desamparados.....	39
Gráfico 4.5 Caudal campañas tiempos de viaje.....	41
Gráfico 4.6 Caudal campañas de calibración.....	41
Gráfico 4.7 Caudal de los afluentes.....	42
Gráfico 4.8 Perfil Longitudinal de pH.....	43
Gráfico 4.9 Aporte de los afluentes, pH.....	42
Gráfico 4.10 Perfil Longitudinal, Temperatura.....	44
Gráfico 4.11 Temperatura de los afluentes.....	45
Gráfico 4.12 Temperatura ambiente cauce principal.....	45
Gráfico 4.13 Temperatura ambiente afluentes.....	46
Gráfico 4.14 Perfil Longitudinal, Conductividad.....	46
Gráfico 4.15 Aporte de los afluentes, Conductividad.....	47
Gráfico 4.16 Perfil Longitudinal, Oxígeno Disuelto.....	48
Gráfico 4.17 Aporte de los afluentes, Oxígeno Disuelto.....	49
Gráfico 4.18 Perfil Longitudinal, Demanda Bioquímica de Oxígeno Total.....	50
Gráfico 4.19 Aporte de los afluentes, Demanda Bioquímica de Oxígeno Total.....	51
Gráfico 4.20 Perfil Longitudinal, Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble.....	51
Gráfico 4.21 Aporte de los afluentes, Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble.....	52
Gráfico 4.22 Perfil Longitudinal, Sólidos Totales.....	53
Gráfico 4.23 Perfil Longitudinal, Sólidos Suspendidos Totales.....	54
Gráfico 4.24 Aporte de los afluentes, Sólidos Suspendidos Totales.....	54
Gráfico 4.25 Perfil Longitudinal, Sólidos Disueltos Totales.....	55
Gráfico 4.26 Aporte de los afluentes, Sólidos Disueltos Totales.....	55
Gráfico 4.27 Perfil Longitudinal, Demanda Química de Oxígeno Total.....	56
Gráfico 4.28 Aporte de los afluentes, Demanda Química de Oxígeno Total.....	57
Gráfico 4.29 Perfil Longitudinal, Demanda Química de Oxígeno Soluble.....	57
Gráfico 4.30 Aporte de los afluentes, Demanda Química de Oxígeno Soluble.....	58
Gráfico 4.31 Perfil Longitudinal, Nitrógeno Orgánico.....	59
Gráfico 4.32 Aporte de los afluentes, Nitrógeno Orgánico.....	60
Gráfico 4.33 Perfil Longitudinal, Nitrógeno Amoniacal.....	61
Gráfico 4.34 Aporte de los afluentes, Nitrógeno Amoniacal.....	61
Gráfico 4.35 Perfil Longitudinal, Nitrógeno Total Kjeldahl.....	62

Gráfico 4.36 Aporte de los afluentes, Nitrógeno Total Kjeldahl.....	52
Gráfico 4.37 Perfil Longitudinal, Nitratos.....	63
Gráfico 4.38 Aporte de los afluentes, Nitratos.....	63
Gráfico 4.39 Perfil Longitudinal, Fósforo Total.....	64
Gráfico 4.40 Aporte de los afluentes, Fósforo Total.....	65
Gráfico 4.41 Perfil Longitudinal, Fósforo Soluble.....	66
Gráfico 4.42 Aporte de los afluentes, Fósforo Soluble.....	66
Gráfico 4.43 Perfil Longitudinal, Coliformes Fecales.....	67
Gráfico 4.44 Aporte de los afluentes, Coliformes Fecales.....	68
Gráfico 4.45 Perfil Longitudinal, E. Coli.....	68
Gráfico 4.46 Aporte de los afluentes, E. Coli.....	69
Gráfico 4.47 Perfil Longitudinal, Alcalinidad.....	70
Gráfico 4.48 Aporte de los afluentes, Alcalinidad.....	70
Gráfico 4.49 Perfil Longitudinal, Dureza Total.....	71
Gráfico 4.50 Aporte de los afluentes, Dureza Total.....	71
Gráfico 4.51 Perfil Longitudinal, Grasas y Aceites.....	72
Gráfico 4.52 Aporte de los afluentes, Grasas y Aceites.....	72
Gráfico 6.1. Diagramas de dispersión primera campaña.....	88
Gráfico 6.2. Diagramas de dispersión segunda campaña.....	89
Gráfico 6.3. Gráficos de sensibilidad paramétrica primera campaña.....	90
Gráfico 6.4. Gráficos de sensibilidad paramétrica segunda campaña.....	91
Gráfico 6.5. Perfiles oxígeno disuelto.....	94
Gráfico 6.6. Perfil PSO.....	95
Gráfico 6.7. Perfiles DBO.....	95
Gráfico 6.8. Perfil déficit oxígeno disuelto.....	96
Gráfico 6.9. Perfiles NH ₄	96
Gráfico 6.10. Perfil calidad del agua primera campaña según SHV.....	97
Gráfico 6.11. Perfil calidad del agua segunda campaña según SHV.....	98
Gráfico 6.12. Perfil sólidos suspendidos totales.....	98
Gráfico 6.13. Perfil nitratos.....	99
Gráfico 6.14. Perfil coliformes fecales.....	100
Gráfico 6.15. Perfil pH.....	100
Gráfico 6.16. Perfil temperatura.....	101
Gráfico 6.17. Perfil conductividad.....	102
Gráfico 6.18. Perfil alcalinidad.....	102
Gráfico 6.19. Perfil fósforo soluble reactivo.....	103
Gráfico 6.20. Perfil nitrógeno total.....	103

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Aspectos generales

Los ríos están expuestos a recibir descargas y vertidos que afectan día a día la salud pública. En Costa Rica, la cobertura con alcantarillado sanitario a nivel urbano es solo del 34% y solo 4% de las aguas residuales recolectadas reciben tratamiento (OPS/OMS, 2002) que reduzca el impacto ambiental que generan estas descargas a los cauces naturales. Esta situación afecta en gran medida el uso que se le puede dar al recurso hídrico.

Debido a la problemática ambiental que enfrenta el país en materia de calidad del agua, es necesaria y obligatoria la priorización de proyectos de saneamiento ambiental, para los cuales un instrumento útil son los modelos de transporte y calidad del agua.

Con el fin de brindarle solución a este problema, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ha formulado estudios en la cuenca del Río Grande de Tárcoles, modelando la calidad del agua del mismo. Este programa de saneamiento ambiental incluye realizar estudios en las cuencas altas de la zona en estudio.

Para abordar esta problemática, se escogió como zona de estudio la cuenca del Río Damas en Desamparados, que se encuentra en una de las zonas de mayor densidad de población del país, lo que ha afectado directamente la calidad del río. Este río, a pesar de contar con solamente doce kilómetros de longitud, varía en gran medida las condiciones de calidad del agua, ya que conforme atraviesa lugares poblados, aumentan los conflictos de uso y calidad del agua. Lo anterior, porque en la parte alta de la cuenca el río presenta condiciones óptimas para el consumo humano, pero en la desembocadura, en el Río Tiribí, las condiciones ambientales decaen generando limitaciones en los niveles de utilización del recurso y afecta la salud pública.

Con respecto al análisis de la calidad del agua existen herramientas, entre ellas, los modelos informáticos tales como el *River and Stream Water Quality Model* (QUAL2K), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Este modelo, ayuda a describir los procesos de autodepuración presentes en los ríos tomando en cuenta las condiciones hidráulicas y ambientales.

El objetivo primordial de los modelos de análisis ambiental es convertirse en una herramienta útil que permita realizar una estimación correcta de las variables ambientales y una identificación

eficiente de los factores que generan estos impactos. De tal manera, se puede tener un mejor conocimiento de los problemas presentes y de las posibles soluciones a los mismos.

En un país donde la calidad del agua ha decaído significativamente en los últimos años, se vuelve cada vez más necesaria la utilización de herramientas que brinden análisis certeros y precisos de los problemas ambientales. Es por esto, que calibrar un modelo matemático de la calidad del agua de un río es una manera útil de planear e identificar opciones técnicas probables de tratamiento del agua.

Además, los modelos deben describir de manera precisa los procesos físicos de transporte y transformación bioquímica de los contaminantes en la corriente, bajo diferentes condiciones hidrológicas, hidráulicas y fisicoquímicas de los vertidos de aguas residuales, por lo que para poder lograrlo, debe calibrarse y verificarse con los datos de campo.

El interés de este proyecto, es brindar un instrumento útil, de tal forma que los análisis realizados con este modelo, describan de la mejor manera los procesos que en realidad ocurren en el Río Damas.

1.2 Antecedentes

Se establecen dos tipos de antecedentes al realizar esta investigación, los antecedentes relacionados con el modelo de calidad del agua y los relacionados con la zona de estudio.

El análisis de la calidad de agua en los ríos se ha estudiado años atrás y ha llevado a la formulación de diversos modelos que permitan describir los procesos de autodepuración de estos cuerpos de agua. El modelo ha analizado, es el resultado de un desarrollo histórico de modelos de fósforo, oxígeno y nitrógeno, que dieron paso a extensiones con una complejidad creciente y un análisis más profundo de los procesos involucrados. En un inicio, se tomó como punto inicial el modelo basado en la descripción del aumento y la disminución en el déficit de oxígeno, aguas arriba y aguas abajo de una fuente de material orgánico, conocido como el modelo de Streeter-Phelps.

Más tarde, el modelo fue ampliado a los procesos de nitrógeno que incluyeron sobre todo nitrificación, que se convertiría en QUAL1. Luego se añadieron los ciclos del fósforo y algas en la creación del modelo QUAL2 y de este último modelo, existen varias versiones. Sin embargo, el QUAL2K reúne las mejores características de las versiones disponibles de QUAL2 sobre las cuales fueron añadidas las opciones de análisis de incertidumbre. (EPA, 2007)

El modelo QUAL, en sus diversas versiones, ha sido ampliamente probado, calibrado y usado en casi todos los continentes. Entre los países de América que se han realizado calibraciones al modelo, se pueden citar Estados Unidos, Chile y Colombia. También se ha calibrado para Europa (Italia, España y Eslovenia), Asia (Taiwán e India) y África (Gana y Sudáfrica). (EPA, 2007)

Además, como parte del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, que está siendo llevado a cabo por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, se contrató al ingeniero consultor Luis Alejandro Camacho, quien realizó una modelación de la calidad del agua del Río Grande de Tárcoles con el programa QUAL2K en el segundo semestre del 2003. Debido a que el Río Damas pertenece a la cuenca del Río Grande de Tárcoles, ciertas consideraciones tomadas en el proyecto realizado en el Río Grande de Tárcoles son aplicables al presente proyecto. Sin embargo, es importante recalcar, que la modelación del Río Grande de Tárcoles toma en cuenta un sistema natural con características distintas al del Río Damas.

Por otro lado, también se tomó como referencia otros proyectos realizados en ríos de condiciones similares, como los son la “*Modelación de la Calidad del Agua en Ríos de Montaña-Quebrada Lejía*” de Arenas (2003) y la “*Obtención de la Constante de Reaireación y Modelación de la Calidad del Agua de Río de Montaña Colombiano*” de Valendia (2005). Estos fueron de gran utilidad para la estimación de constantes necesarias para la modelación.

En la cuenca del Río Damas se han realizado distintas investigaciones, las cuales si bien no se han enfocado de la misma manera que lo realiza este estudio, sí han sido importantes en la medida que ha ayudado a entender la problemática ambiental y han definidos los impactos ambientales que sufre la cuenca. Estas investigaciones, son principalmente análisis puntuales de la calidad del agua en distintos puntos del río, los cuales son “fotografías” de la situación ambiental del momento específico y no toman en cuenta la capacidad de autodepuración del río, ni analizan los procesos que se dan de manera conjunta es por eso que es de gran importancia que al analizar las condiciones ambientales también se tomen en cuenta los diferentes procesos que se dan en los ríos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Calibrar un modelo matemático para la simulación de la autodepuración en ríos (QUAL2K) que se adapte a la realidad del país, de manera que sirva de herramienta para el análisis de calidad del agua y proyección de impactos en los ríos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Organizar campañas de medición, teniendo en cuenta tiempos de viaje y dispersión de solutos, para obtener datos de campo que ayuden a la calibración del modelo.
- Formular un modelo del sistema natural estudiado, con parámetros necesarios para utilizar la herramienta QUAL2K.
- Analizar el sistema natural de autodepuración del río por medio de la herramienta QUAL2K.
- Evaluar la eficiencia del modelo, por medio de análisis de dispersión y sensibilidad paramétrica, que permitan comparar los resultados reales con los que resulten de la modelación.

1.4 Alcances del Proyecto

- El modelo calibrado servirá exclusivamente para la zona de estudio seleccionada (Río Damas), ya que los parámetros calibrados, varían para cada sistema natural estudiado. Por lo tanto, se circunscribirá a las características hidrológicas, climáticas, hidráulicas presentes.
- El análisis de tránsito de contaminantes en el río será unidimensional; por lo tanto, parte del principio de que las corrientes son bien mezcladas vertical y lateralmente.

1.5 Limitaciones del Proyecto

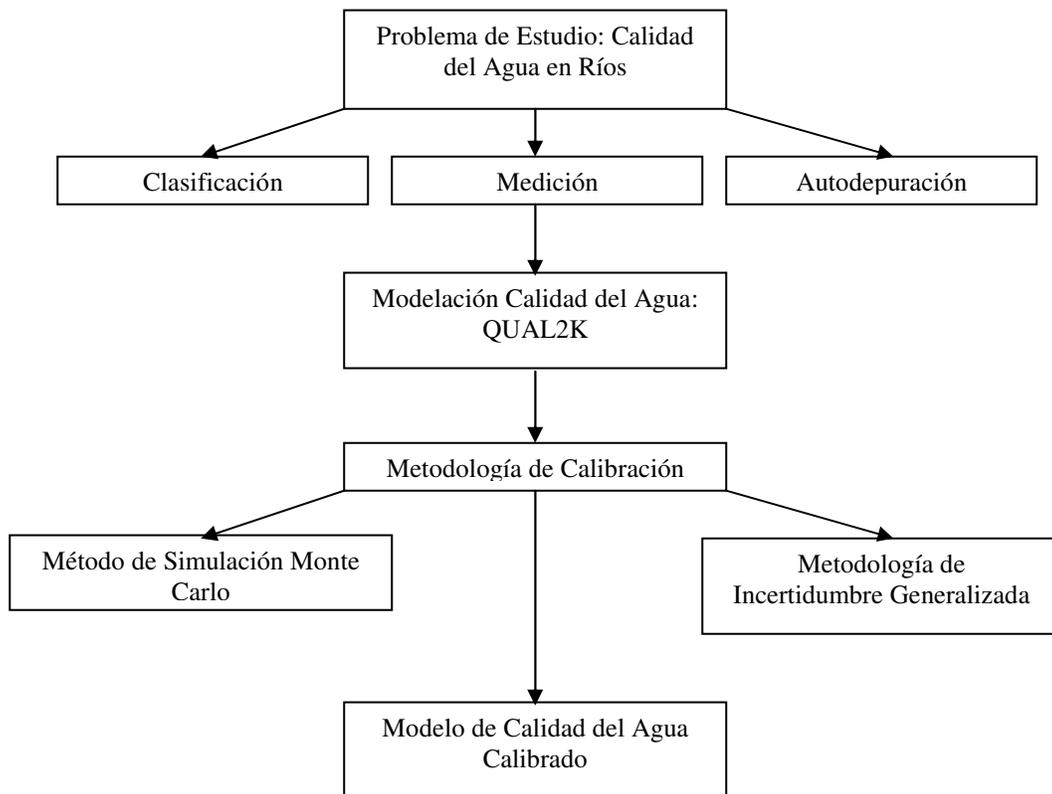
- No se realizaron experimentos con trazadores, por lo que los valores necesarios para la utilización del modelo de tiempos de viaje fueron estimados con base en las campañas respectivas por medio de aforos.

- No se realizaron las campañas de medición en la época crítica del río (época seca), si no aprovechando días soleados para realizar las campañas de medición, durante la época lluviosa.
- Los perfiles de las secciones transversales del río y la pendiente longitudinal se obtuvieron en campo, ya que no se contaba con estaciones limnográficas.
- No se realizaron análisis de escenarios en otras épocas del año, ya que no se cuenta información de la variación temporal de las cargas contaminantes.
- Se contó con dos campañas de medición tanto para la estimación de los tiempos de viaje como para la calibración del modelo, esto por condiciones de logística y tiempo.
- No se realizaron estudios sobre la caracterización de las descargas de las viviendas marginales en su variación temporal y espacial, y tampoco su aporte de contaminantes.

CAPITULO 2: Marco Teórico

El marco teórico se compone de cuatro secciones, las cuales describen la base sobre la cuál se desarrolla este proyecto. El siguiente esquema representa a nivel general la manera en que se desenvuelve el capítulo 2, seguidamente se detalla cada una de las secciones.

Figura 2.1. Resumen esquemático del Marco Teórico.



2.1 Calidad de Agua en Ríos

El análisis de la calidad de agua en ríos es un tema que se ha tratado de diversas maneras y a la cual se le ha buscado una solución de análisis por medio de modelos que representen el comportamiento de los contaminantes dentro del cuerpo de agua y describan de esta manera los procesos de autodepuración del río, que incluyan los ciclos naturales y el transporte de contaminantes en los ríos.

La calidad del agua de un río es el resultado de un conjunto de factores, ya que tanto el régimen hidrológico de la cuenca hidrográfica como las características hidráulicas del sistema fluvial influyen en su composición. Adicionalmente, en la sociedad moderna, esta calidad 'natural' se ve muchas veces drásticamente alterada debido al ingreso de contaminantes de origen antropogénico, provenientes desde fuentes puntuales y difusas.

El deterioro de la calidad del agua, es un grave problema ambiental, económico y social. Cada segundo, la industria, las ciudades, las zonas agrícolas, vierten grandes cantidades de residuos a los ríos y a las costas.

La contaminación del agua es cuando se da una modificación, natural o artificial, que directa o indirectamente cambia la calidad del agua y perturba o destruye los recursos naturales. Puede causar riesgos sanitarios, reducir el bienestar del hombre y de las comunidades acuáticas y perjudicar el mejor uso del agua actual o potencial. La contaminación puede afectar seriamente los cursos de agua alterando completamente sus características.

Los factores contaminantes son diversos y pueden agruparse de la siguiente forma (Castillo, 1999):

1. Sustancias orgánicas biodegradables: organismos en descomposición, heces humanas y de animales.
2. Sustancias orgánicas tóxicas: son producidas por el hombre, y en general no son biodegradables. Ej. hidrocarburos.
3. Sustancias inorgánicas tóxicas: originadas por la industria y la minería. Ej. metales pesados.
4. Sólidos en suspensión: sedimentos que llegan por escorrentía provenientes de la construcción, industria o dragado.
5. Agentes patógenos: desechos vertidos que pueden generar enfermedades o daños a los entes biológicos relacionados con el río.
6. Térmicos: vertido de agua a temperaturas superiores a las del cuerpo de agua receptor.

Las vías por las cuales estos factores pueden llegar al agua son: a través de la atmósfera, por precipitación, por entrada de cursos de agua tributarios, por aguas subterráneas o por liberación directa del hombre al cuerpo de agua.

2.1.1. Clasificación de Calidad de Agua en Ríos

Debido a que gran cantidad de cuerpos de agua superficial sufren graves problemas de contaminación y que, por lo tanto, puede perjudicar la salud de las comunidades vecinas, se decretó por el Poder Ejecutivo el Decreto N. 33903-MINAE-S “*Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales*”, en donde, entre otras cosas, definieron los criterios de usos de los cuerpos de agua superficial, y se establecieron cinco categorías de uso potencial del agua y el tratamiento que esta requeriría.

Para realizar la clasificación se establecieron parámetros físico-químicos y biológicos basándose en el Índice Holandés de Valoración de la Calidad para los cuerpos de agua superficiales.

El Índice Holandés de Clasificación para la Calidad del Agua, valora las variables de mayor importancia en una corriente de agua, como son la Demanda Bioquímica de Oxígeno, el Nitrógeno Amoniacal y el Oxígeno Disuelto convertido en Porcentaje de Saturación de Oxígeno (PSO), en un código de colores que se le asigna a cada clase de agua. Este índice permite clasificar un tramo particular del río en una clase específica. La clasificación obtenida en época lluviosa, no corresponderá con la observada durante el estiaje. Para realizar la clasificación se suman puntos dependiendo del nivel obtenido en cada una de las variables de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Asignación de puntajes según el Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Físico-Química del Agua para cuerpos receptores.

PUNTOS	PSO (%)	DBO (mg/L)	N-NH ₄ (mg/L)*
1	91 - 110	<= 3	< 0.50
2	71 - 90	3.1 – 6.0	0.50 – 1.0
	111 - 120		
3	51 - 70	6.1 – 9.0	1.1 – 2.0
	121 - 130		
4	31 - 50	9.1 – 15	2.1 – 5.0
5	<= 30 y > 130	> 15	> 5.0

* Nitrógeno amoniacal

Fuente: La Gaceta, 17 setiembre 2007.

El puntaje obtenido se traduce a un código de colores con el que se clasifica la calidad del agua de acuerdo al grado de contaminación que esta contiene.

Tabla 2.2. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal.

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Sumatoria de Puntos	3	4-6	7-9	10-12	13-15
Código de Color	Azul	Verde	Amarillo	Anaranjado	Rojo
Interpretación de Calidad	Sin Contaminación	Contaminación incipiente	Contaminación moderada	Contaminación severa	Contaminación muy severa

Fuente: La Gaceta, 17 setiembre 2007.

Para cada clase (desde la 1 a la 5) y su asignación correspondiente de color, queda definido el estado de calidad del agua desde no contaminada hasta aquella totalmente contaminada, los usos potenciales para cada una de las clases se pueden observar en la siguiente tabla.

Por otro lado, el decreto especifica en el Artículo 8, Capítulo 3 que: *“Para cualquier otro uso no especificado en el cuadro o en casos particulares que sean debidamente justificados por el interesado, el Ministerio de Ambiente y Energía podrá definir los usos apropiados a una calidad específica, en tanto se haga la consulta al Comité Técnico de Revisión...”*.

De manera complementaria se pueden analizar más parámetros como los que se pueden observar en la Tabla 2.4: para ésto el decreto establece en el Artículo 5, Capítulo 2 que: *“...se deberán analizar en aquellos casos en que el Ministerio de Ambiente y Energía o el Ministerio de Salud lo consideren necesario en resguardo del medio ambiente y/o la salud humana”*.

Tabla 2.3. Clasificación de los Cuerpos de Agua según el uso potencial, y tratamiento que requiera.

Usos	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Abastecimiento de agua para uso y consumo humano	Con tratamiento simple con desinfección	Con tratamiento convencional	Con tratamiento avanzado	No utilizable	No utilizable
Abastecimiento de agua para actividades industriales destinadas a la producción de algunos alimentos de consumo humano	Sin tratamiento previo o con tratamiento simple de desinfección	Con tratamiento convencional	Con tratamiento avanzado	No utilizable	No utilizable
Abastecimiento de agua para abrevadero y actividades pecuarias	Sin limitaciones	Sin limitaciones	Sin limitaciones	Con limitaciones	No utilizable
Actividades recreativas de contacto primario	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Acuicultura	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Fuente para la protección de las comunidades acuáticas	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Generación Hidroeléctrica	Utilizable	Utilizable	Utilizable	Utilizable con limitaciones	Utilizable con limitaciones
Navegación	No utilizable	Utilizable	Utilizable	Utilizable	Utilizable
Riego de especies arbóreas cereales y plantas forrajeras	Utilizable	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable
Riego de plantas sin limitación, irrigación de hortalizas que se consumen crudas o de frutas que son ingeridas sin eliminación de cáscara.	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable

Fuente: La Gaceta, 17 setiembre 2007.

Tabla 2.4. Parámetros complementarios para la determinación de la calidad de las aguas de cuerpos superficiales para las clases establecidas.

Parámetros Complementarios (Unidades)	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Temperatura *	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Potencial de hidrógeno (pH)*	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,0 a 9,0	5,5 a 9,5	5,5 a 9,5
Nitratos, NO ₃ (mg N/L)*	<5	5 a <10	10 a <15	15 a <20	>20
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)*	<20	20 a <25	25 a <50	50 a <100	100 a 300
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)*	<10	10 a 25	25 a 100	100 a 300	>300
Sólidos Disueltos (mg/L)*	<250	250 a <500	500 a 1000	>1000	>1000
Grasas y Aceites (mg/L)*	ND	ND	ND	ND	15 a 25
Cloruros (como Cl) (mg/L)	<100	10 a 200	NA	NA	NA
Turbiedad (UNT)	<25	25 a <100	100 a 300	(1)	(1)
Fluoruros (como F) (mg/L)	<1,0	1 a 1,5	NA	NA	NA
Color (Pt-Co)	2,5 a 10	10 a 100	(1)	(1)	(1)
Sustancias activas al azul metileno (mg/L)	ND	ND	ND a 1	1 a 2	2 a 5
Arsénico (mg/L)	<0,01	<0,01	0,01 a 0,05	>0,05	>0,05
Boro (mg/L)	0,1	0,2	0,5	1	1
Cadmio (mg/L)	<0,005	0,005	0,01	0,02	0,02
Cianuro (mg/L)	<0,1	0,1 a <0,2	0,2	>0,02	>0,2
Cobre (mg/L)	<0,5	0,5 a <1	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5
Cromo Total (mg/L)	<0,05	0,05	0,2	0,5	>0,5
Magnesio mg MgCO ₃ /L	<30	30 a 50	>50	>50	>50
Mercurio (mg/L)	<0,001	0,001	0,002	0,004	0,005
Niquel (mg/L)	<0,05	0,05	0,1	0,2	0,3
Plomo (mg/L)	<0,03	0,03 a <0,05	0,05 a <0,10	0,1 a <0,20	0,2
Selenio (mg/L)	<0,005	0,005 a <0,010	0,010 a <0,020	0,020 a <0,050	0,05
Sulfatos (SO ₄) ⁻² (mg/L)	<150	150 a 250	>250	>250	>250
Parámetros Orgánicos					
Sumatoria de los compuestos Organoclorados (mg/L)	ND	ND	ND	0,01	0,01
Sumatoria de los Compuestos Organofosforados (mg/L)	ND	ND	ND	0,01	0,01
Micro Biológicos					
Coliformes fecales (NMP/100ml)*	<20	20 a 1000	1000 a 2000	2000 a 5000	>5000

* Parámetros analizados en el proyecto

ND: No detectable por el método utilizado.

NA: No aplicable

(1) Natural o que no afecte el uso indicado

Fuente: La Gaceta, 17 setiembre 2007.

2.1.2. Autodepuración

La autodepuración es el proceso de recuperación de un curso de agua después de un episodio de contaminación tanto orgánica como inorgánica. En este proceso, los compuestos orgánicos son diluidos y transformados progresivamente por la descomposición bioquímica, aumentando su estabilidad. Cada etapa se caracteriza por su distinta composición física y química (Ramirez, 2005).

Los contaminantes que ingresan a los ríos son tratados ya sea por medios físicos o por medios bioquímicos. Entre los mecanismos físicos utilizados, se puede citar el hecho de que los productos flotantes quedan retenidos por las plantas y en las orillas, de esta manera, poco a poco el agua va quedando libre de estos elementos y también los elementos pesados van quedando depositados en el fondo, por lo que el agua queda libre de partículas sedimentables. Sin embargo, uno de los procesos físicos de mayor importancia es la reaireación que se da por saltos y caídas de agua a lo largo del río, ya que estos oxigenan de gran manera. Aparte de los procesos físicos los ríos emplean mecanismos bioquímicos para liberarse de los contaminantes, como son la neutralización de los ácidos y las bases provenientes de los vertidos. Además, un proceso de gran importancia es en el que los microorganismos existentes en el agua o que se encuentran presentes en los vertidos, como bacterias, algas, hongos, insectos, entre otros, utilizan la materia orgánica existente en las aguas metabolizándola y transformándola. (Arenas, 2004)

Los elementos que se encuentran en los vertidos son principalmente: carbono, fósforo y nitrógeno. Estos elementos a la vez forman parte de los microorganismos, por lo que las principales transformaciones que sufren se resumen en ciclos: del carbono, nitrógeno y fósforo, siendo estos de gran importancia en la autodepuración.

Para representar los procesos físicos y químicos que dan lugar a la autodepuración de los ríos se han planteado diversos modelos que conjugan diversos procesos dentro de los cuales se encuentran inmersos los ciclos antes citados, tal como el Modelo Qual2K.

2.2 Modelo QUAL2K

El modelo QUAL2K fue desarrollado por Steven Chapra en el año 2001 como continuación y modificación de los diversos modelos QUAL que se habían desarrollado desde la década de los 80's por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Este modelo considera los procesos de

oxigenación presentes en los ríos, además de los ciclos de nitrógeno (sobre todo la nitrificación) e incluye ciclos de fósforo y algas. Por lo tanto, el QUAL2K es más completo que los modelos anteriores, ya que considera más componentes.

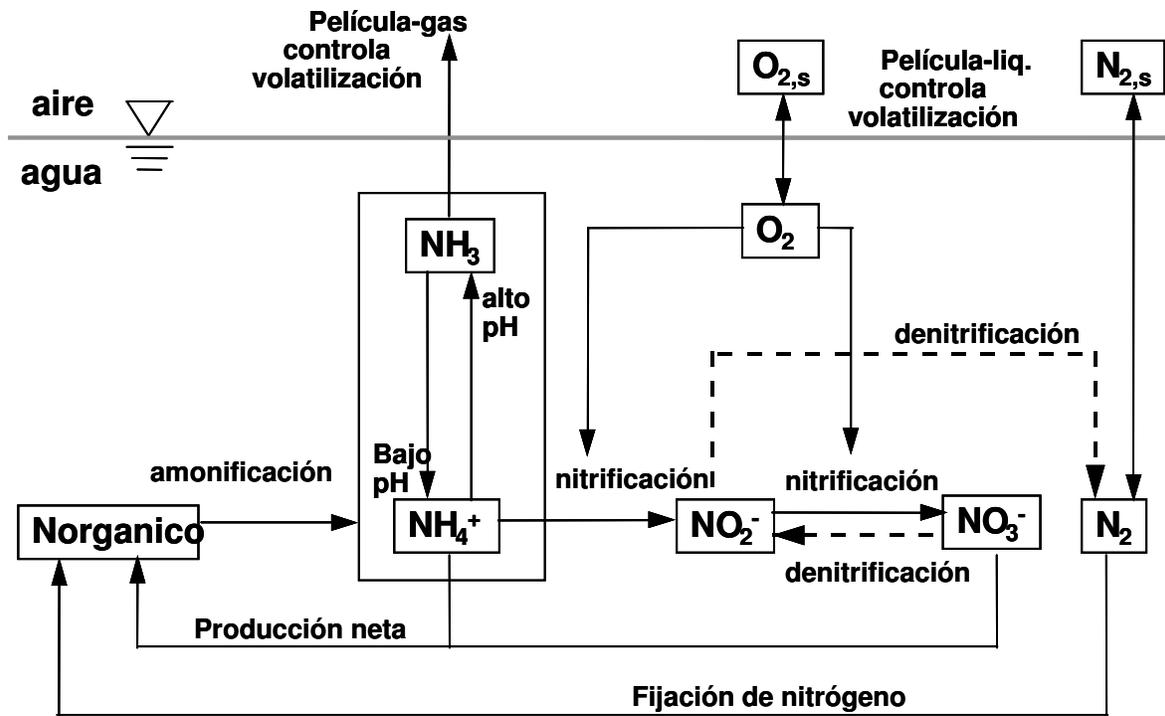
Algunas de las características principales del QUAL2K (EPA, 2007) son:

- El modelo opera en Excel, lo cual facilita la captura de datos, así como la generación y presentación de resultados y, además, no hay limitaciones en la especificación del número de tramos que se pueden modelar.
- El modelo realiza un análisis unidimensional, lo que indica que considera que se realiza una buena mezcla tanto lateral como verticalmente. La problemática que representa tener un modelo unidimensional se compensa con el hecho de que se le pueden incorporar los aportes laterales que ingresan al río producto de los efluentes o de ríos tributarios.
- Para cada elemento de cálculo se describe un equilibrio hidrológico en términos del flujo, un equilibrio de calor en términos de la temperatura, y un balance material en términos de la concentración.
- Permite calcular en forma explícita las interacciones entre el agua y los sedimentos que determinan la calidad de agua.
- Entre los procesos que considera el modelo se pueden citar: interacciones entre el sedimento y el agua, algas inferiores, extinción de luz, pH y patógenos.
- Entre las características hidráulicas necesarias se encuentran profundidad y velocidad.
- El tiempo del recorrido es calculado en función del volumen y del flujo de este tramo.
- Utiliza reacciones bioquímicas como fotosíntesis o respiración, generación y consumo de oxígeno.
- Calcula las interacciones principales entre aproximadamente 15 variables de estado.

Además, el modelo QUAL2K toma en cuenta ciertos elementos y procesos que se dan en los ríos, de los que se puede citar:

- *Temperatura*: todas las reacciones entre todas las variables del estado son dependientes de la temperatura y usando una formulación del tipo de Streeter-Phelps. El modelo calcula un factor de la corrección para todos los coeficientes. La temperatura del agua es calculada automáticamente por el modelo. En cada tramo se realiza un equilibrio de calor completo entre la radiación entrante total de onda corta, la radiación atmosférica entrante total, la radiación de la superficie del agua, la pérdida de calor por la evaporación y la pérdida de calor por la conducción a la atmósfera.
- *Ciclo del nitrógeno*: se encuentran presentes el nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito, y nitrato. La fijación y la mineralización del nitrógeno orgánico, la nitrificación que se divide en la oxidación del amoníaco en nitrito y la oxidación del nitrito en el nitrato, la regeneración del sedimento y de la respiración algal, son algunos de los factores que considera el equilibrio del nitrógeno. Además se pueden corregir las tasas de reacción de nitrificación.

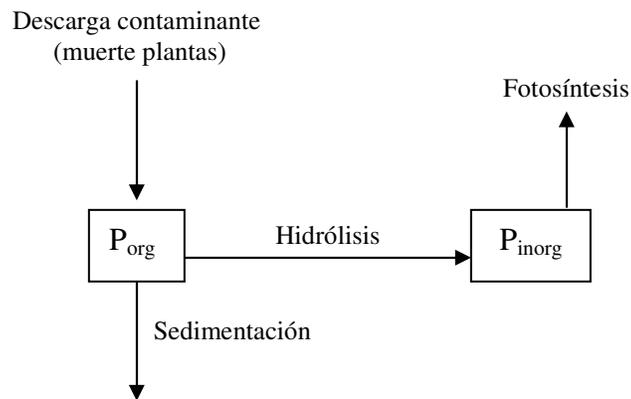
Figura 2.2. Ciclo del Nitrógeno.



Fuente: Chapra, 1997

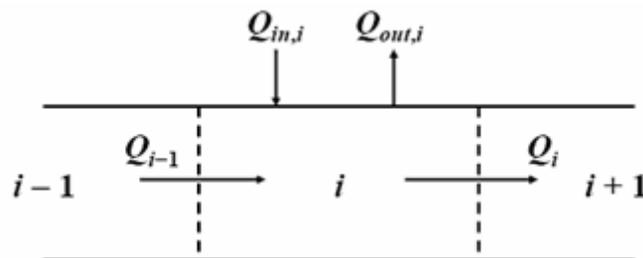
- *Ciclo del fósforo*: considera solamente dos procesos en su equilibrio: la mineralización y la fijación del fósforo orgánico en el fósforo inorgánico, la regeneración del sedimento y la respiración de las algas.

Figura 2.3. Ciclo del Fósforo



El modelo establece un balance de flujo para cada tramo como se muestra en la siguiente figura:

Figura 2.4. Balance de Flujo.



Fuente: EPA, 2007

Por otro lado, el modelo tiene las siguientes variables de estado:

Tabla 2.5. Variables estado del modelo.

Variable	Símbolo	Unidades
Conductividad	s	μmhos
Sólidos suspendidos inorgánicos	m_i	mgD/L
Oxígeno disuelto	o	mgO_2/L
Carbono de descomposición lenta	c_s	mgO_2/L
Carbono de descomposición rápida	c_f	mgO_2/L
Nitrógeno orgánico	n_o	$\mu\text{gN/L}$
Amoníaco	n_a	$\mu\text{gN/L}$
Nitrato	n_n	$\mu\text{gN/L}$
Fósforo Orgánico	p_o	$\mu\text{gP/L}$
Fósforo Inorgánico	p_i	$\mu\text{gP/L}$
Fitoplancton	a_p	$\mu\text{gA/L}$
Detritos	m_o	mgD/L
Patógeno	X	$\text{cfu}/100 \text{ mL}$
Alcalinidad	Alk	mgCaCO_3/L
Carbono inorgánico total	c_T	mole/L
Biomasa de algas inferiores	a_b	mgA/m^2
Nitrógeno de algas inferiores	IN_b	mgN/m^2
Fósforo de algas inferiores	IP_b	mgP/m^2

Fuente: EPA, 2007.

Se plantea un balance de masa para cada una de las variables de estado, como se muestra a continuación:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (2.1)$$

Donde:

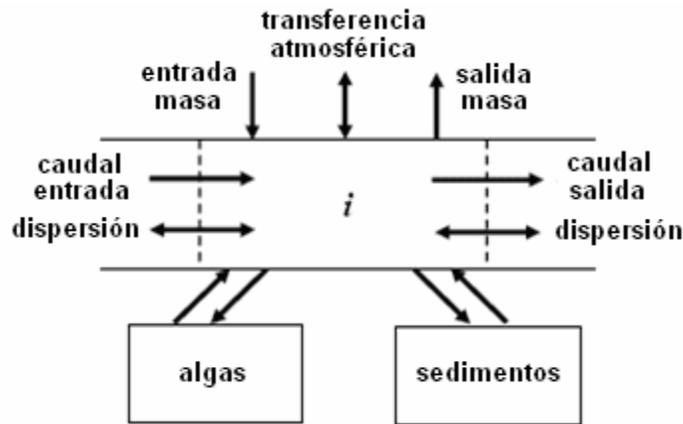
W_i = aporte externo del elemento constituyente i [g/d o mg/d], y

S_i = fuentes del constituyente debido a las reacciones y a los mecanismos de transferencia de masa [$\text{g}/\text{m}^3/\text{d}$ o $\text{mg}/\text{m}^3/\text{d}$].

E'_i = coeficiente de dispersión entre elementos i e $i + 1$ [m^3/d].

El balance de masas puede ser expresado como se muestra en la figura 2.5.:

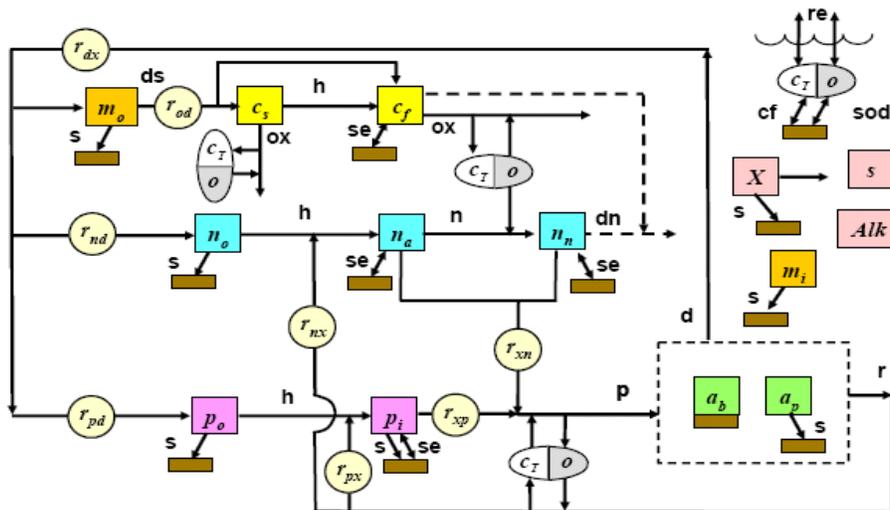
Figura 2.5. Balance de masa.



Fuente: EPA, 2007

Las reacciones presentes en los medios acuáticos son complejas e involucran diversos factores que el modelo representa por medio de las variables de estado para las cuales se definen sus interacciones en la Figura 2.6.:

Figura 2.6. Cinética del modelo y proceso de transferencia de masa.



Fuente: EPA, 2007

2.3 Metodología de Calibración

2.3.1 Método de Simulación Monte Carlo

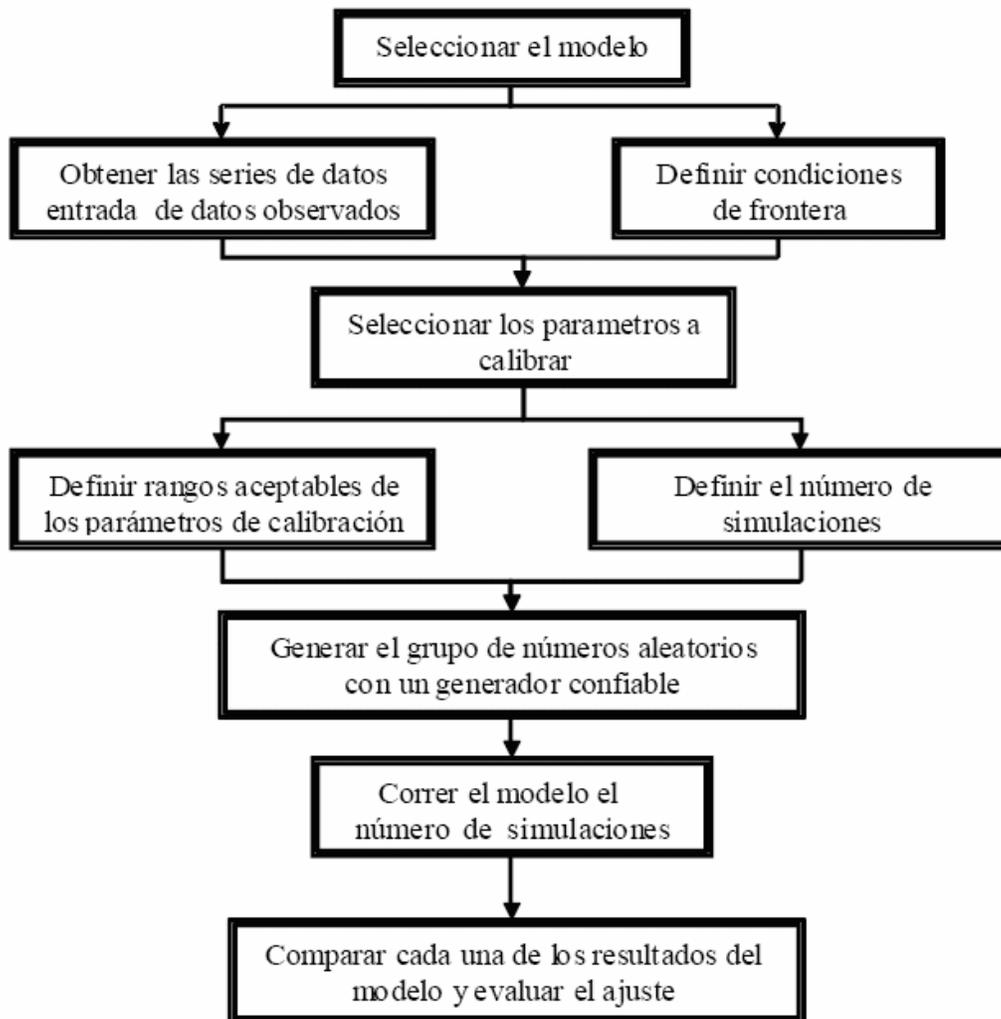
El método de Monte Carlo se refiere a la realización de un modelo de simulación de parámetros generados aleatoriamente a partir de la distribución de probabilidad de estos parámetros. Por lo tanto, el método de simulación de Monte-Carlo se utiliza para realizar la calibración del modelo de calidad del agua. Éste método consiste en correr el modelo un número “n” (grande) de veces, usando parámetros de entrada diferentes. Los resultados de cada corrida son comparados con los datos observados en las campañas de medición, y se escoge aquel que represente mejor los datos medidos. Tiene la ventaja de ser un modelo sencillo de implementar para modeladores inexpertos, además es ampliamente utilizado (Orozco, 2005).

La distribución de probabilidad de los parámetros a menudo es desconocida; sin embargo, a partir de las experiencias anteriores y diversas evidencias físicas, se puede definir el rango de los parámetros que mejor defina el modelo. Esto permite acortar el modelo y agilizar la convergencia del método. Con este rango, los valores de una variable aleatoria estarían uniformemente distribuidos en el intervalo.

La selección del modelo es el paso inicial en la modelación y calibración, luego se deben ingresar los datos de entrada al modelo, es decir los datos obtenidos en las mediciones de campo y además, se deben definir las condiciones de frontera de este modelo. Seguidamente, se seleccionan los parámetros del modelo a calibrar, y con esto, se seleccionan los rangos aceptables de calibración de cada parámetro y el número de simulaciones óptimo para obtener los datos deseados. Después de esto, se generan los números aleatorios a partir de los rangos seleccionados de cada parámetro un número “n” grande de veces. Dicha metodología, se aplica mediante la ayuda de una herramienta avanzada de análisis desarrollada en MATLAB que permite el análisis de simulaciones de Monte-Carlo. Esta herramienta fue creada dentro del contexto de investigación hidrológica, aunque puede ser utilizado para cualquier modelo matemático. (Monte-Carlo Analysis Toolbox, MCAT, Lees y Wagener, 2000). MATLAB es un poderoso lenguaje de programación que incluye los conceptos básicos comunes de la mayoría de los lenguajes. Esta herramienta es conocida por ser superior a otras de su género en los cálculos que involucran matrices. Además, usualmente los programas de alto nivel no ofrecen acceso fácil a la graficación, aplicación que destaca en MATLAB (Moore, 2007).

La metodología a seguir para realizar la calibración del modelo por medio del método de Monte-Carlo, se describe en el siguiente diagrama de flujo (Figura 2.7):

Figura 2.7. Diagrama de flujo de calibración con el método de Monte-Carlo.



Fuente: Orozco, 2005

2.3.2 Metodología de Incertidumbre Generalizada

La utilización de modelos basado en simulaciones de Monte Carlo como la metodología de incertidumbre generalizada (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation methodology, GLUE, Beven y Binley, 1992) es recomendado cuando se modela la calidad del agua con una cantidad

grande de parámetros, es decir, cuando la calibración manual y subjetiva implicaría un procedimiento muy complicado y engorroso.

La metodología GLUE presenta varias ventajas sobre otros métodos estadísticos de estimación paramétrica. Por ejemplo, con GLUE no es necesario hacer suposiciones de distribuciones para determinar límites de confianza o de pronóstico. Además, la no linealidad y las interacciones entre parámetros en las respuestas del modelo, se manejan implícitamente en esta metodología, la cual se centra en grupos de parámetros y no en parámetros individuales (Camacho, 2003). Por otro lado, los errores de datos de entrada se manejan de manera implícita, mientras que en otros métodos estadísticos tradicionales se asume que los errores son variables aleatorias distribuidas normalmente (con media cero y varianza σ^2) y que, además, los errores no están correlacionados ($\rho=0$). Es decir, otras metodologías asumen que los errores son independientes y distribuidos normalmente, supuestos que no son necesarios en la metodología GLUE.

Es claro que existen muchos otros factores que interactúan con los modelos de calidad del agua que no son cuantificables en el momento de realizar las mediciones, por lo que las observaciones en lugares puntuales pueden ser incompletas o presentar errores que no se están considerando. Es por esto, que por medio de los resultados de las simulaciones de Monte Carlo, se puede disminuir la incertidumbre del modelo estimando los límites de confianza.

Para los modelos estimados, se calculan funciones objetivo que representan el error cuadrático medio de las estimaciones de los parámetros en estudio para cada una de las simulaciones de Monte Carlo. Estas funciones objetivo se transforman en medidas de confiabilidad que más tarde serán los determinantes de los pronósticos de los parámetros del modelo.

Seguidamente, se genera el análisis de sensibilidad a partir de la población de parámetros simulados con Monte Carlo. Con este análisis, no es posible encontrar un único modelo que sea mejor con respecto a las demás funciones objetivo, sino que se tendrán varias series de parámetros que serán potencialmente las óptimas para el modelo. Con este grupo de estimaciones de parámetros, se podrán escoger los que mejor identifiquen la realidad de los valores observados y por lo tanto, se podrán producir mejores estimativos de modelos que disminuyan la incertidumbre de las predicciones. Para lograr escoger los valores simulados de los parámetros que resulten en mejores funciones objetivo, se generan gráficas de dispersión, donde los valores de las funciones objetivo se representan contra el rango de parámetros simulados.

De acuerdo al criterio de ajuste de las simulaciones de Monte Carlo se generan 10 intervalos de clase que serán graficados junto a los datos observados. El gráfico representa el rango de buenas y malas respuestas de los parámetros simulados con respecto al modelo observado. Las estimaciones de los parámetros del modelo, pueden examinarse también por medio de diagramas de dispersión de los valores simulados contra los valores de las funciones objetivo.

Por su parte, mediante el análisis generalizado de sensibilidad (Generalised Sensitivity Analysis, Spear y Hornberger, 1980) es posible analizar la sensibilidad de cada parámetro por medio de la distribución acumulada de las diez clases de parámetros ordenándolos de acuerdo a las medidas de confiabilidad que se presentan en la gráfica de “análisis de sensibilidad regional”. De esta manera, se podrán identificar los parámetros más sensibles, lo que es importante debido a que parámetros insensibles resultan de distribuciones acumuladas similares para cada clase, mientras que parámetros sensibles resultan de diferencias marcadas en las distribuciones acumuladas de cada clase de parámetros.

De esta manera, se tendrá una idea clara de las simulaciones más útiles para definir medidas que solucionarían los conflictos del uso y calidad del recurso en la cuenca del Río Damas. El valor real más probable de la concentración de cada parámetro determinante, por su naturaleza, se desconoce, pero mediante este procedimiento se podrá obtener una estimación confiable.

CAPITULO 3: Descripción del Área de Estudio

3.1 Ubicación

El área de estudio seleccionada, corresponde a la cuenca del Río Damas, la cual es una subcuenca de la parte alta, de la Cuenca del Río Grande de Tárcos (cuenca No. 24), ubicada al suroeste de la misma. Las coordenadas aproximadas en la proyección Lambert Norte son desde los 209200 hasta 203000 latitud norte y desde los 529000 hasta 537000 longitud oeste. El área de drenaje de la cuenca es de 25.7 km² (Castillo, 1999).

Figura 3.1 Foto aérea de la cuenca.



Fuente: Google Earth, agosto 2008.

La cuenca se encuentra en su mayoría en la provincia de San José, en los cantones de Curridabat y Desamparados, además abarca parte del cantón de La Unión de la provincia de

Cartago (ver Tabla 3.1). La mayoría de los distritos drenan parcialmente hacia la cuenca ya que solo el distrito Damas se encuentra en su totalidad dentro del área de estudio.

Tabla 3.1 Lugares que abarca la cuenca.

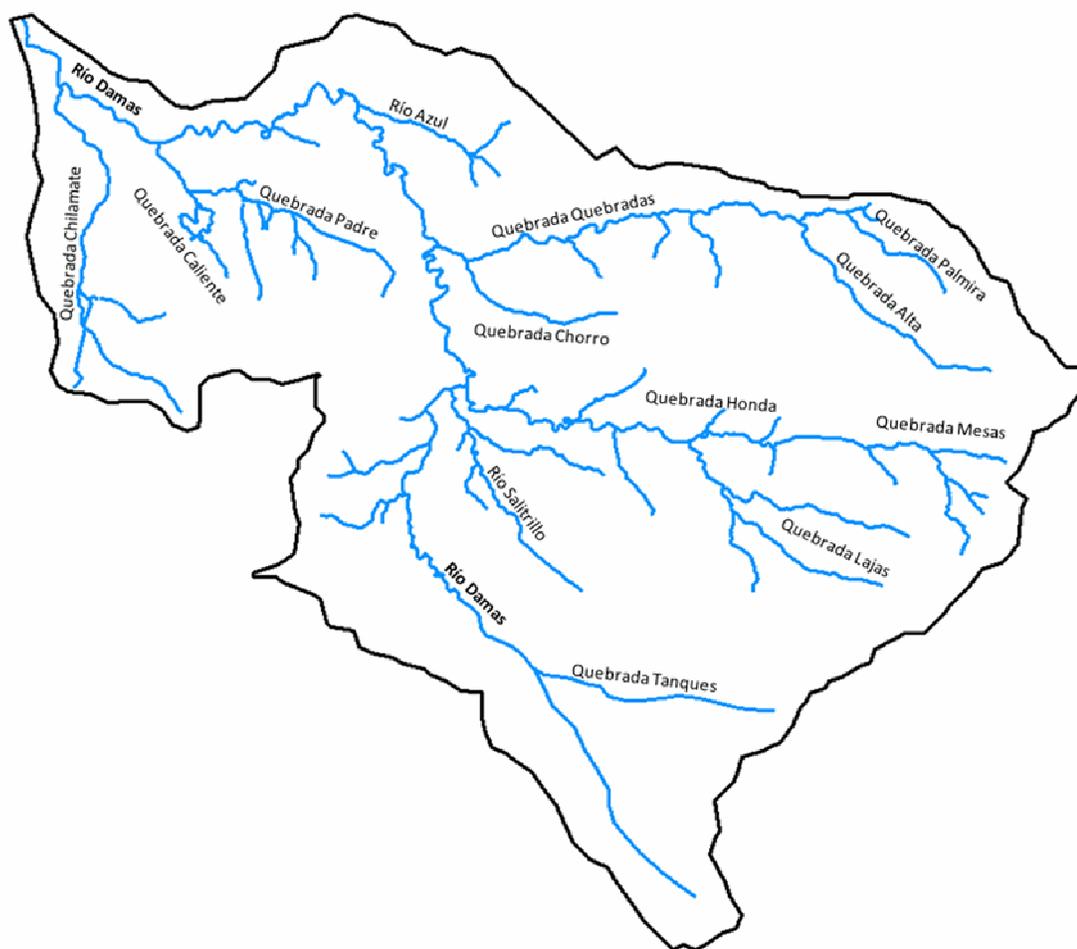
Provincia	Cantón	Distrito		Área (Ha)		% Distrito en la Cuenca
		Nombre	Número	Total	Cuenca	
San José	Desamparados	Desamparados	1	331	22	7
		San Antonio	5	206	157	76
		Patarrá	7	1909	1352	71
		Damas	10	257	257	100
		Gravilias	12	294	240	82
	Curridabat	Tirrases	4	188	12	6
Cartago	La Unión	Río azul	2	506	442	87
		San Diego	8	787	74	9

Fuente: Lizano, 2001.

3.2 Red Fluvial

La red fluvial de la cuenca está compuesta por el cauce principal de 12.2km de longitud que inicia en los Cerros de La Carpintera y termina en su confluencia con el Río Tiribí. Presenta gran cantidad de quebradas pequeñas que conforman afluentes de menor orden los cuales suman una longitud total de cauces de 54.8km. A continuación se muestra la red fluvial de la cuenca del Río Damas.

Figura 3.2 Red Fluvial cuenca Río Damas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2 Datos de la cuenca.

Área (km ²)	25.7
Longitud del cauce principal (km)	12.2
Longitud de todos los cauces (km)	54.8
Número de orden	4

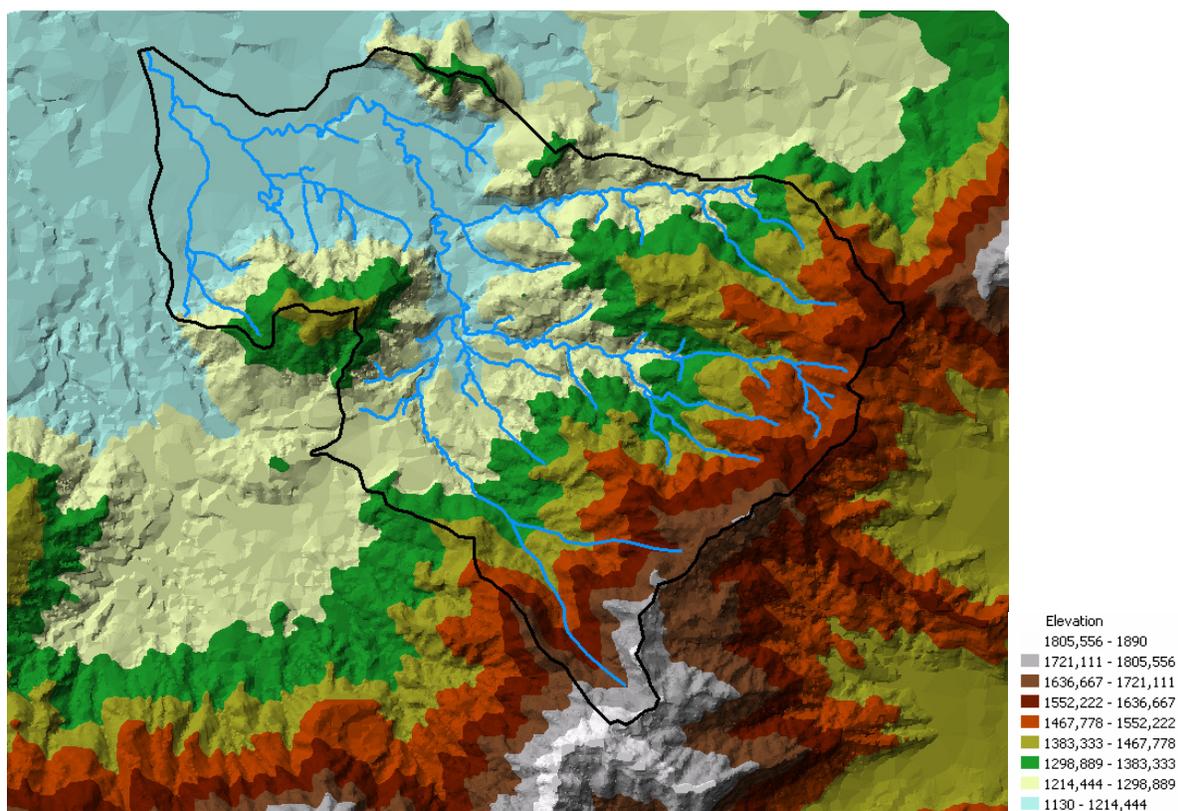
Fuente: Castillo, 1999.

3.3 Topográfica

En la cuenca se encuentran marcados dos patrones topográficos, debido a que en la parte alta se encuentran pendientes elevadas que alcanzan hasta 75% en algunos puntos, mientras en la parte baja presenta planicies con pendientes bajas que se encuentran entre 0 y 10%.

El punto más alto de la cuenca tiene una elevación de 1855msnm, mientras que el más bajo tiene una elevación de 1145msnm, lo que genera una diferencia de elevaciones de 710m.

Figura 3.3 Modelo de elevación digital.



Fuente: Elaboración propia.

3.4 Uso del suelo

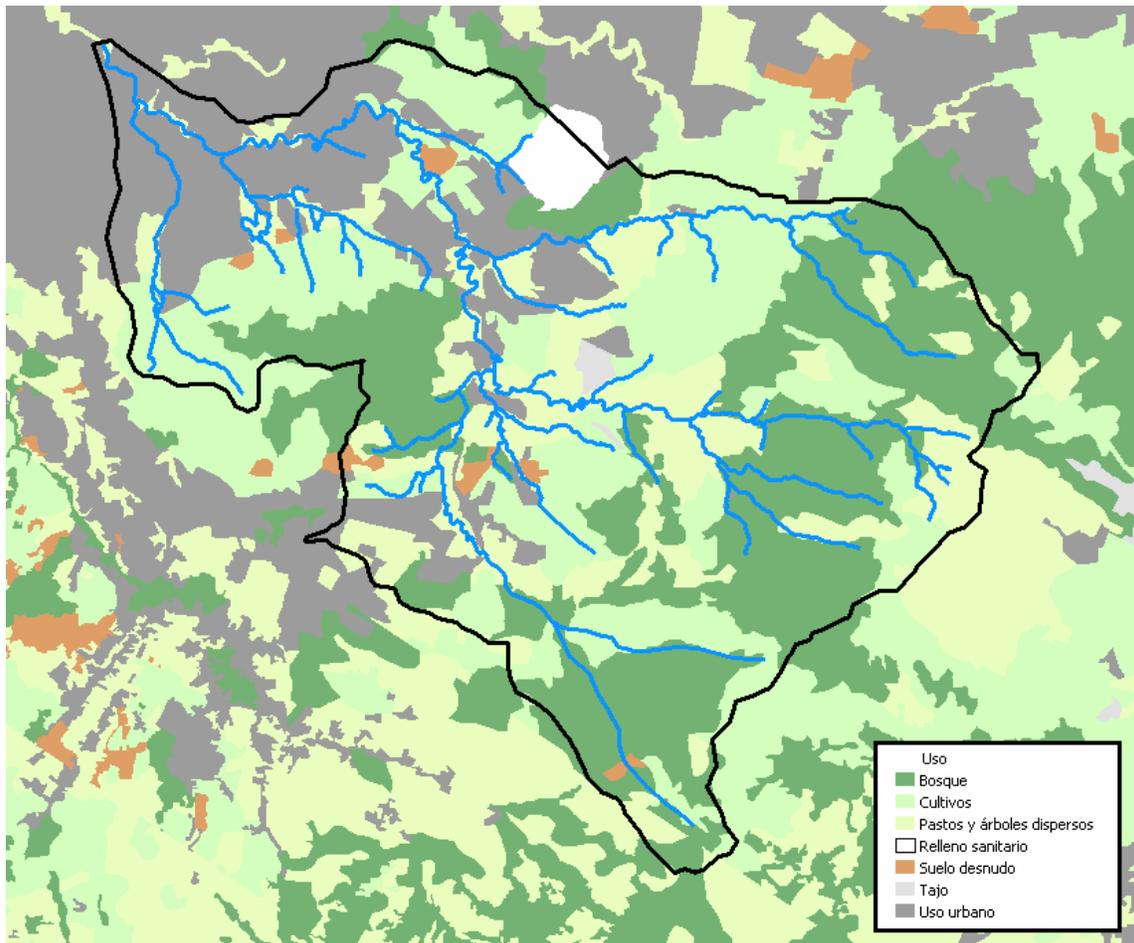
En la Figura 3.3 se presentan los distintos usos del suelo presentes en la cuenca, los cuales se clasificaron en las siguientes categorías (ProDUS, 2007):

- **Bosque:** ubicado principalmente en la parte alta de la cuenca y dos zonas ubicadas en la parte media de la cuenca. Estos bosques protegen los cauces del ingreso de partículas en suspensión producto de la escorrentía.

- **Cultivos:** ubicados de forma dispersa a lo largo de la cuenca, pero principalmente en la parte media de la cuenca. Afectan la calidad de los cuerpos de agua, cuando se encuentran en las márgenes de estos debido a que son los principales culpables del ingreso de nutrientes como nitrógeno y fósforo, así como de materia orgánica producto de residuos de la recolecta y el procesamiento.
- **Pastos y árboles dispersos:** presentes en distintos puntos de la cuenca producto de la deforestación, este tipo de uso del suelo no tienden a generar impactos directos en la calidad del agua
- **Relleno Sanitario:** Ubicado en la parte alta de la subcuenca de Río Azul, el flujo de lixiviados y la escorrentía superficial generan un impacto muy importante en la calidad del agua, degradándola de manera significativa.
- **Suelo desnudo:** uso del suelo generado producto de la deforestación, cubre puntos dispersos de poca área a lo largo de la cuenca. Este tipo de uso genera un impacto en la calidad del agua, ya que aporta gran cantidad de sólidos en suspensión, producto de la escorrentía superficial.
- **Tajo:** localizado en la parte media de la cuenca, se convierte en un agente que afecta en gran medida la calidad del agua de los cauces ya que promueve el ingreso de sedimentos y partículas en suspensión, aumentando considerablemente las concentraciones de sólidos presentes en el agua.
- **Uso Urbano:** es el tipo de uso que genera más impacto a la calidad del agua de los cuerpos de agua ya que utilizan los cauces como alcantarillas y basureros. Se ubican en las márgenes del cauce principal en las partes medias y altas, mientras que en la parte baja de la cuenca se encuentra abarcada casi completamente por este tipo de uso. Los impactos que genera al cuerpo de agua se deben al gran número de vertimientos y depósitos de residuos que se realizan sin ningún tratamiento, los aportes de contaminantes son variados así como su procedencia.

Los usos antes mencionados se encuentran repartidos en distintas proporciones a lo largo de la cuenca, siendo los usos urbano, bosque y cultivos los que se encuentran en mayor proporción abarcando grandes áreas, mientras tanto los usos relleno sanitario, tajo y suelo desnudo representan usos puntuales que se dan en áreas de poca cobertura.

Figura 3.4 Usos del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3 Usos del suelo.

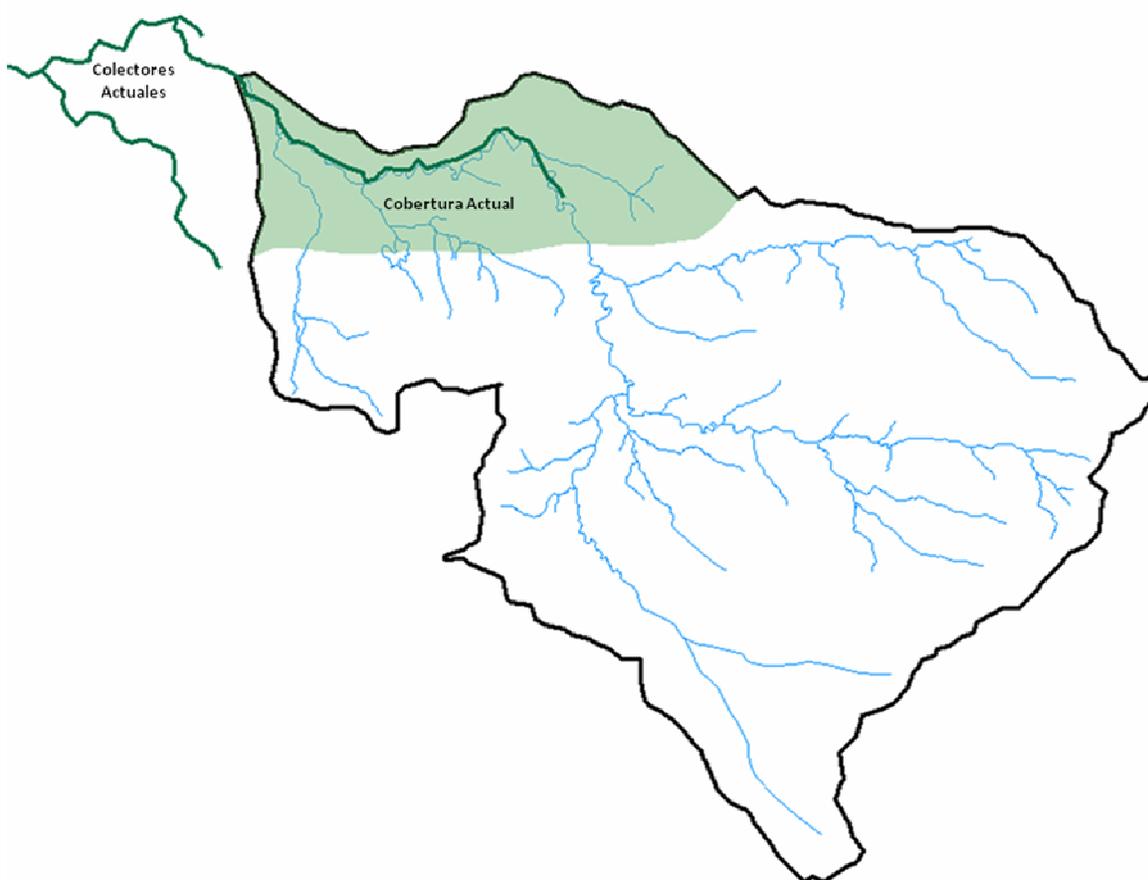
Uso del Suelo	Área (km ²)	% Área de la cuenca
Bosque	8,51	33,11
Cultivos	7,32	28,47
Pastos y árboles dispersos	4,70	18,31
Relleno Sanitario	0,35	1,35
Suelo desnudo	0,24	0,93
Tajo	0,10	0,39
Uso Urbano	4,48	17,43

Fuente: ProDUS, 2007.

3.5 Alcantarillado Sanitario

La red actual de alcantarillado sanitario cubre parcialmente la cuenca por medio de los colectores de la parte sur del Alcantarillado Metropolitano, con estos se abarca un área de 4.19km² que equivalen a un 16.32 % del área total de la cuenca. La parte de la cuenca cubierta por el alcantarillado es la parte baja, caracterizada por un marcado predominio del uso urbano. (ProDUS, 2007).

Figura 3.5 Cobertura actual del alcantarillado sanitario.

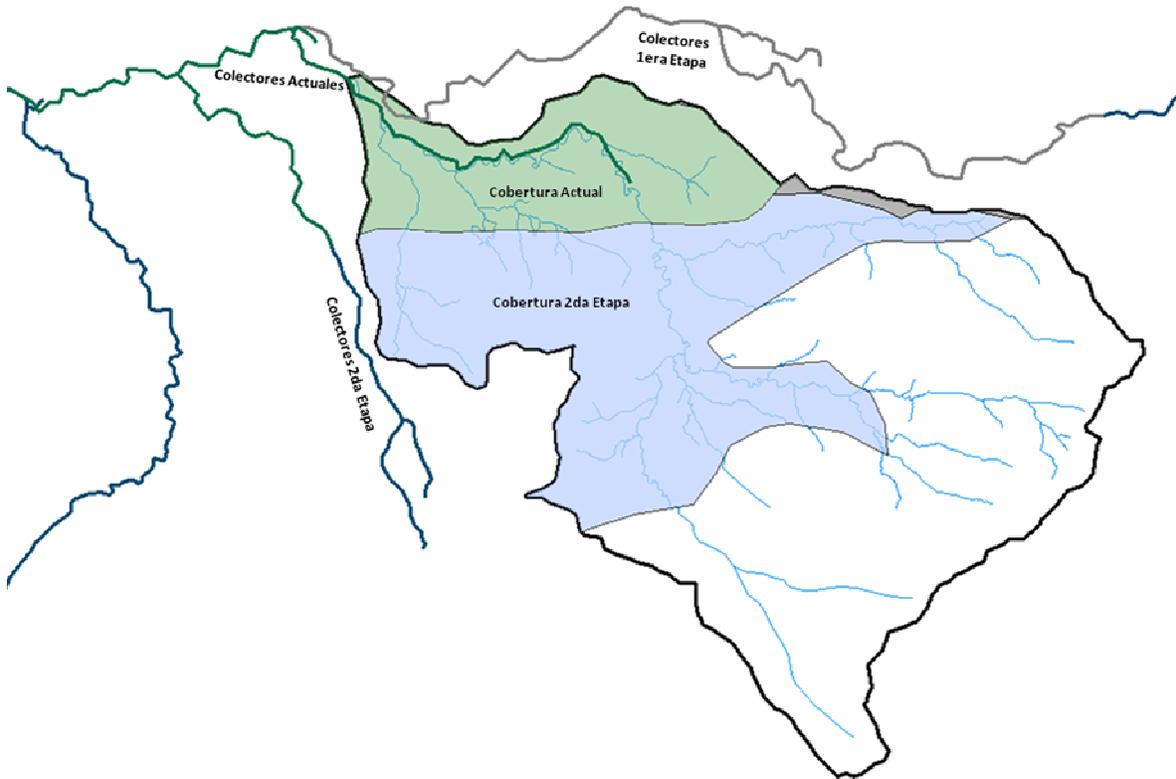


Fuente: Elaboración propia.

Debido al crecimiento de las áreas urbanas en el área metropolitana, se tiene prevista la ampliación de la cobertura del alcantarillado sanitario en varias etapas. De estas, la segunda etapa sería la que aumente la cobertura sobre la cuenca en 8.71km² que equivale a un 33.89% del área

total de la cuenca. Este aumento generaría que el área total cubierta por el alcantarillado sea de 13.07km² y por lo tanto un 50.89% se encuentre cubierta por el alcantarillado sanitario. (ProDUS, 2007).

Figura 3.6 Cobertura futura del alcantarillado sanitario.

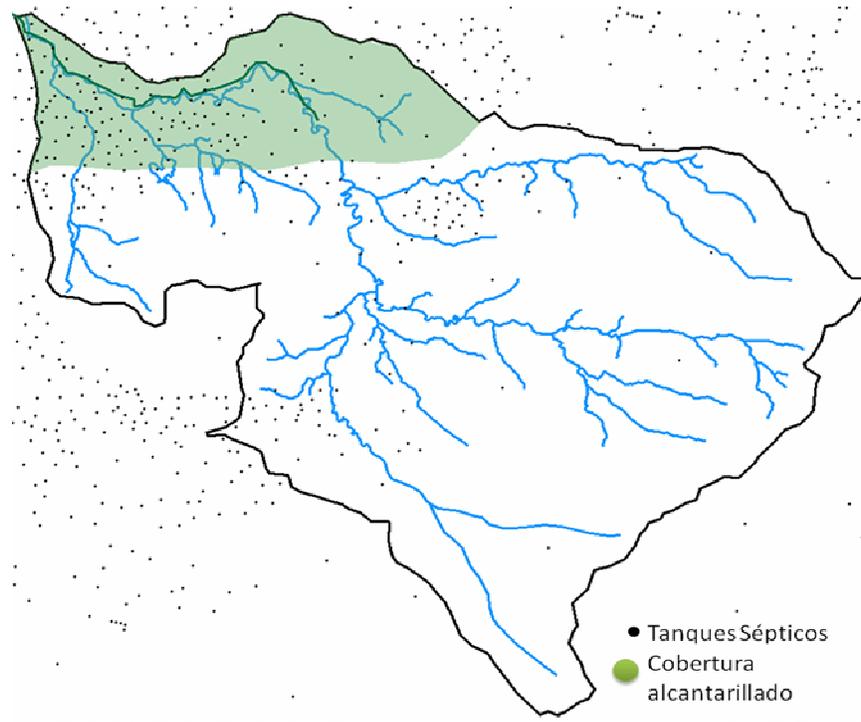


Fuente: Elaboración propia.

La zona en estudio ha sufrido grandes cambios y ha aumentado de manera significativa su densidad de población de forma desordenada y sin planificación.

De la Figura 3.6 se observa como la mayoría de los tanques sépticos se encuentran dentro del área de cobertura del alcantarillado sanitario, lo que muestra la poca eficiencia del alcantarillado como sistema de recolección de aguas residuales. Además, se muestra como el crecimiento se ha dado de manera desordenada y sin planificación, por lo que las personas han decidido construir tanque séptico o descargar las aguas residuales al río en caso de vivir en los márgenes del cauce. (Castillo, 1999).

Figura 3.7 Tanques sépticos en la cuenca.



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO 4: Campañas de Medición

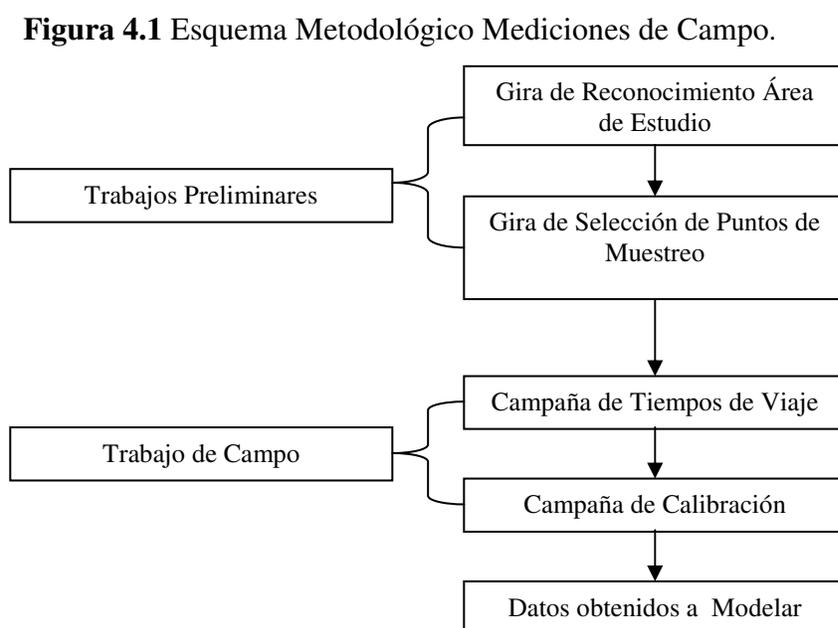
En este capítulo se describen los trabajos de campo realizados con el fin de obtener los datos necesarios para la correcta calibración del modelo de calidad del agua. Dichos trabajos fueron realizados con la colaboración del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Además en este capítulo, se muestran y se analizan los resultados obtenidos de las campañas.

La secuencia con la que se elaboró este capítulo es la siguiente: primero se describe la metodología empleada y los trabajos a realizar, seguidamente se detalla cada uno de los trabajos realizados y finalmente se muestran los resultados obtenidos de las campañas.

El objetivo de las campañas es obtener la información de campo necesaria para la calibración del modelo matemático de calidad de agua del Río Damas. Además, se busca adquirir información de campo acerca de caudales y determinantes de calidad de agua siguiendo la masa de agua y contaminantes para un tiempo y espacio definidos en el Río Damas.

4.1 Metodología

Para que los datos de campo se obtengan de la mejor manera posible, es de gran importancia que el trabajo se realice siguiendo un esquema ordenado y metodológico. De esta forma, se reducen las fuentes de error que se podrían introducir debido a un trabajo descoordinado y sin planificación. Para este proyecto el trabajo realizado se dividió como se detalla a en la Figura 4.1:



La secuencia de estos trabajos es bastante simple y lógica, pero es de gran importancia respetarla y no improvisar pasos. Además, es fundamental acatar las responsabilidades establecidas, ya que éstas se formulan con el fin de garantizar el éxito y representatividad de los datos.

4.1.1. Gira de reconocimiento:

Una vez seleccionada la zona de estudio, se realizó esta gira en marzo del 2007. Ésta consistió en un recorrido desde la parte alta de la cuenca hasta su desembocadura, con el fin de identificar posibles puntos de monitoreo para realizar el aforo y el muestreo.

El volumen de control considerado corresponde al Río Damas, desde su inicio hasta la confluencia con el Río Tiribí. Esto significa que las principales descargas de contaminantes y afluentes de caudal de agua deben monitorearse antes de la respectiva desembocadura en el Río Damas. Se monitorean los parámetros y se realizan aforos en los sitios más apropiados y cercanos posible a la desembocadura en el río. Así, el balance de masa no presentará gran incertidumbre por carga de contaminación no contabilizada y los parámetros calibrados del modelo corresponderán correctamente a procesos de transformación de la calidad del agua en el cauce.

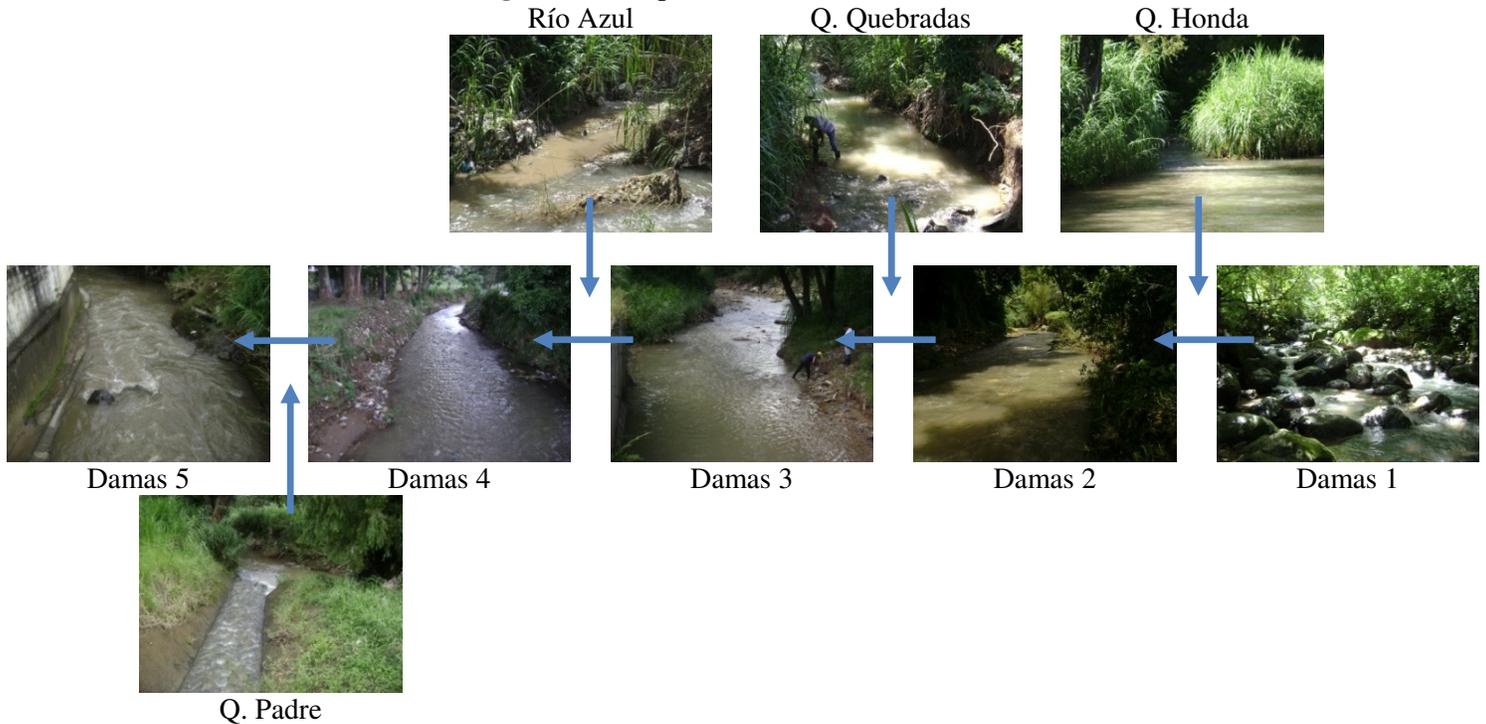
De esta gira se seleccionaron 20 posibles puntos de muestreo y aforo. El recorrido que se realizó fue de gran importancia, ya que permitió conocer el sistema fluvial del Río Damas y comprender las dificultades que se podían presentar en las campañas de medición. Además, se estudió la mejor manera de plantear un modelo de calidad de agua de este sistema.

4.1.2. Gira de selección de los puntos:

Realizada en mayo del 2007 junto con el personal del AyA, con el conocimiento previo de la gira de reconocimiento. Se definieron los puntos en los cuales se realizarían las mediciones necesarias para la programación de los tiempos de viaje y los puntos necesarios para la modelación de la calidad del agua del río. Es importante que la selección de los puntos de aforo se realice en una segunda gira con el equipo de trabajo presente; ya que la primera gira serviría para conceptualizar el modelo. De esta forma, los lugares seleccionados se localizarán de manera tal que fueran los más adecuados para un modelo de calidad del agua y estén en lugares que no presenten dificultades de acceso o complicaciones para la toma de datos, esto porque se conocen de antemano los aspectos de logística que conlleva cada punto.

En la Figura 4.2. se muestra cómo se conceptualizó el sistema del Río Damas. En este se muestra que en total se monitorearon nueve puntos, de los cuales 5 son en el cauce (para medir cómo varía la calidad del agua) y cuatro son afluentes; que en este caso se tomaron los ríos y quebradas tributarias.

Figura 4.2 Esquema Pictórico Río Damas.



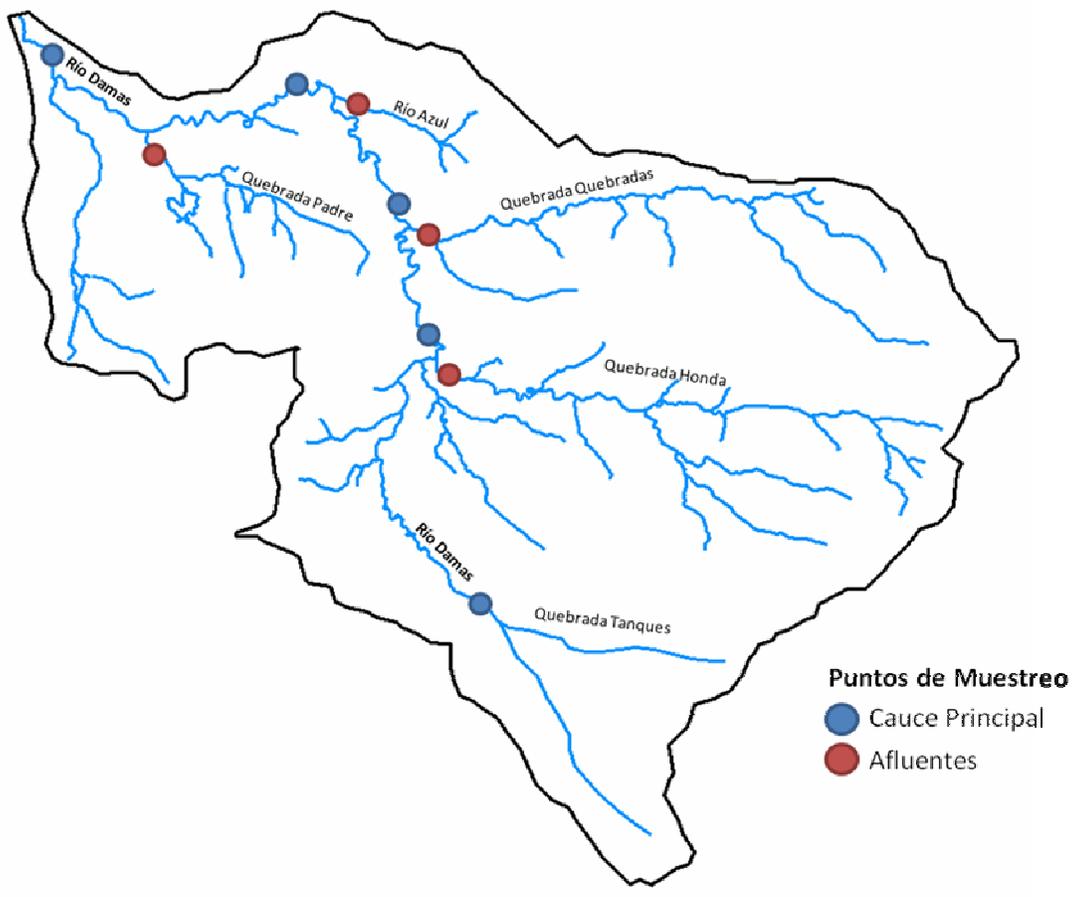
Los puntos están intercalados por que se mide la condición en el río antes de alguna descarga y luego se mide después de realizada la descarga para poder analizar cómo asimila el río la entrada de contaminantes.

En la Tabla 4.1 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo y monitoreo, así como su elevación, puntos que se muestran también en la Figura 4.3.

Tabla 4.1. Sitios de monitoreo.

Punto	Localización – Nombre	Coordenadas		Elevación (msnm)
		Latitud	Longitud	
1	Damas 1 – Guatuso	205133	532903	1325
2	Quebrada Honda	206963	532538	1238
3	Damas 2 – Patarrá	207216	532463	1181
4	Quebrada Quebradas	207945	532459	1179
5	Damas 3 – Fátima	208182	532235	1176
6	Río Azul	209018	531788	1173
7	Damas 4 – San Antonio	209073	531435	1171
8	Quebrada Padre	208715	530350	1167
9	Damas 5 – Desamparados	209408	529511	1153

Figura 4.3. Puntos de muestreo en la cuenca Río Damas.



Fuente: Elaboración propia.

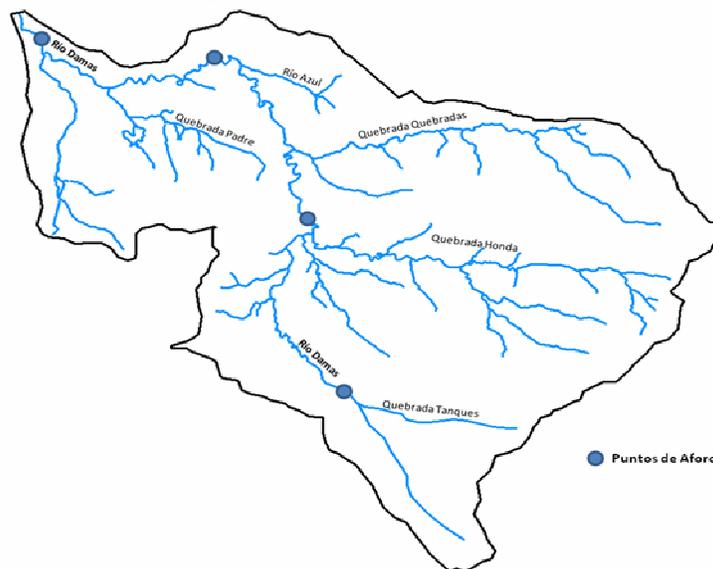
4.1.3. Campaña de Tiempos de Viaje:

Debido a que para la calibración del modelo de calidad del agua es necesario realizar las mediciones a la misma masa de agua se realizaron campañas de aforos en puntos estratégicos. Estas campañas se realizaron el día antes de cada campaña de calibración para que, de esta manera se obtuvieran datos de caudal lo más cercano posible a los que se tendrían al tomar las muestras. Así, se pretende reducir la incertidumbre y el error en la estimación de los tiempos necesarios para las mediciones.

Los puntos seleccionados fueron:

- i. Damas 1 – Guatuso
- ii. Damas 2 – Patarrá
- iii. Damas 4 – San Antonio
- iv. Damas 5 – Desamparados

Figura 4.4. Puntos de Aforo.



Fuente: Elaboración propia.

En la primera campaña de tiempos de viaje, además de estimar el caudal del río, se midieron parámetros hidráulicos que caracterizaron el flujo y que, por lo tanto, definieron la velocidad del agua. Con esto, se estima la hora en la que se deben tomar las muestras.

Los parámetros necesarios para la estimación de los tiempos de viaje son:

- Sección transversal
- Pendiente longitudinal
- Caudal
- Longitud entre puntos (obtenida de hojas cartográficas 1:10000)

Debido a que la pendiente y la sección transversal se mantienen prácticamente invariantes, se miden solo en la primera campaña. Por otro lado, los datos de caudal sí se miden para las dos campañas.

El objetivo de las campañas de tiempos de viaje, es lograr una campaña de calibración exitosa que refleje en la medida de lo posible el comportamiento de la masa de agua a lo largo del río. Es por esto que, una vez obtenidos los datos de cada campaña, se estiman los tiempos de viaje del agua con lo que se realiza la programación de la toma de muestras y aforos de la campaña de calibración.

Al realizar la programación, se decidió utilizar dos cuadrillas: una que realice las mediciones a lo largo del cauce y otra que mida en los ríos y quebradas tributarias. Cada cuadrilla debe estar conformada por un equipo de aforo y por un técnico del Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

Tabla 4.2 Distribución de cuadrillas de trabajo.

Punto	Nombre	Cuadrilla
1	Damas 1 – Guatuso	1
2	Quebrada Honda	2
3	Damas 2 – Patarrá	1
4	Quebrada Quebradas	2
5	Damas 3 – Fátima	1
6	Río Azul	2
7	Damas 4 – San Antonio	1
8	Quebrada Padre	2
9	Damas 5 – Desamparados	1

4.1.4. Campaña de Calibración:

Consistió en realizar mediciones de aforo, parámetros de campo y toma de muestras, para el análisis de laboratorio, sobre aproximadamente la misma masa de agua que se desplaza hacia aguas abajo por el Río Damas. Para lograr esto, se utilizaron los datos de la “campaña de tiempos de viaje” del día anterior.

En estas campañas, es muy importante el trabajo de logística y coordinación entre cuadrillas, ya que al tener que tomar las medidas a una hora específica, se puede incurrir más fácilmente en el error. Sin embargo, gran parte del éxito de estas campañas se debe al trabajo previo realizado.

Determinantes de calidad de agua a monitorear

Los parámetros necesarios para la implementación del modelo y la correcta calibración del mismo se deben obtener a partir de muestras de agua tomadas y preservadas en campo para un posterior análisis de laboratorio.

Los parámetros medidos en campo fueron:

- Temperatura
 - o Temperatura del agua
 - o Temperatura del aire
- pH
- Conductividad

Los determinantes de calidad de agua analizados en laboratorio fueron:

- Oxígeno
 - o Oxígeno Disuelto (OD)
 - o Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y DBO₅ soluble
 - o Demanda Química de Oxígeno (DQO) y DQO soluble
- Grasas y Aceites
- Nitrógeno
 - o Nitrógeno Orgánico
 - o Nitrógeno Amoniacal
 - o Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

- Nitritos
- Fósforo
 - Fósforo Total
 - Fosforo Soluble
- Sólidos
 - Sólidos Totales Totales (STT)
 - Sólidos Disueltos Totales (SDT)
 - Sólidos Suspendidos Totales (SST)
 - Sólidos Suspendidos Sedimentables (SSS)
- Alcalinidad
- Dureza
- Coliformes Totales

4.2 Resultados Campañas de Medición

Como se mencionó anteriormente, como parte del trabajo de campo se realizaron dos campañas de medición a saber, campaña de tiempos de viaje y campaña de calibración. Los resultados de ambas campañas se discuten a continuación.

4.2.1 Parámetros hidráulicos

Estos parámetros fueron obtenidos en la primera campaña de tiempos de viaje realizada. Estos parámetros fueron, secciones transversales y pendiente longitudinal.

4.2.1.1 Secciones Transversales

Para los puntos seleccionados para las campañas de estimación de tiempos, se obtuvieron las secciones transversales. Éstas muestran cómo el cauce aumenta un poco conforme se avanza en la cuenca. Sin embargo, queda claro que esta expansión del cauce se da principalmente en la parte alta, ya que en la parte intermedia y baja del aumento del cauce está limitada por la construcción de viviendas al borde del río. Esta condición ha generado problemas de inundaciones en las poblaciones cercanas en el pasado.

Gráficos 4.1 a 4.4. Secciones transversales (Dimensiones de los ejes en metros).

Gráfico 4.1. Damas 1: Guatuso.

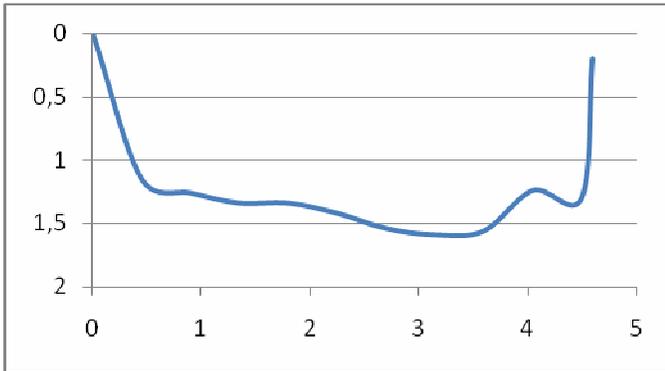


Gráfico 4.2. Damas 2: Patarrá.

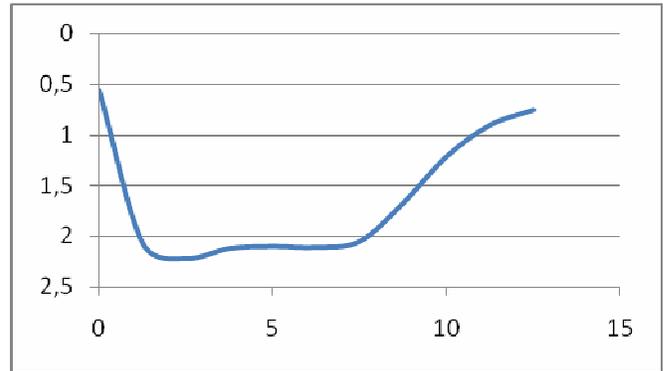


Gráfico 4.3. Damas 4: San Antonio.

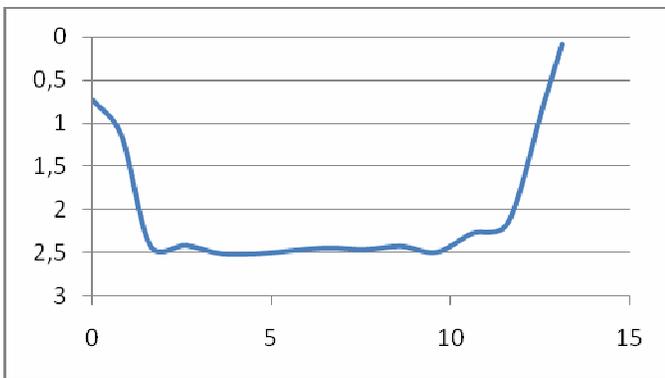
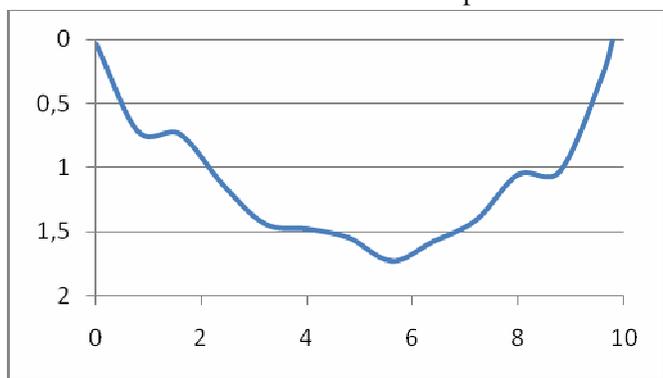


Gráfico 4.4. Damas 5: Desamparados.



4.2.1.2 Pendientes de Fondo

Entre los parámetros obtenidos de las campañas, se encuentra la pendiente de fondo longitudinal del cauce, la cual indica que, como era de esperarse, en las partes altas presenta pendientes fuertes, que disminuyen aguas abajo en la parte intermedia con pendientes cercanas al 1% y que aumentan un poco al final de la cuenca (cerca del 1.5%).

Figura 4.5 Estimación de Parámetros Hidráulicos.



a) Sección Transversal

b) Pendiente Longitudinal

Tabla 4.3 Pendientes longitudinales.

Punto	Pendiente (m/m)
Damas 1	0.044
Damas 2	0.008
Damas 4	0.014
Damas 5	0.014

4.2.2 Aforos

Las mediciones de caudal se realizaron con la ayuda de un molinete. Se utilizaron dos tipos de molinetes, a saber: molinete pigmeo para caudales pequeños y velocidades bajas y molinete regular para caudales mayores y velocidades intermedias.

Figura 4.6 Molinetes usados.



Para estimar la velocidad del agua se utiliza la siguiente ecuación, dependiendo del molinete:

Pigmeo:
$$V = \frac{R}{T} \times 0,305 \quad (4.1)$$

Mediano:
$$V = \frac{R}{T} \times 0,680 \quad (4.2)$$

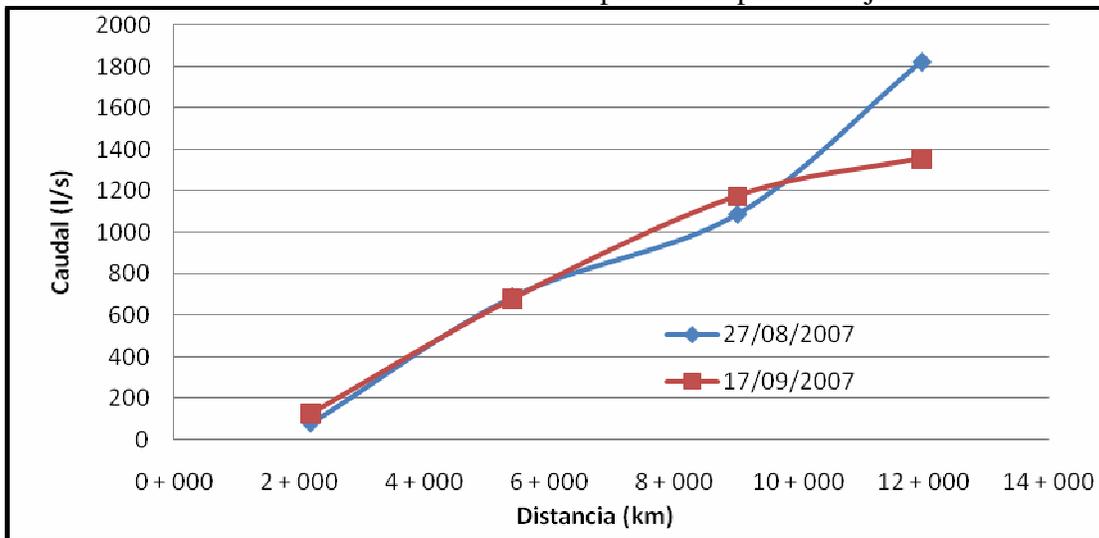
Donde: R = revoluciones T = tiempo en segundos

Para los sectores con poco caudal, se utilizó el molinete pigmeo (Damas 1 y afluentes) y mientras que para los otros se utilizó el molinete regular.

Los caudales obtenidos en las campañas de tiempos de viaje se utilizan para estimar las velocidades del agua en distintos tramos del río. Debido a que el río recibe varias descargas y aportes a todo lo largo, los datos muestran la importancia de haber medido los caudales en varios puntos y que, a su vez, estos puntos coincidieran con los que se iban a aforar y muestrear en la

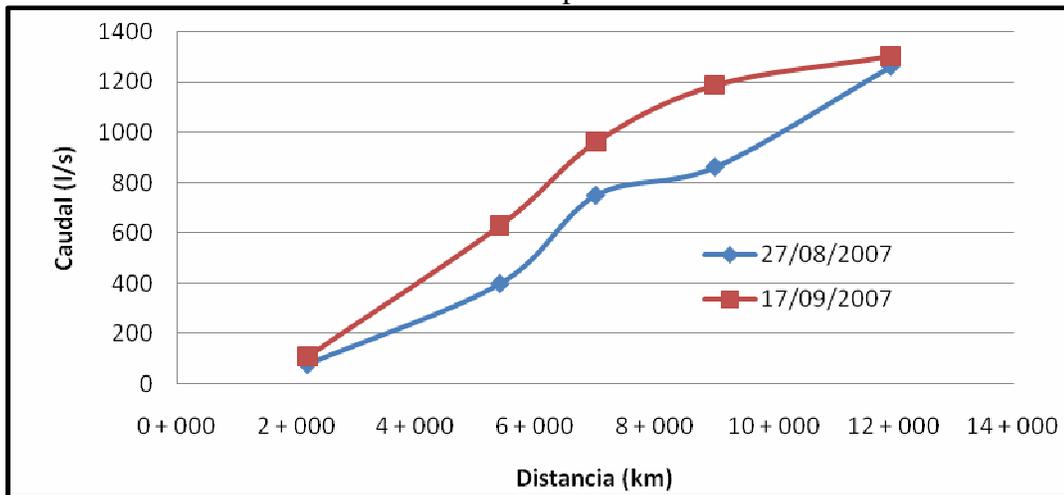
campana de calibración para de esta manera poder validar los cálculos realizados de tiempos de viaje en el momento de las mediciones.

Gráfico 4.5 Caudal campañas tiempos de viaje.



Como se observa en el gráfico anterior, el caudal aumenta en aproximadamente 10 veces el caudal desde su la parte alta hasta su confluencia con el Río Tiribí, variando desde los 0.1 m³/s, hasta poco más de 1 m³/s.

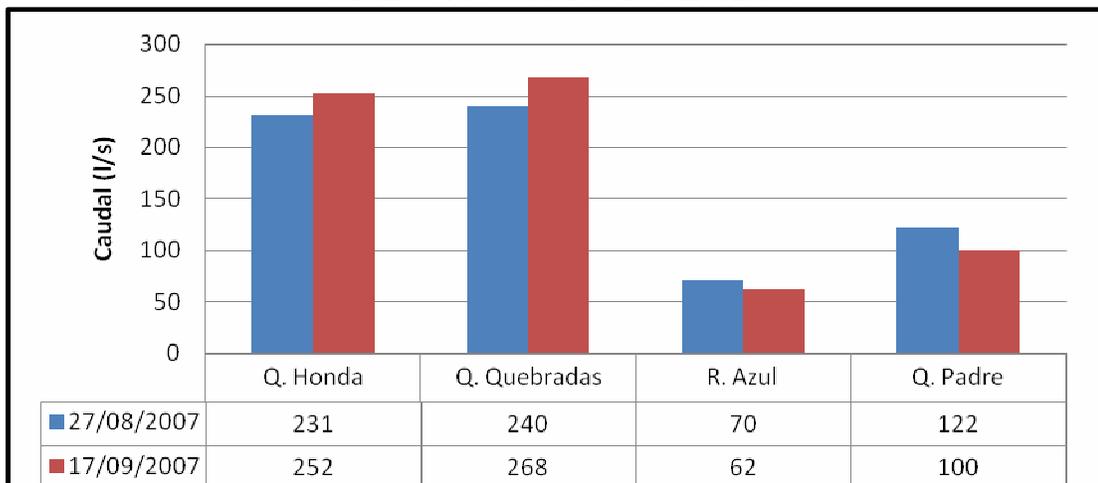
Gráfico 4.6 Caudal campañas de calibración.



Al realizar las campañas de calibración, se conservaron los valores de caudal en el orden de magnitud y tolerancia esperadas. Con estos datos, se calcularon los tiempos de viaje y las horas de

muestreo. De esta forma, se puedan aplicar de buena manera la información generada con las campañas de tiempos de viaje.

Gráfico 4.7 Caudal de los afluentes.



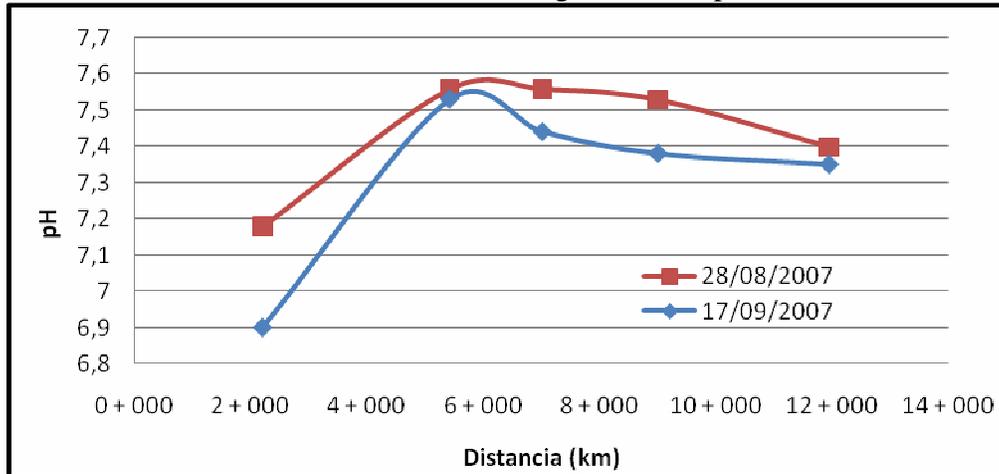
El caudal que aportan los afluentes (considerados fuentes puntuales en el modelo), es de 663 l/s y de 682 l/s para la primera y segunda campaña respectivamente. Las fuentes más importantes son Quebrada Honda y Quebrada Quebradas, quienes aportan más del 70% de las descargas. Por otra parte, el Río Azul y Quebrada Padre, a pesar de ser las que aportan menos caudal, son las que se encuentran más contaminadas, ya que son las que están en la parte baja de la cuenca y, por lo tanto, drenan las partes más pobladas. Lo anterior se discutirá con mayor detalle más adelante.

4.2.3 Análisis de Datos de Campo

4.2.3.1 pH

Los datos de pH, conductividad y temperatura del agua y ambiente medidos en campo se muestran en los siguientes gráficos:

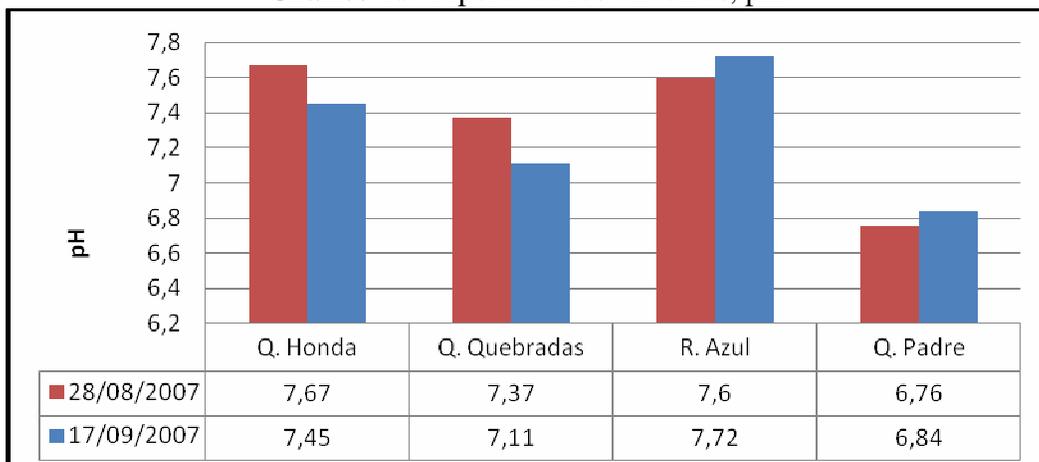
Gráfico 4.8 Perfil Longitudinal de pH.



En el Gráfico 4.8 y 4.9, se muestran los datos de pH obtenidos para ambas campañas de medición. Con respecto al perfil longitudinal, se muestra un aumento de la parte alta a la parte media bastante marcado que se conserva en ambas campañas (aproximadamente 7.0 hasta 7.5 unidades). Este aumento se reduce paulatinamente conforme se avanza en la cuenca, hasta llegar a un valor de 7.4 unidades en la confluencia con el Tiribí.

Al analizar los valores obtenidos de pH en los afluentes y compararlos con el comportamiento a lo largo del cauce principal se observa que las quebradas Quebradas y Padre, presentan valores menores a los del cauce principal en el momento de la descarga; generando de esta manera, disminuciones en los niveles de pH del cauce.

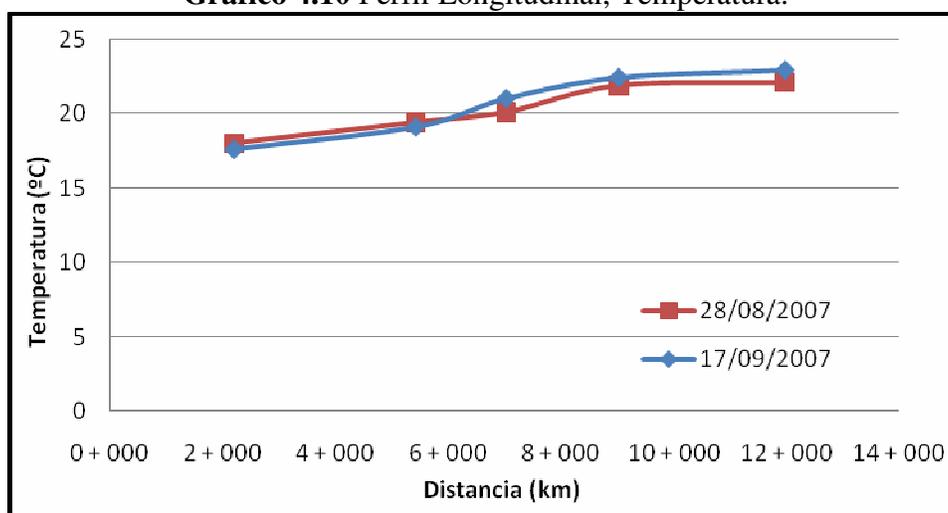
Gráfico 4.9 Aporte de los afluentes, pH.



4.2.3.2 Temperatura

La temperatura del agua es uno de los parámetros más importantes de la calidad del agua, ya que prácticamente todas las reacciones que se den en el cuerpo de agua dependerán de la temperatura en la que se encuentre este. Por lo tanto, la capacidad de autodepuración estará influenciada por la temperatura. Con respecto a los valores obtenidos del Río Damas, la temperatura tiene un incremento natural con la disminución de la altitud y la hora del día, en que se tomaron las muestras. Para ambas campañas, se obtuvieron valores de 20°C de temperatura promedio, con valores de 17°C para la parte alta de la cuenta y valores de 22°C en la parte más baja.

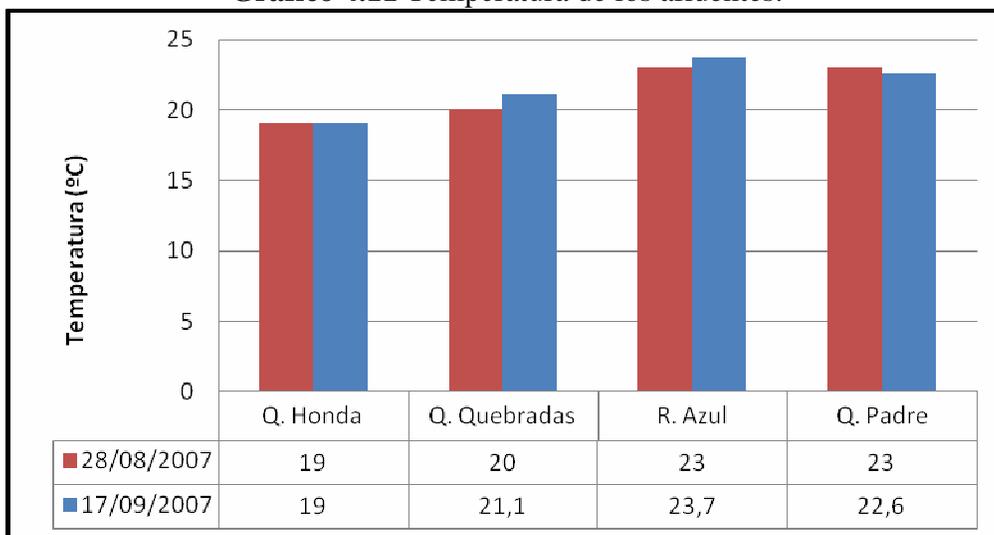
Gráfico 4.10 Perfil Longitudinal, Temperatura.



La temperatura de los afluentes presenta el mismo comportamiento que el cauce principal. Esto genera que en el momento de la descarga no se presente un choque térmico que afecte los procesos naturales que se dan en estos puntos.

La temperatura ambiente presenta una variación mayor a la temperatura del agua, ya que esta va desde 20°C hasta casi 30°C. Esta situación, representa un aumento normal y natural, ya que las mediciones iniciales se realizaron en las primeras horas de la mañana y las finales cercanas al medio día. Se observa cómo este aumento de 10°C en el ambiente, no genera el mismo efecto en la temperatura del agua, ya que el aumento en esta es de aproximadamente 7°C, como era de esperarse.

Gráfico 4.11 Temperatura de los afluentes.



En general, la temperatura del Río Damas presenta condiciones normales y no se ve afectada por descargas a temperaturas inusuales como puede ser la descarga de industrias. Por lo tanto, los procesos naturales de autodepuración del río no se ven interrumpidos o alterados por choques térmicos.

Gráfico 4.12 Temperatura ambiente cauce principal.

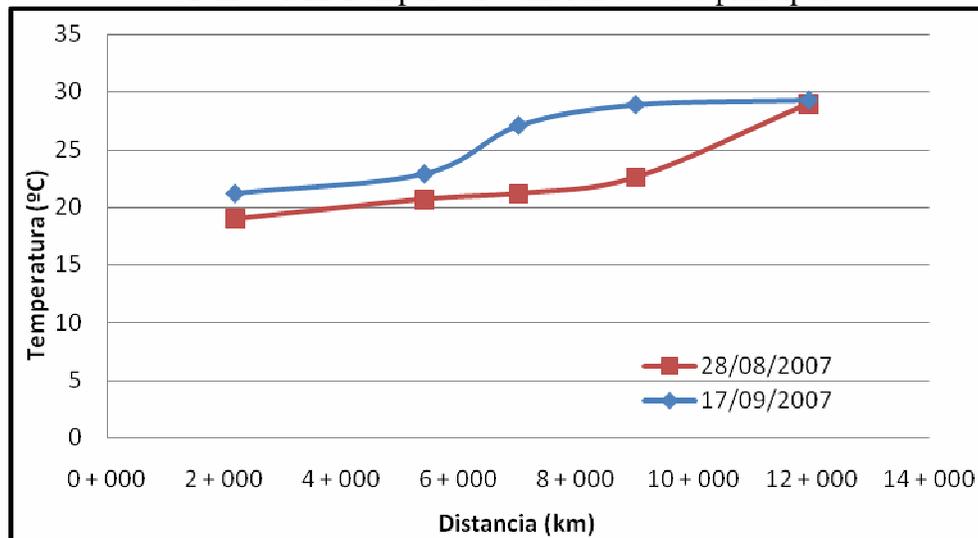
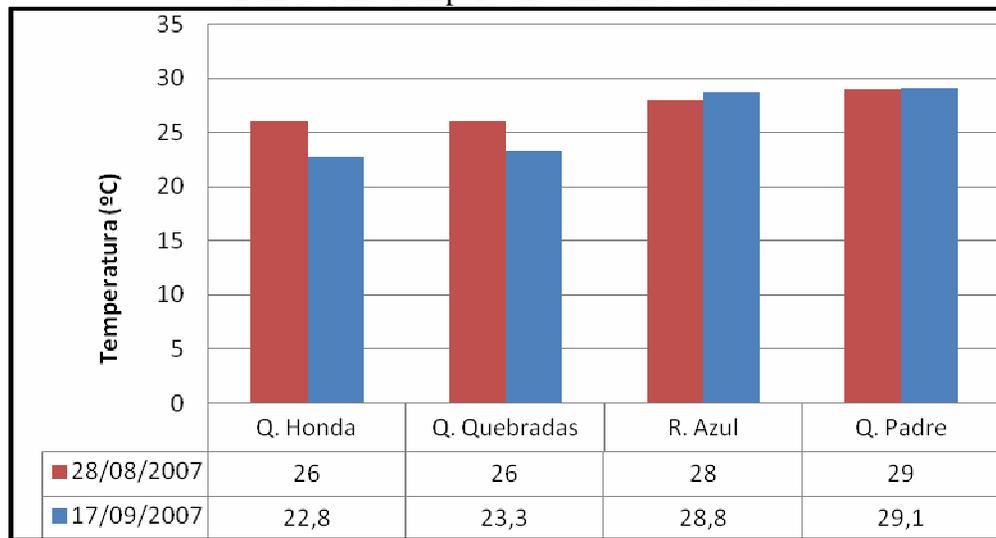


Gráfico 4.13 Temperatura ambiente afluentes.



4.2.3.3 Conductividad

La conductividad es un buen indicador de sólidos suspendidos disueltos en agua, es de fácil medición y refleja de buena manera la degradación en la calidad del agua. Con respecto a los valores obtenidos para este parámetro a lo largo del Río Damas, se observa que conforme avanza el cauce se duplican, ya que inicia en valores de $130\mu\text{S}/\text{m}$ en la parte alta hasta casi $300\mu\text{S}/\text{m}$ en la parte baja.

En la parte baja de la cuenca, es donde se registran disminuciones en la tasa de incremento de la conductividad, esto debido a que la dilución aumenta conforme al caudal.

Gráfico 4.14 Perfil Longitudinal, Conductividad.

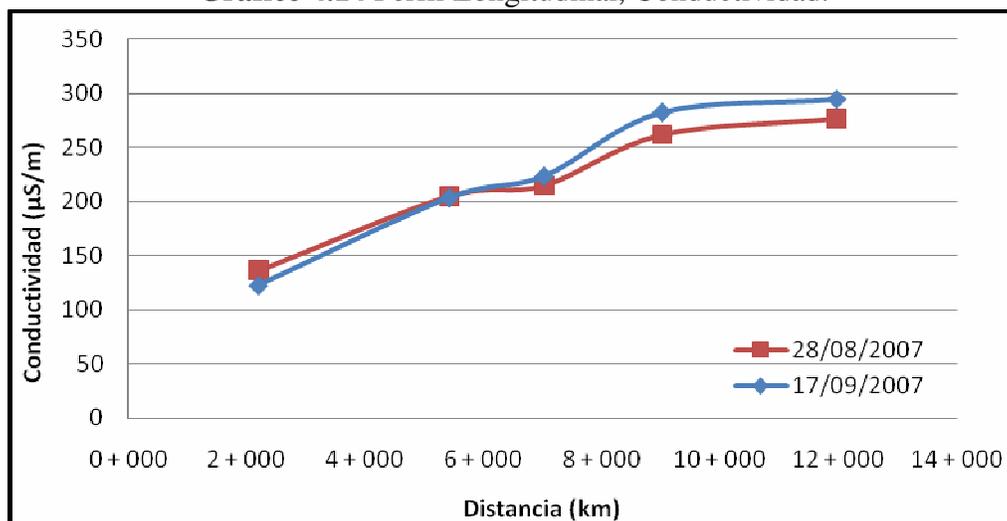
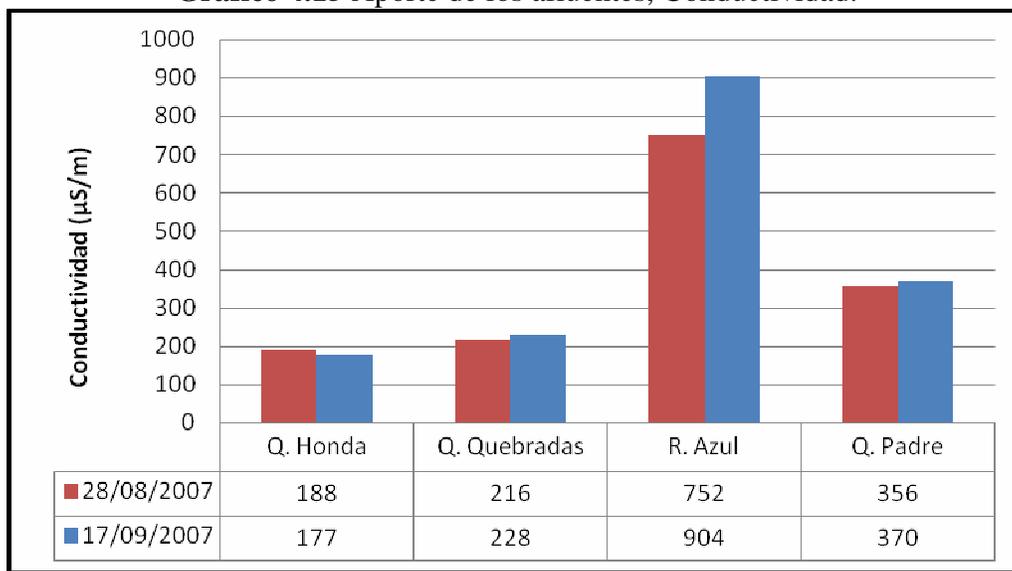


Gráfico 4.15 Aporte de los afluentes, Conductividad.



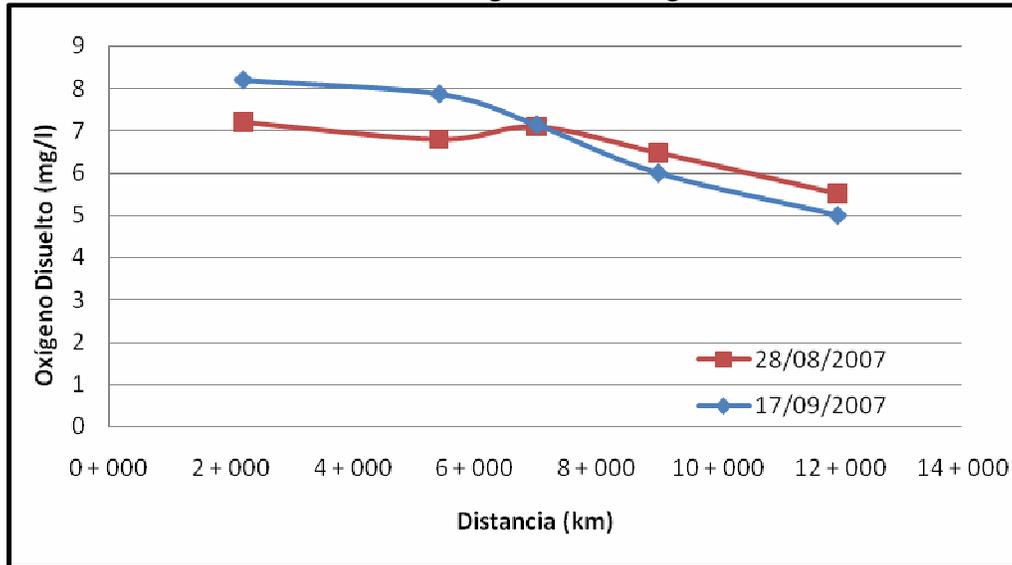
La conductividad de los afluentes presenta valores de $200\mu\text{S}/\text{m}$ para las dos primeras quebradas lo que significa valores de contaminación media de estos. Mientras que para los dos restantes aportes presenta grados mayores de contaminación, siendo contaminación alta en Quebrada Padre, con valores de $350\mu\text{S}/\text{m}$, y contaminación extrema en Río Azul, con valores de hasta $900\mu\text{S}/\text{m}$.

4.2.4 Análisis de Laboratorio

4.2.4.1 Oxígeno Disuelto

En el Gráfico 4.16 se observa el perfil longitudinal de oxígeno disuelto y en el Gráfico 4.17 los valores de los afluentes registrados en ambas campañas de medición. El nivel de oxígeno presente en el agua de cauces naturales es el parámetro de mayor importancia en análisis de calidad de agua, ya que la vida que pueda existir en este sistema natural depende en gran medida de este valor.

Gráfico 4.16 Perfil Longitudinal, Oxígeno Disuelto.

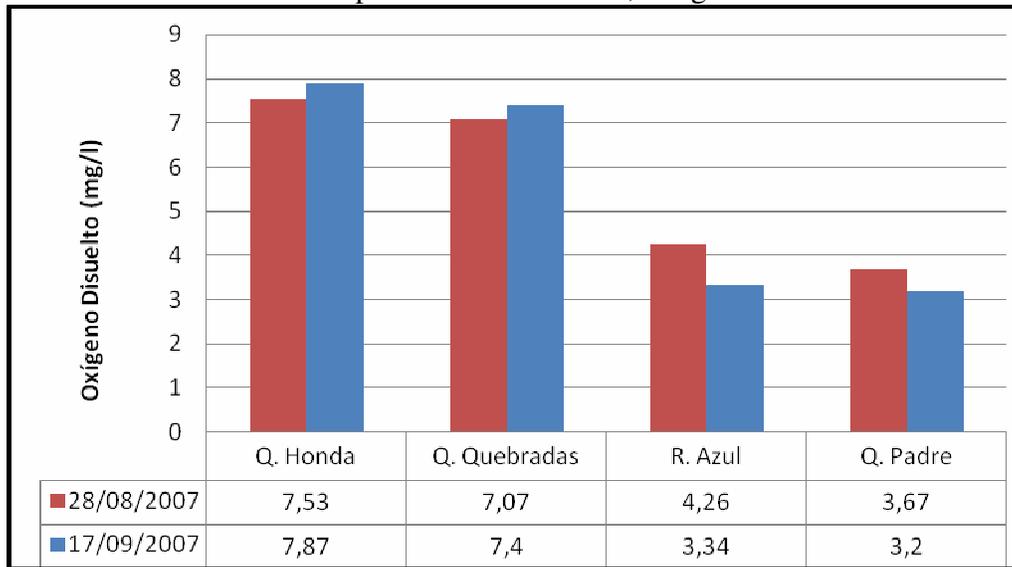


Los valores de oxígeno disuelto presentan valores superiores a los 7 mg/l para la parte alta de la cuenca. Estos se deben a la gran reaireación que ocurre en esta zona por ser río de montaña y no contar con gran cantidad de descargas contaminantes que degraden la calidad del agua y generen disminuciones en las concentraciones de oxígeno en el agua.

En la parte baja de la cuenca, se presentan concentraciones menores, ya que disminuyen las fuentes de reaireación al disminuir la pendiente y sufre mayor cantidad de descargas contaminantes. Consecuentemente, se genera un consumo del oxígeno disuelto al darse la degradación de la materia orgánica y los procesos de nitrificación del nitrógeno orgánico, amoniacal y nitritos.

Al observar los valores en las concentraciones de los afluentes, se observa cómo estos son los que modifican el comportamiento del río con respecto a los valores de oxígeno disuelto, ya que las descarga que se generan en la parte alta presentan concentraciones altas, por lo que se mantienen las condiciones aerobias en esta parte de la cuenca.

Gráfico 4.17 Aporte de los afluentes, Oxígeno Disuelto.



Por otro lado, en la parte alta, las descargas presentan concentraciones bajas de oxígeno disuelto, ya que éstos, son los que drenan la parte de la cuenca en la que se encuentra la mayor densidad de población y funcionan como “colectores”, que recolectan las aguas residuales de tipo doméstico de su cuenca. En estos afluentes, prevalecen las condiciones anaerobias y de mal olor.

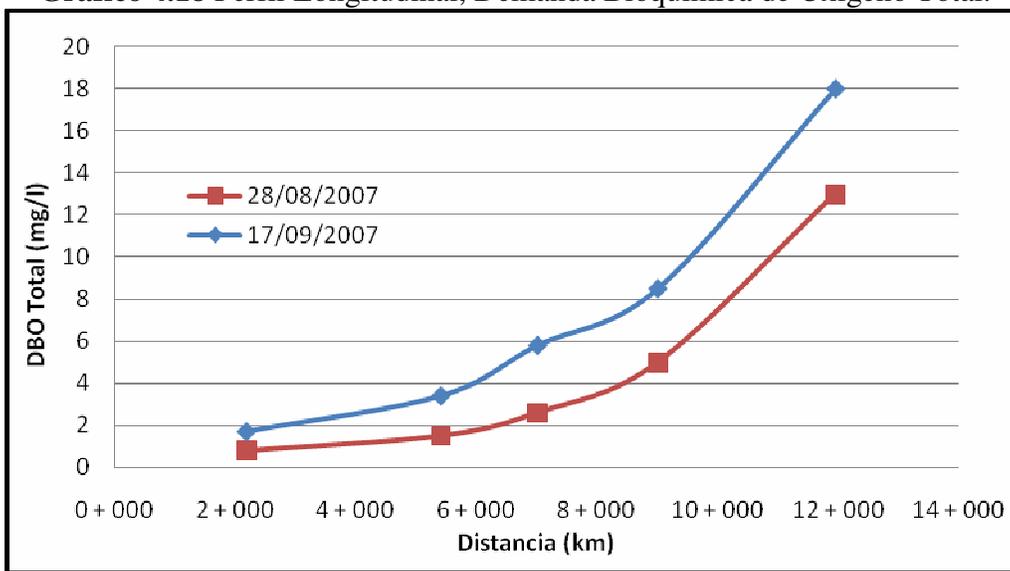
Las condiciones que afectan los niveles de oxígeno del cauce principal también afectan a los afluentes, ya que estos también son sistemas naturales, y no alcantarillas, por lo que se ven afectados por los cambios las fuentes naturales de reaeración.

4.2.4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno, Total y Disuelta

En el Gráfico 4.18 se observa el perfil longitudinal de la demanda bioquímica de oxígeno total (DBO Total) y en el Gráfico 4.19 los valores de los afluentes registrados en ambas campañas de medición. La DBO Total indica la cantidad de materia que se encuentra en el agua y que requiere de oxígeno para su degradación.

Según se observa en el Gráfico 4.18, la DBO Total aumenta rápidamente de valores inferiores a 4mg/l hasta casi 14mg/l para la primera campaña y valores desde los 6mg/l a los 18mg/l para la segunda campaña. Estos valores muestran la acelerada contaminación que sufre el cauce debido a las descargas generadas en la parte baja de la cuenca.

Gráfico 4.18 Perfil Longitudinal, Demanda Bioquímica de Oxígeno Total.



El comportamiento de las concentraciones de DBO Total en el cauce se conserva manteniendo un incremento acelerado en la parte baja de la cuenca, influenciado por las descargas de los afluentes.

Los valores muestran que en los afluentes de la parte alta de la cuenca (Q. Honda y Q. Quebradas) las descargas contaminantes en términos de DBO son bajas, debido principalmente a que estos afluentes drenan partes poco pobladas de la cuenca. Mientras que las concentraciones de los afluentes de parte baja de la cuenca, presentan valores de concentraciones bastante elevados que indican grados de contaminación severa.

El deterioro acelerado de la calidad del agua reflejada en concentración de DBO, genera que se incrementen los conflictos de uso-calidad conforme se avanza en la cuenca.

En los gráficos 4.20 y 4.21, se muestran las concentraciones de DBO Soluble para el cauce y los afluentes respectivamente. Estas concentraciones son ligeramente inferiores a las obtenidas para la DBO Total, ya que con esta se obtiene la Materia Orgánica Particulada (MOP) que se encuentra en el cauce y es una de las formas del carbono.

Gráfico 4.19 Aporte de los afluentes, Demanda Bioquímica de Oxígeno Total.

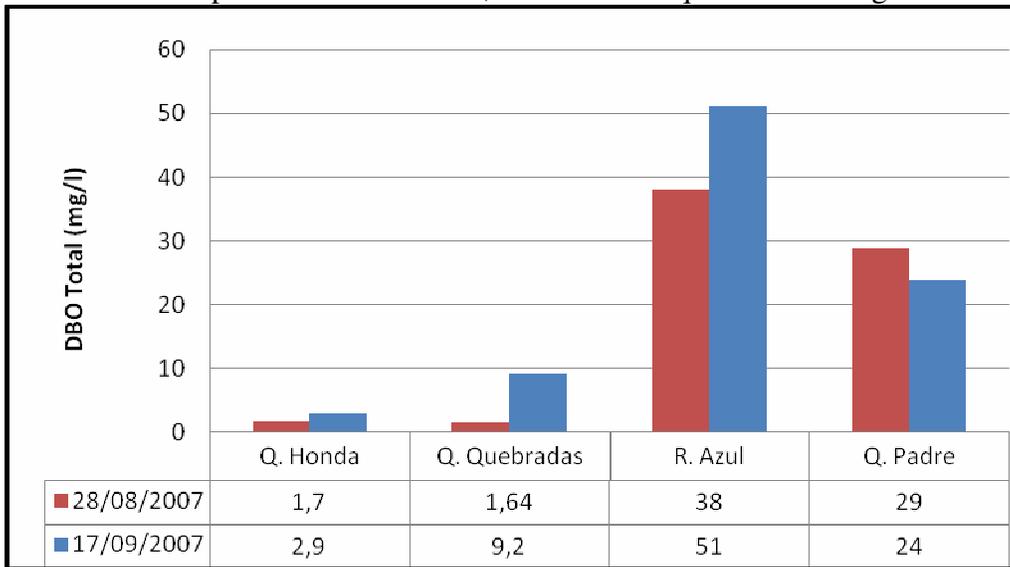
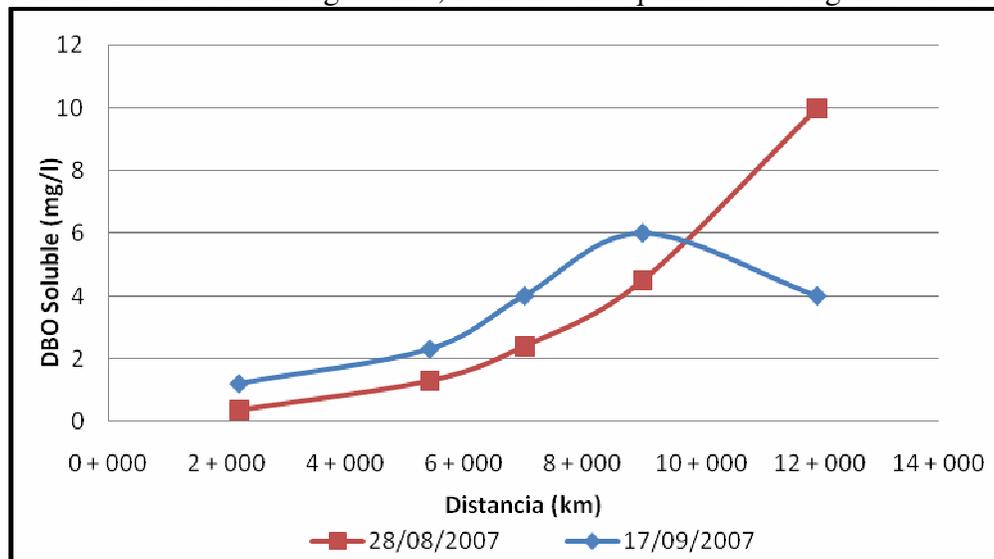


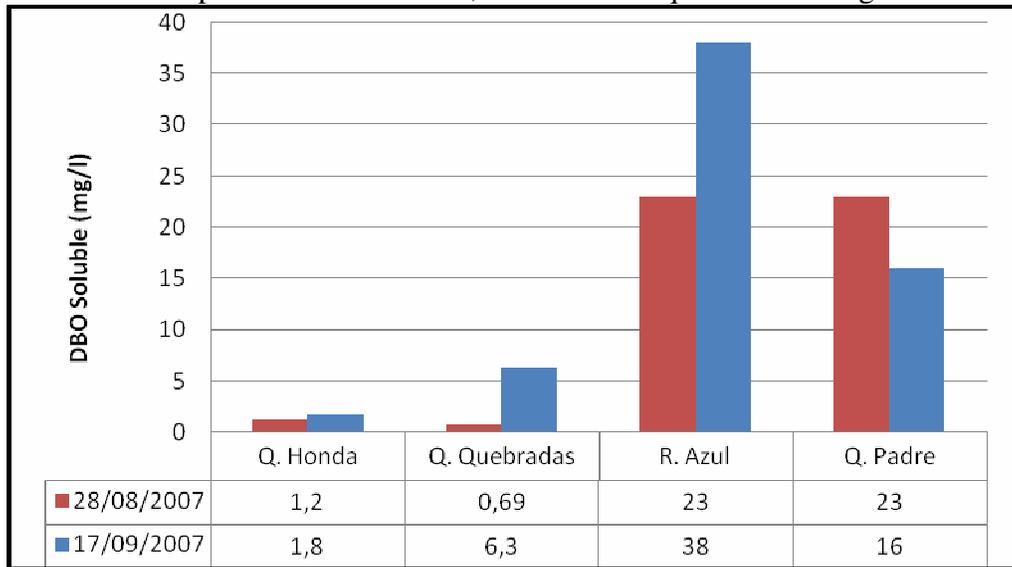
Gráfico 4.20 Perfil Longitudinal, Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble.



Los valores obtenidos muestran que la fracción de la DBO que resulta soluble, es superior a 60% en prácticamente todos los casos, lo que indica que es menor la cantidad de materia orgánica que estará sujeta a sedimentación con respecto a la que se encontrará en solución.

La MOP se obtiene de la diferencia entre la DBO Total y la DBO Soluble. Este tipo de forma del carbono, es modelada por medio de QUAL2K. Este modelo, además de esta forma, toma en consideración el carbono de descomposición lenta (DQO – DBO Total) y el carbono de descomposición rápida (DBO Total).

Gráfico 4.21 Aporte de los afluentes, Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble.

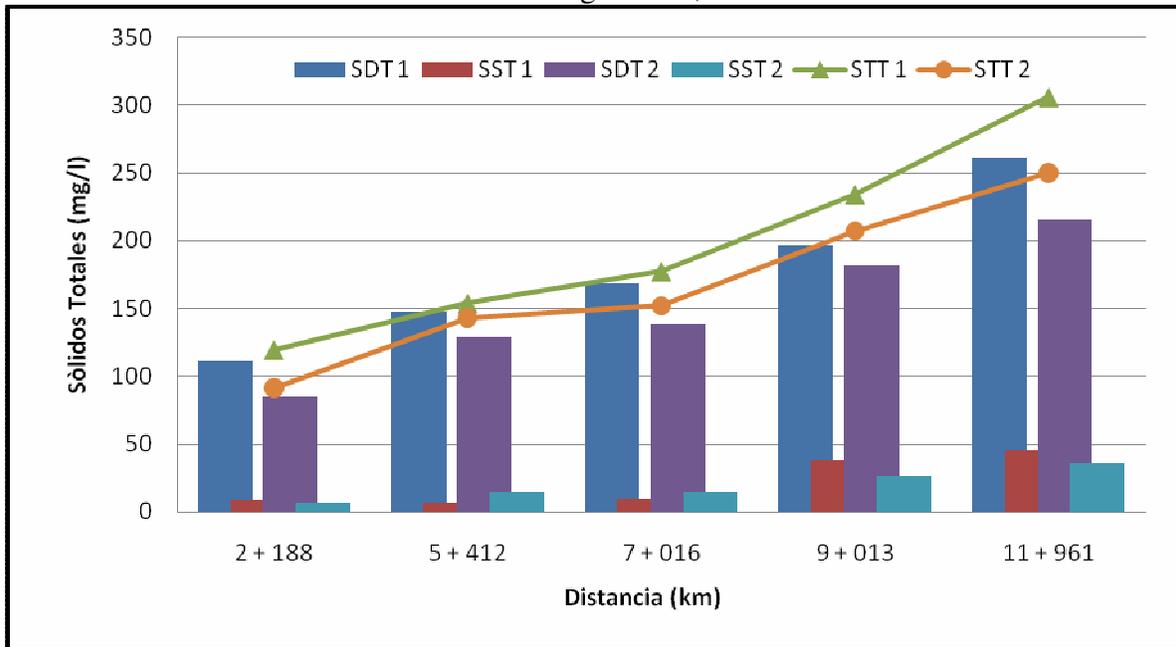


4.2.4.3 Sólidos Totales

El total de sólidos o Sólidos Totales Totales (STT) que se encuentran presentes en el agua ,están compuestos por Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Como se observa en el Gráfico 4.18 la concentración de sólidos aumenta, conforme se avanza, en casi tres veces las concentraciones iniciales presentes en la parte alta de la cuenca.

Las proporciones en las que se encuentran los distintos tipos de sólidos dentro del agua, son de entre 10 y 20% de sólidos suspendidos y el restante lo conforman los sólidos disueltos. Esta marcada proporción puede observarse en el Gráfico 4.22, que muestra los perfiles de sólidos totales con los aportes de cada uno de los tipos de sólidos. Los perfiles muestran, como la calidad del agua a lo largo del río se va degradando de manera tal que los valores de las concentraciones encontradas al final del río se triplican con respecto a las encontradas al inicio del río. En la parte alta de la cuenca, este comportamiento se observa en las dos campañas de medición. Este aumento en las concentraciones implica que se generen grandes conflictos de uso-calidad.

Gráfico 4.22 Perfil Longitudinal, Sólidos Totales.



Los perfiles de SST mostrados en el Gráfico 4.23 muestran cómo las concentraciones tienden a mantenerse prácticamente constantes en la parte alta de la cuenca, debido a que las descargas de las quebradas Honda y Quebradas no superan los 20 mg/l (ver Gráfico 4.24). Mientras que, al recibir la descarga de Río Azul, las concentraciones en el cauce principal aumentan en gran medida, siendo este afluente el que modifica más los valores de SST. En la parte baja de la cuenca, luego de recibir la descarga de la Quebrada Padre, el aumento que presentan los perfiles es leve. Esto porque los niveles de SST en el río, producto de las descargas anteriores, genera que la concentración de este afluente sea menor que el cauce principal en el momento de la descarga, situación que solo se presenta en este punto.

El Gráfico 4.24 muestra claramente como Río Azul presenta concentraciones de SST de hasta 20 veces los valores de los otros afluentes, los cuales mantienen aportes de SST en el mismo orden de magnitud (aproximadamente 15mg/l). Estos valores vuelven a mostrar las condiciones de contaminación severa de Río Azul, proveniente de descargas directas de aguas residuales sin ningún tratamiento, principalmente descargas cloacales.

Gráfico 4.23 Perfil Longitudinal, Sólidos Suspendedos Totales.

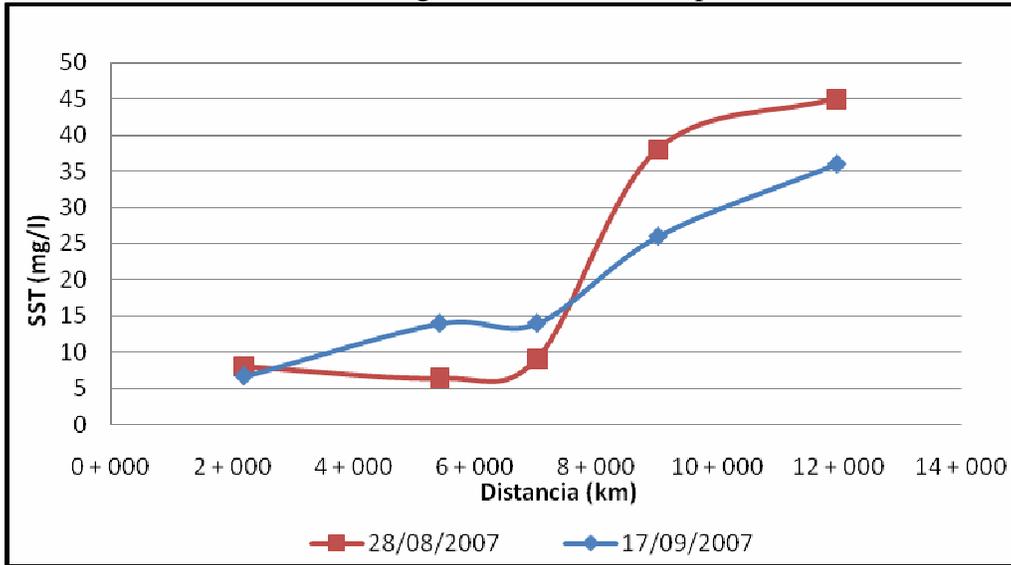
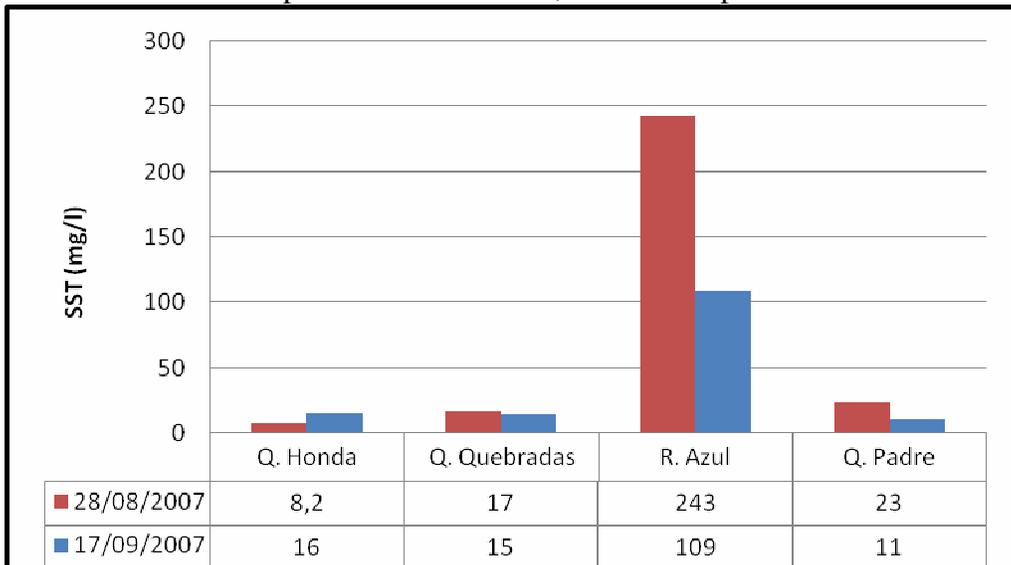


Gráfico 4.24 Aporte de los afluentes, Sólidos Suspendedos Totales.



Las concentraciones de SDT mantienen una tasa de aumento prácticamente constante a todo lo largo del río con comportamientos casi idénticos en ambas campañas de medición (ver Gráfico 4.25). Presenta concentraciones que rondan los 100mg/l en la parte alta y van aumentado hasta valores del doble al llegar a la confluencia con el Río Tiribí.

Gráfico 4.25 Perfil Longitudinal, Sólidos Disueltos Totales.

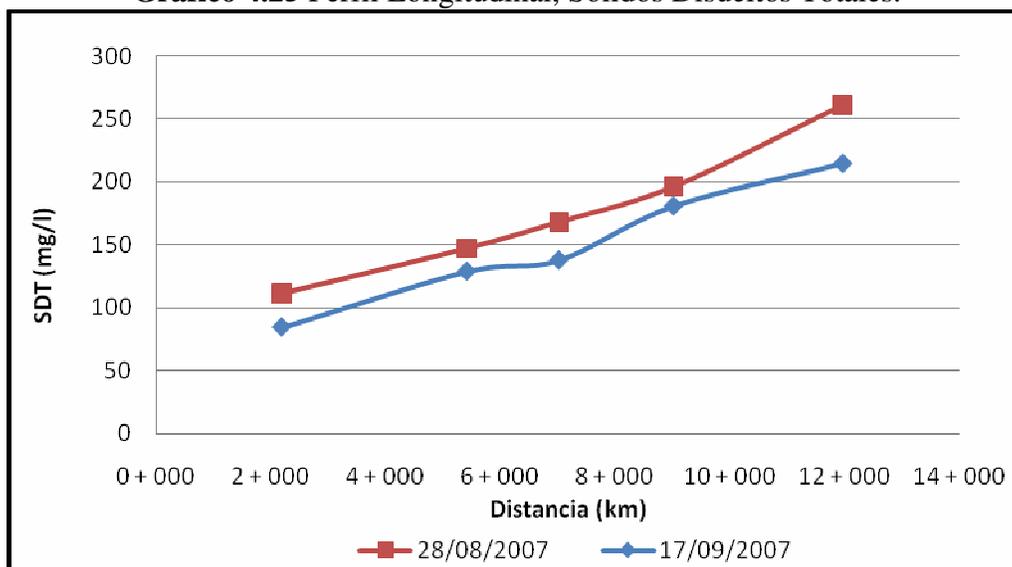
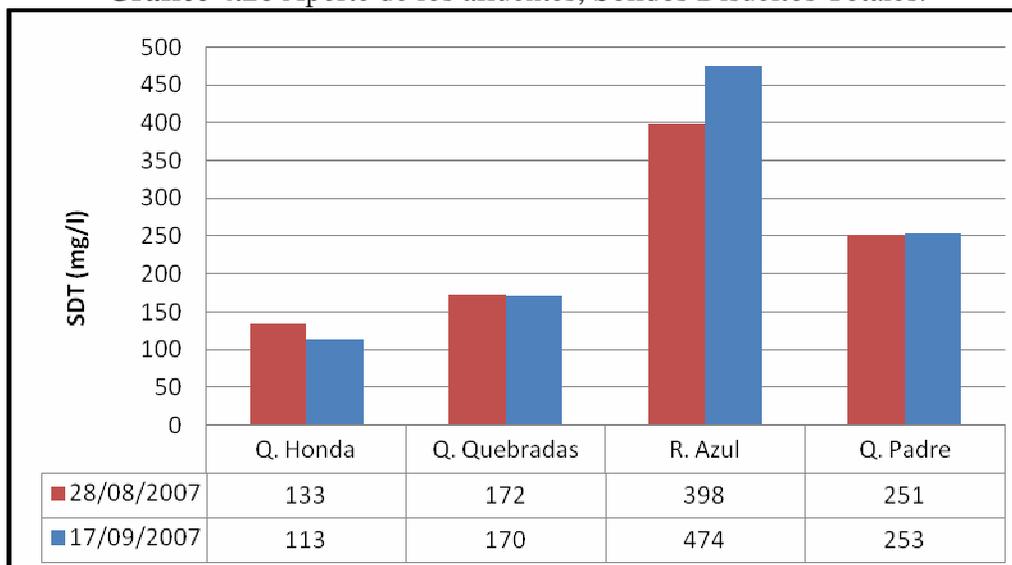


Gráfico 4.26 Aporte de los afluentes, Sólidos Disueltos Totales.

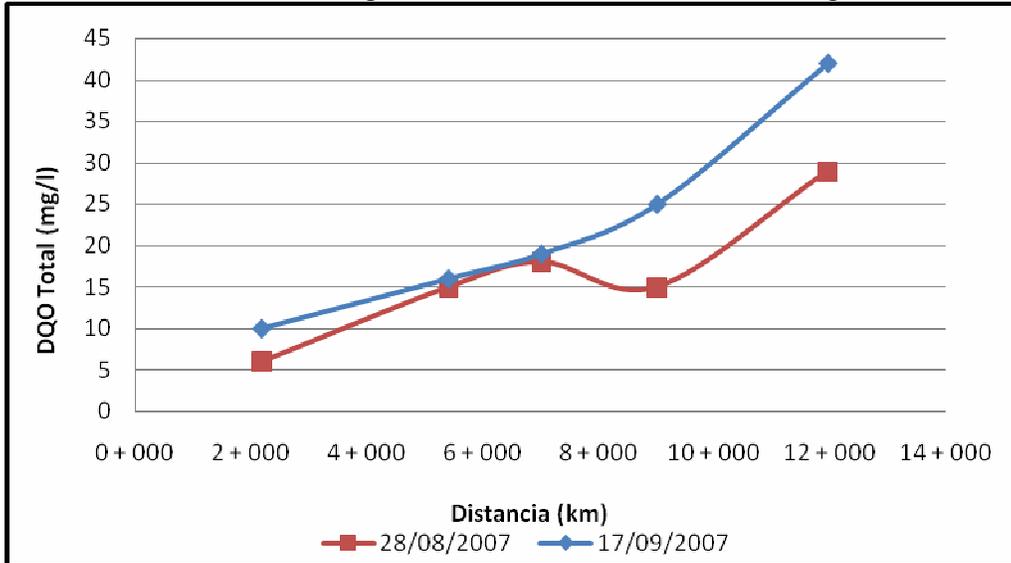


Los aportes de los afluentes con respecto a SST presentan valores superiores a los 100mg/l, siendo la Quebrada Honda la que presenta concentraciones menores junto con Quebrada Quebradas. Las concentraciones de los afluentes en el caso de los SDT siempre son iguales o mayores a las del cauce principal, situación que no se da con los SST.

4.2.4.4 Demanda Química de Oxígeno, Total y Soluble

La Demanda Química de Oxígeno (DQO Total) corresponde a los compuestos que demandan oxígeno en sus reacciones dentro del cuerpo de agua. Estos valores se mantienen bajos en la parte alta de la cuenca (por debajo de los 20mg/l). Luego en la parte baja las concentraciones han aumentado entre 4 y 5 veces los valores iniciales.

Gráfico 4.27 Perfil Longitudinal, Demanda Química de Oxígeno Total.



De forma similar para la DQO los afluentes de la parte alta presentan concentraciones bajas. Mientras que los valores de los dos afluentes finales presentan valores bastante elevados.

Las concentraciones de DQO soluble presentan valores que rondan el 50% de la concentración de la DQO total, lo que implica que parte de la demanda total de oxígeno se genera por sedimentación.

Gráfico 4.28 Aporte de los afluentes, Demanda Química de Oxígeno Total.

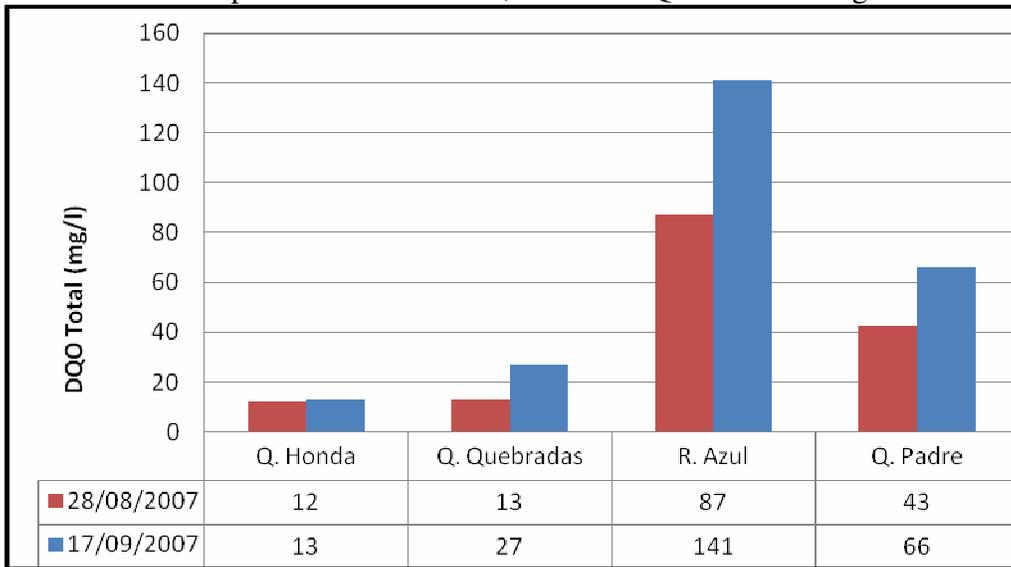


Gráfico 4.29 Perfil Longitudinal, Demanda Química de Oxígeno Soluble.

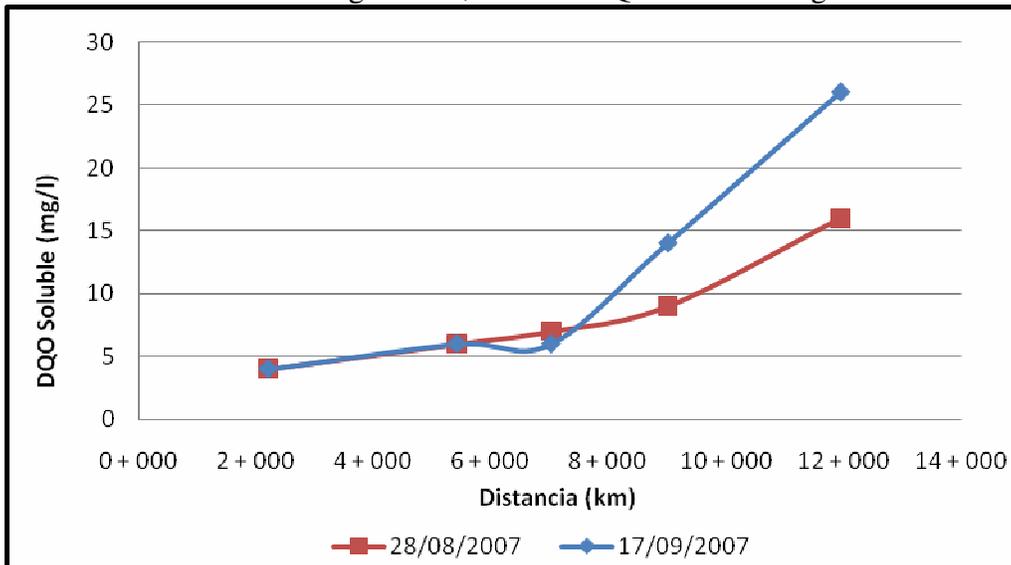
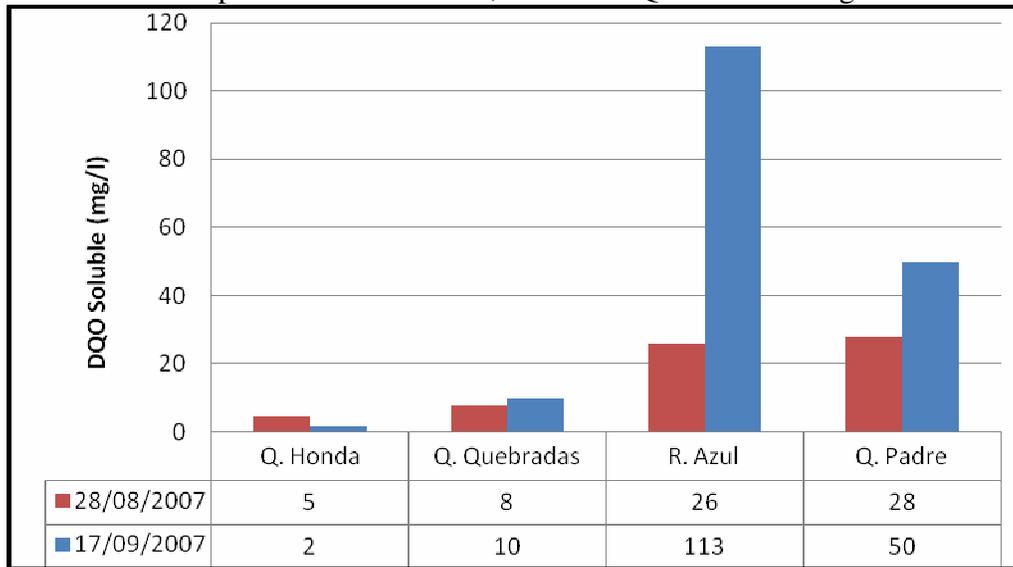


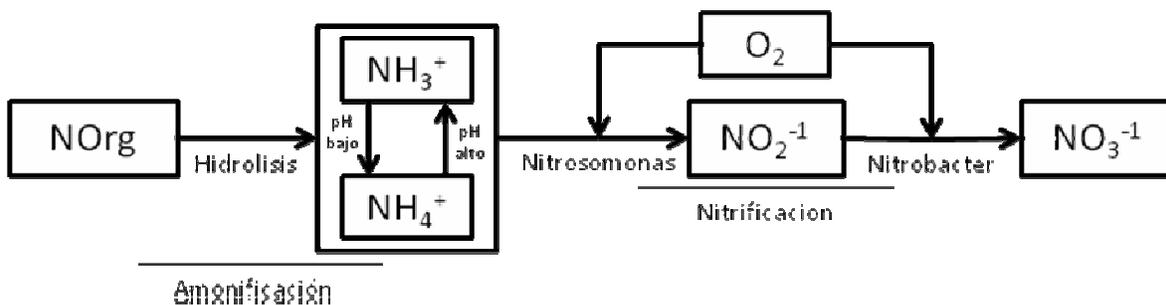
Gráfico 4.30 Aporte de los afluentes, Demanda Química de Oxígeno Soluble.



4.2.4.5 Nitrógeno

El nitrógeno dentro del agua se puede presentar en varias formas. De manera esquematizada se muestran las transformaciones que sufre el nitrógeno (ver Figura 4.7) debido a dos procesos: la amonificación y la nitrificación.

Figura 4.7 Transformaciones del Nitrógeno.



Fuente: Adaptado de Camacho, 2003

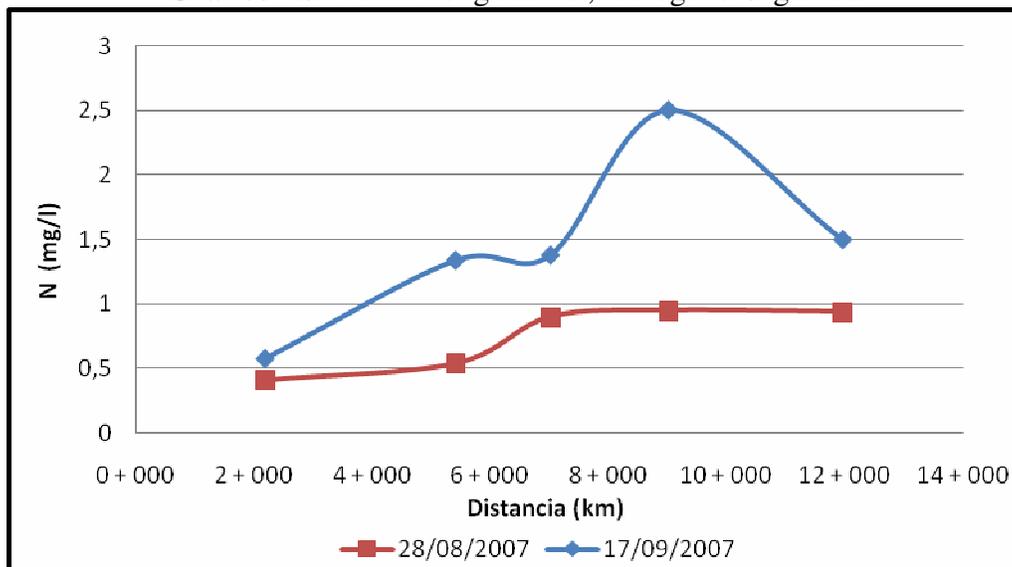
Como se muestra en la Figura 4.7, por medio de la hidrólisis, en la amonificación el nitrógeno orgánico (Norg) proveniente del agua residual se transforma a amonio (NH_4^+) en presencia de pH bajo y en amoníaco (NH_3^+) cuando el pH es alto. Luego las bacterias nitrosomonas transforman las formas anteriores en presencia de oxígeno (O_2) en iones de nitrito (NO_2^{-1}), los cuales de nuevo con oxígeno y bacterias nitrobacter, los convierten en iones nitrato (NO_3^{-1}).

Las transformaciones del nitrógeno, dependen en gran medida de las concentraciones de oxígeno presentes en el agua, ya que, por ejemplo, cuando se da la desnitrificación del nitrito en nitrógeno libre (N_2), se debe a que el agua presenta concentraciones de oxígeno muy bajas o anaeróbicas.

4.2.4.5.1 Nitrógeno Orgánico

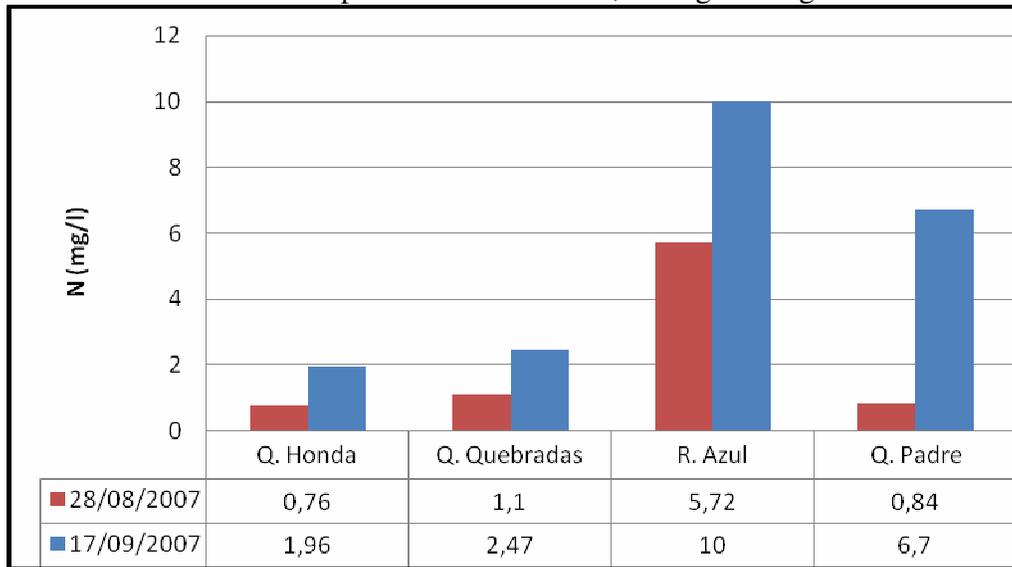
Las concentraciones nitrógeno orgánico tienen una ligera tendencia al aumento que se ve muy influenciada por la dilución que se da en el cauce principal. Para ambas campañas, se da el máximo de concentración en el tramo luego de la descarga del Río Azul y los valores tienden a disminuir en el tramo final como efecto de la dilución.

Gráfico 4.31 Perfil Longitudinal, Nitrógeno Orgánico.



Para los afluentes, las descargas de nitrógeno orgánico son incrementales con el Río Azul, siendo este el que más aporta en ambas campañas (concentraciones de hasta 10mg/l). Otro caso particular es el de la Quebrada Padre, en la cual los comportamientos varían significativamente entre campañas, ya que los valores de la segunda campaña (6.7mg/l) superan en casi ocho veces los valores de la primera campaña.

Gráfico 4.32 Aporte de los afluentes, Nitrógeno Orgánico.



4.2.4.5.2 Nitrógeno Amoniacal

El comportamiento de las concentraciones del nitrógeno amoniacal a lo largo del cauce muestra que en el río se presentan procesos de hidrólisis que logran convertir el nitrógeno orgánico, que se suma al nitrógeno amoniacal de las descargas de aguas residuales. (Ver Gráfico 4.33).

Los aumentos y disminuciones que se presentan en los perfiles, se deben en medida a los procesos de nitrificación y amonificación que se dan en conjunto, disminuyendo y aumentando las concentraciones respectivamente, dándose en el proceso demanda de oxígeno.

El comportamiento mostrado se debe principalmente a la variabilidad en las descargas de los afluentes, que se ven afectadas por las variaciones en el pH, ya que este genera que las transformaciones del nitrógeno orgánico producto de la amonificación generen NH_3 o NH_4 , dependiendo de los niveles del pH.

El comportamiento de los afluentes es variable y no se muestra ninguna tendencia marcada, ya que todos los afluentes, a excepción de la Quebrada Honda, presentan un comportamiento muy distinto entre una campaña de medición y la otra. Esta situación se puede deber a eventos puntuales que producen incrementos aislados y diferenciados en tiempo y espacio.

Gráfico 4.33 Perfil Longitudinal, Nitrógeno Amoniacal.

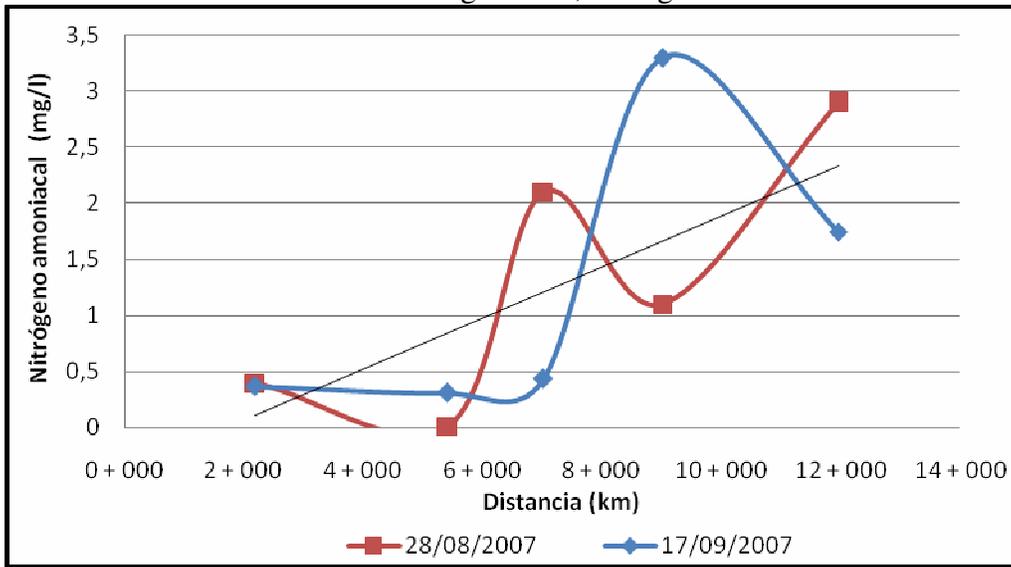
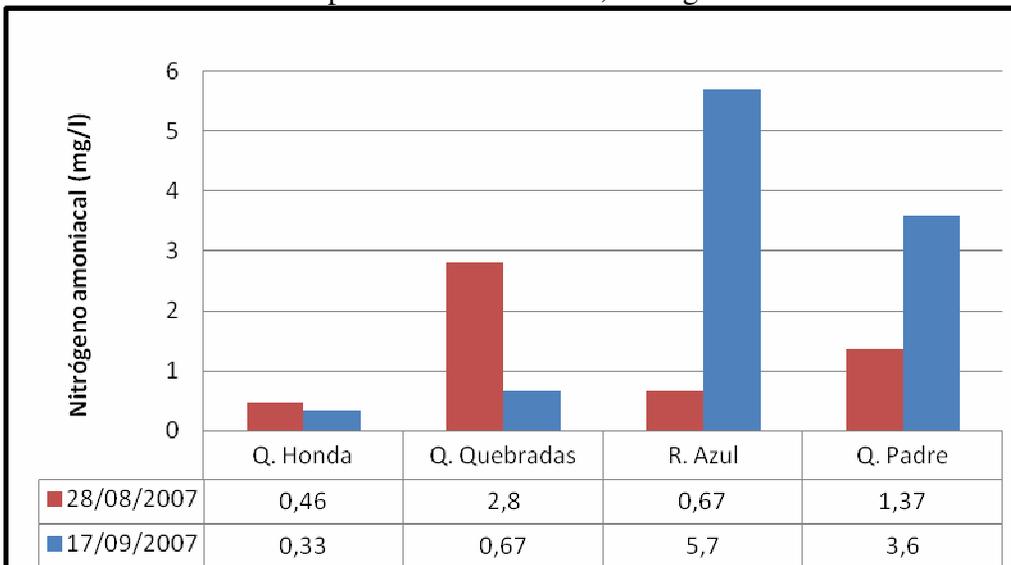


Gráfico 4.34 Aporte de los afluentes, Nitrógeno Amoniacal.



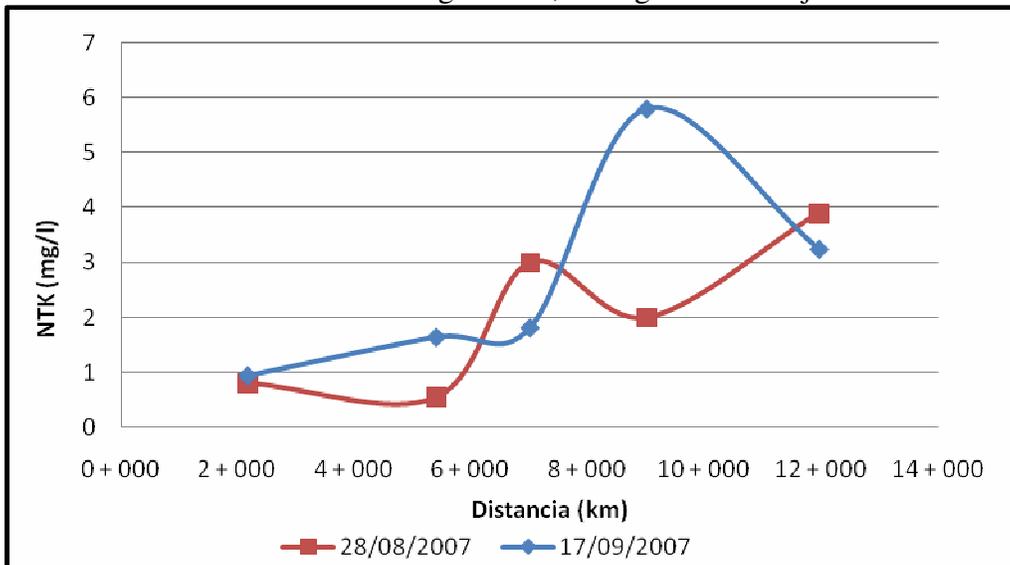
4.2.4.5.3 Nitrógeno Total Kjeldahl

La suma de nitrógeno orgánico y del ión amonio forma el Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), parámetro que se relaciona con la demanda de oxígeno de los distintos tipos de formas de nitrógeno. Se tiene que para un gramo de NTK se demandan 4.57g de oxígeno (Chapra, 1997).

Al analizar los perfiles de NTK del Gráfico 4.35, se puede observar que para la primera campaña, el incremento mostrado en la parte media, indica presencia de procesos de nitrificación,

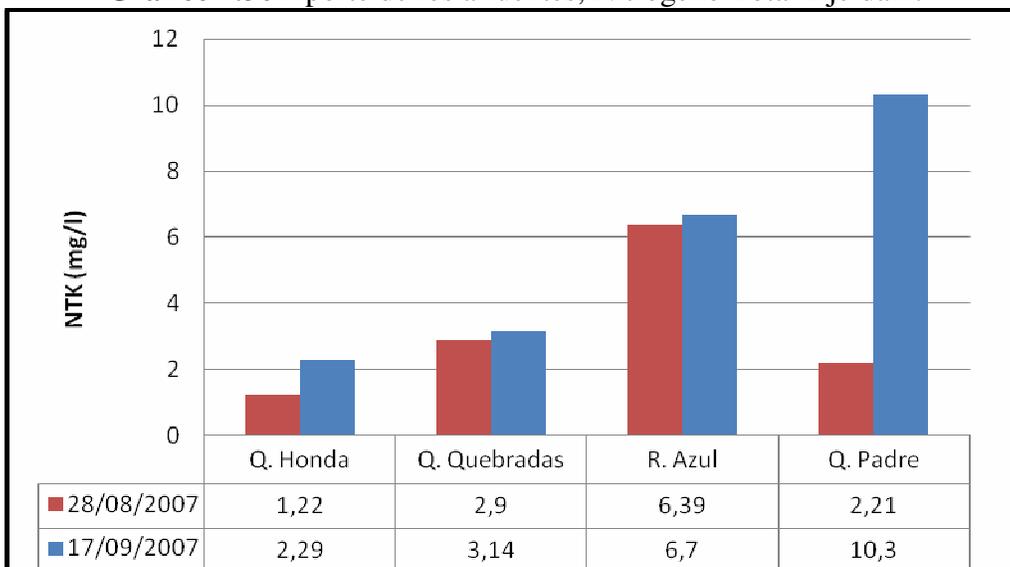
mientras que el descenso al final indica posible desnitrificación. Para la segunda campaña se da una mezcla de ambos procesos a lo largo del río.

Gráfico 4.35 Perfil Longitudinal, Nitrógeno Total Kjeldahl.



Los afluentes presentan un comportamiento de crecimiento marcado al avanzar en la cuenca y con comportamiento muy similar en ambas campañas a excepción de Quebrada Padre.

Gráfico 4.36 Aporte de los afluentes, Nitrógeno Total Kjeldahl.



4.2.4.6 Nitratos

Los perfiles de nitratos se muestran en el Gráfico 4.37. La tendencia para ambas campañas es de un aumento sostenido, marcado en incrementos pronunciados en la parte media de la cuenca debido a los aportes de los afluentes. Los valores van desde 1 mg/l en la parte alta de la cuenca, hasta valores de casi 4mg/l para la primera campaña y de casi 2.5mg/l para la segunda campaña. Estos valores denotan procesos de nitrificación que demandan oxígeno.

Gráfico 4.37 Perfil Longitudinal, Nitratos.

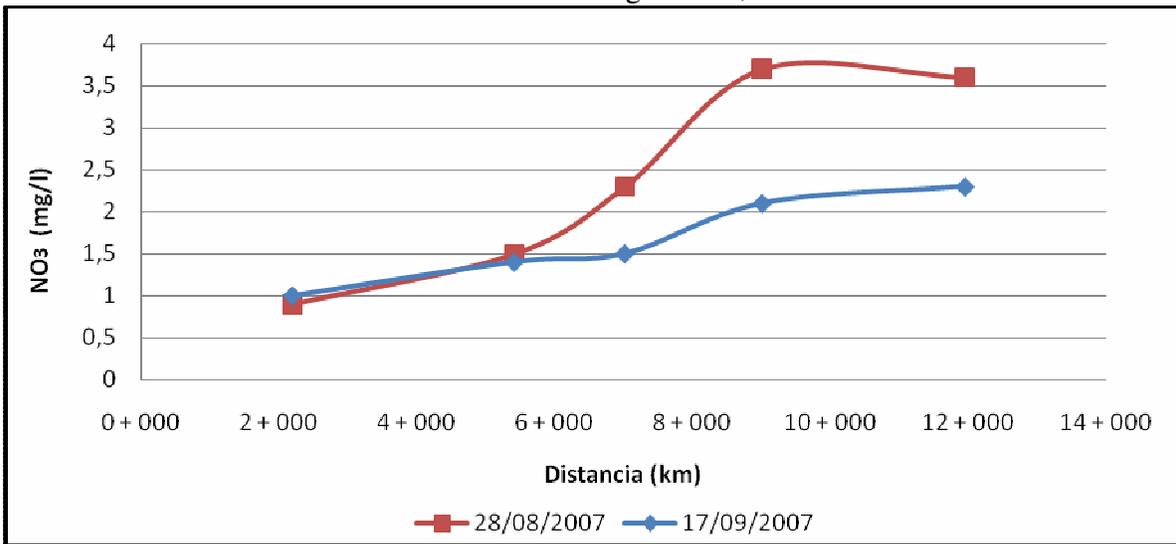
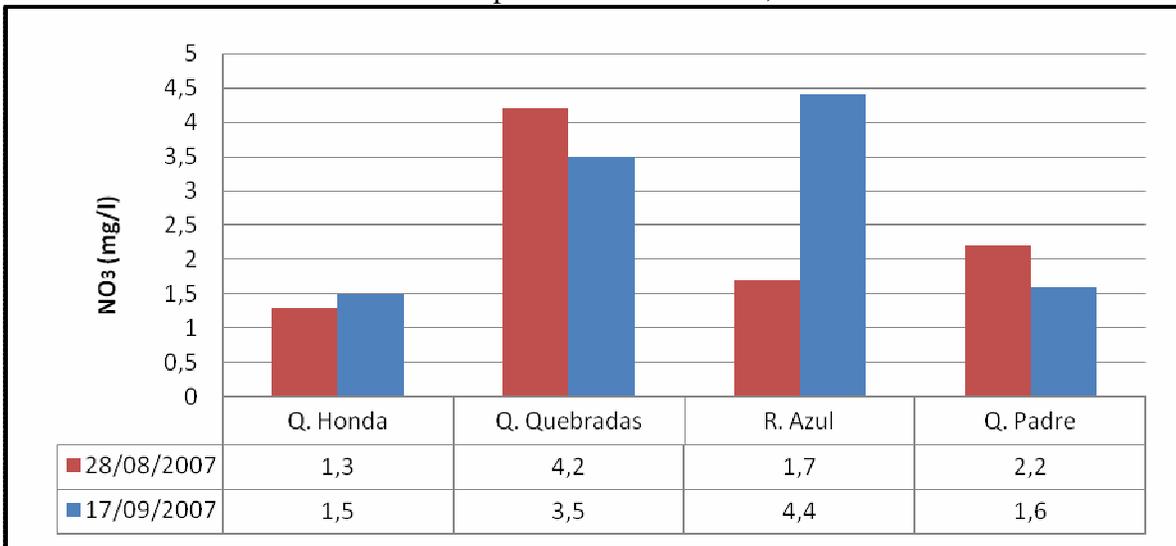


Gráfico 4.38 Aporte de los afluentes, Nitratos.



Los aportes de los afluentes se encuentran en un rango que va desde 1.2mg/l hasta 4.4mg/l (ver Gráfico 4.38), brindándose el aporte más importante en la parte media de la cuenca.

4.2.4.7 Fósforo

Las formas principales de fósforo son: el fósforo orgánico y el fósforo inorgánico o fósforo soluble reactivo.

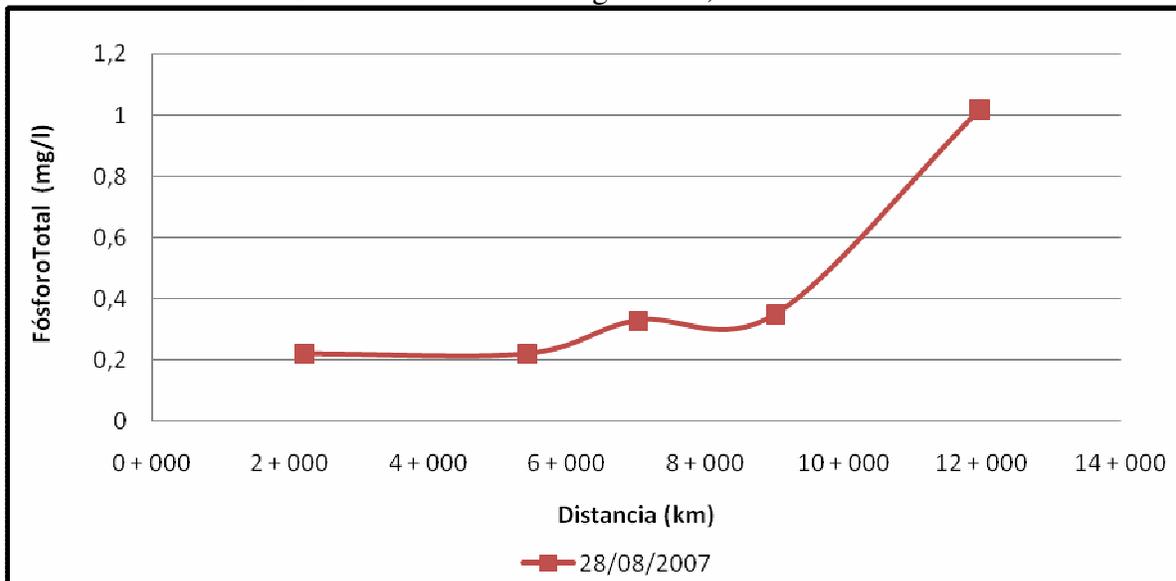
El fósforo como determinante de calidad de agua es importante, pues como nutriente afecta la cadena trófica. El fósforo afecta indirectamente el oxígeno de la corriente, generado en el proceso de fotosíntesis por plantas acuáticas fijas y flotantes.

4.2.4.7.1 Fósforo total

El fósforo total está formado por el fósforo orgánico más el fósforo soluble. Elevadas concentraciones de fósforo y nitrógeno en presencia del oxígeno causan eutrofización, fenómeno que deteriora la calidad del agua, ya que afecta los procesos de reaeración debido a la descomposición de las plantas muertas (materia orgánica).

En general, en el sistema natural analizado, no se presentan las condiciones necesarias para que se den procesos de eutrofización, ya que las concentraciones de fósforo son bastante bajas y el río presenta velocidades altas al ser un río de montaña, lo que dificulta la difusión de plantas.

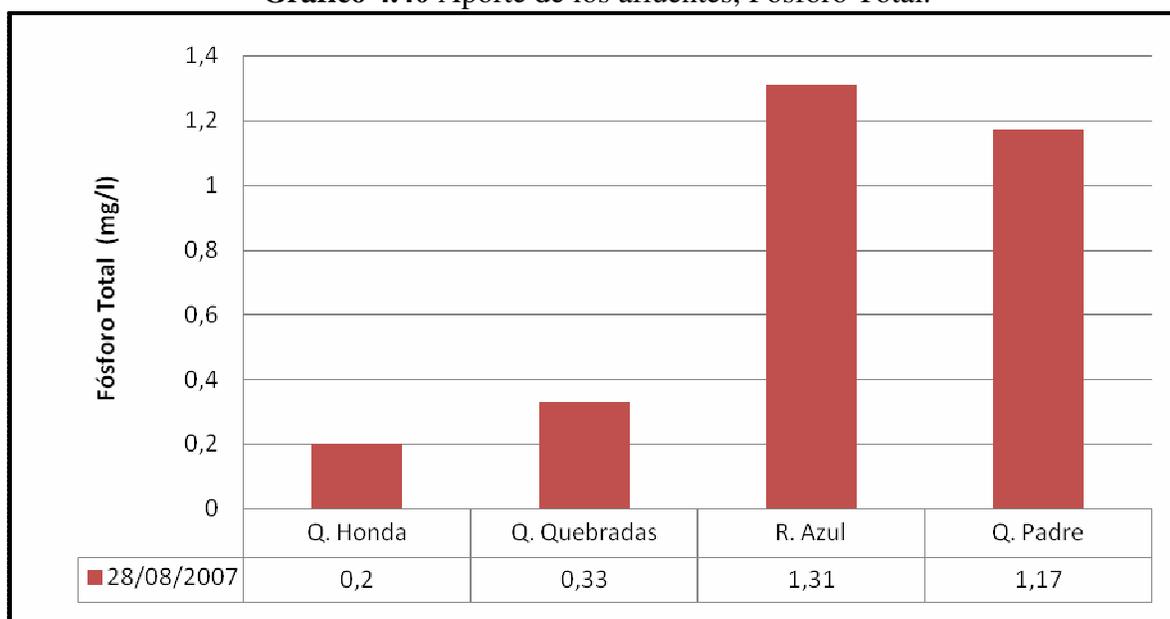
Gráfico 4.39 Perfil Longitudinal, Fósforo Total.



En este proyecto, solo se obtuvieron resultados de fósforo total en la primera campaña de medición. Esta campaña muestra un perfil de fósforo total que se mantiene prácticamente constante (ver Gráfico 4.39) en la parte alta y media de la cuenca, debido a aportes bastantes pequeños de los afluentes (ver Gráfico 4.40). Además, presenta un aumento en la parte baja de la cuenca debido a los aportes de los dos últimos afluentes.

Los valores de concentración de fósforo obtenidos, tanto para el cauce principal como para los afluentes, son bastante bajos y alcanzan valores máximos de poco más de 1mg/l.

Gráfico 4.40 Aporte de los afluentes, Fósforo Total.

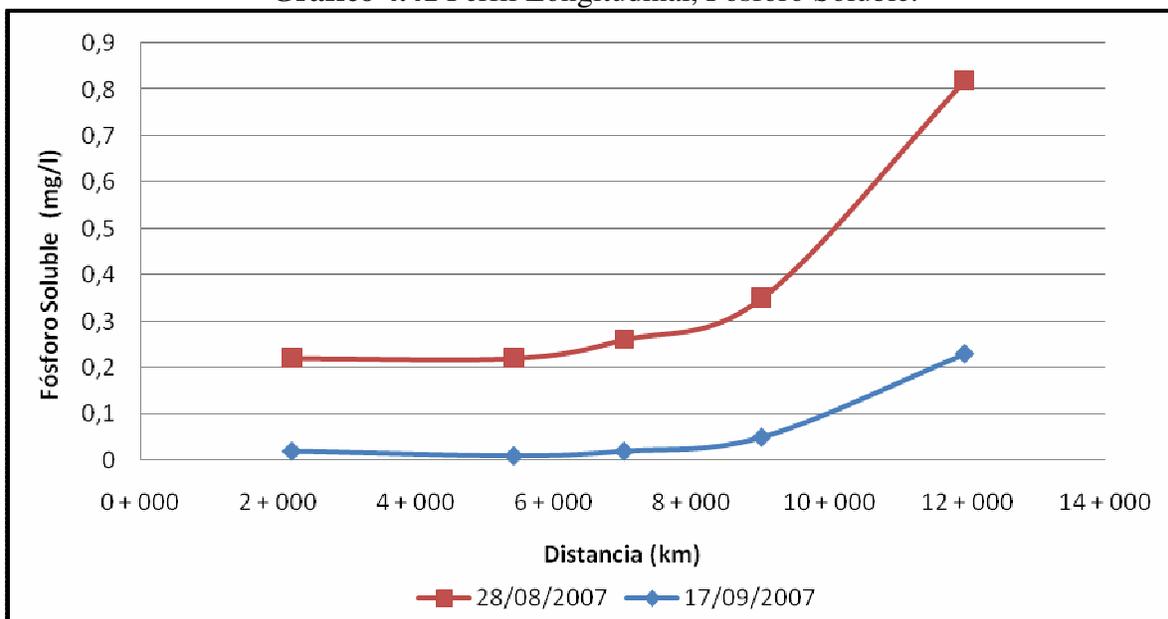


4.2.4.7.2 Fósforo Soluble Reactivo

Al fósforo las plantas lo asimilan de mejor manera cuando se encuentra en su forma de fósforo inorgánico o soluble reactivo. La principal fuente de fósforo soluble son los vertimientos con residuos de detergentes.

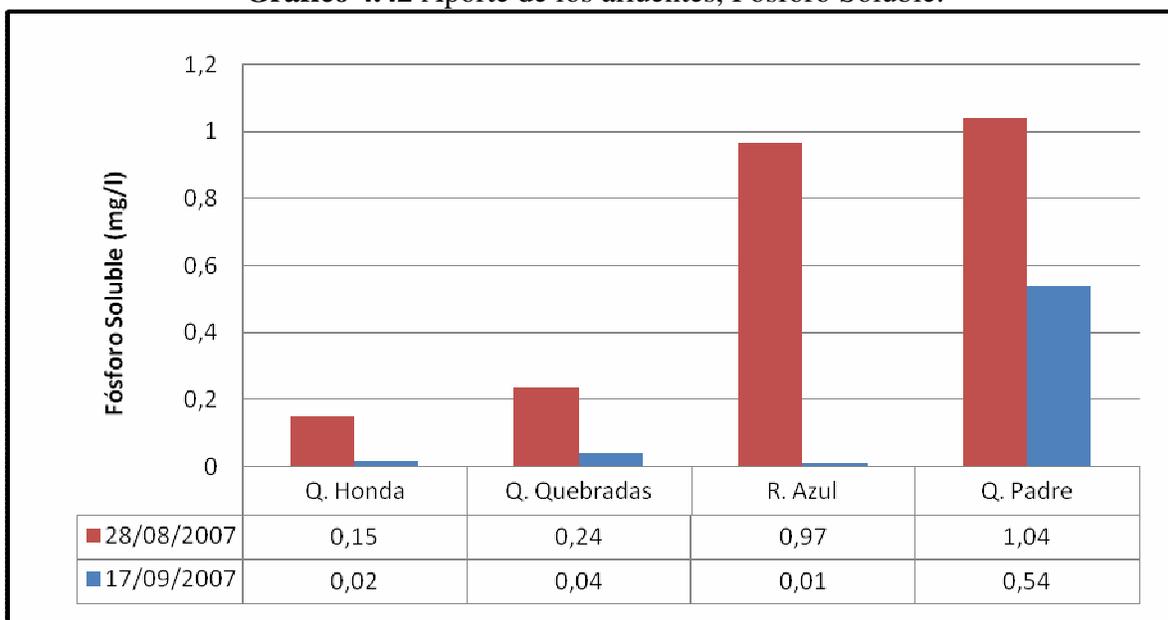
La tendencia de los perfiles de fósforo soluble es similar para ambas campañas, ya que se mantienen constantes en la parte baja y media de la cuenca y aumentan al final, con la gran diferencia de que los valores de la segunda campaña son casi despreciables.

Gráfico 4.41 Perfil Longitudinal, Fósforo Soluble.



Los aportes de los afluentes presentan una variabilidad muy grande en las concentraciones entre una campaña y otra, al igual que los perfiles de cauce.

Gráfico 4.42 Aporte de los afluentes, Fósforo Soluble.

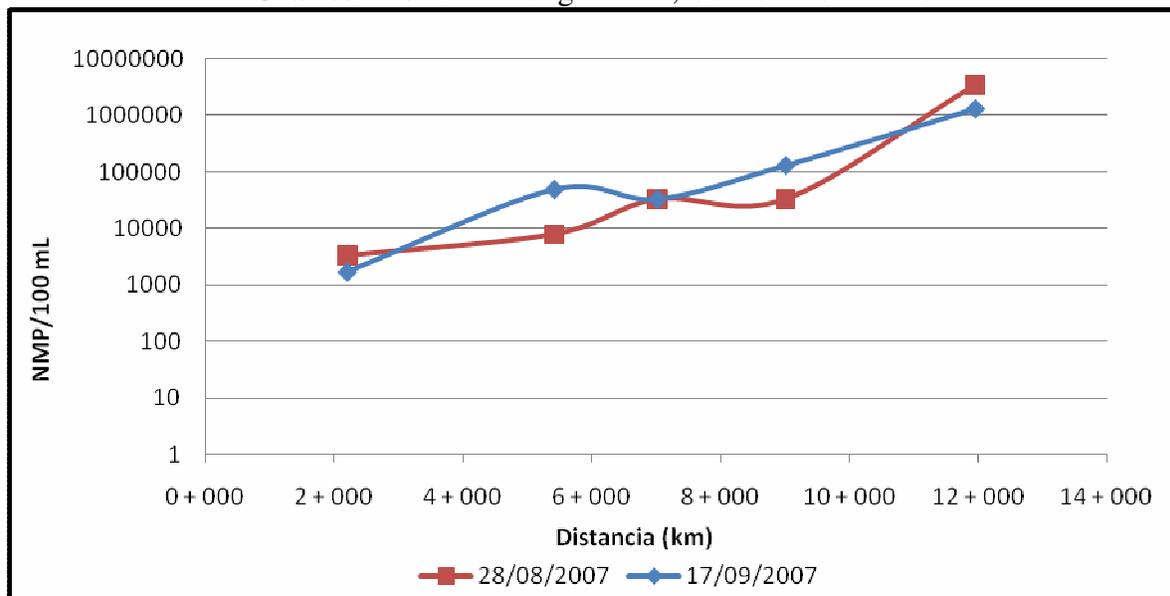


4.2.4.8 Coliformes fecales

Los grados de contaminación bacteriológica medidos por medio de coliformes fecales (ver gráficos 4.43 y 4.44) son bastante elevados, con concentraciones tales que generan que el río se convierta en una amenaza para la salud de los habitantes que se encuentran en los márgenes del río. Esto a causa de los elevadísimos valores de agentes patógenos presentes.

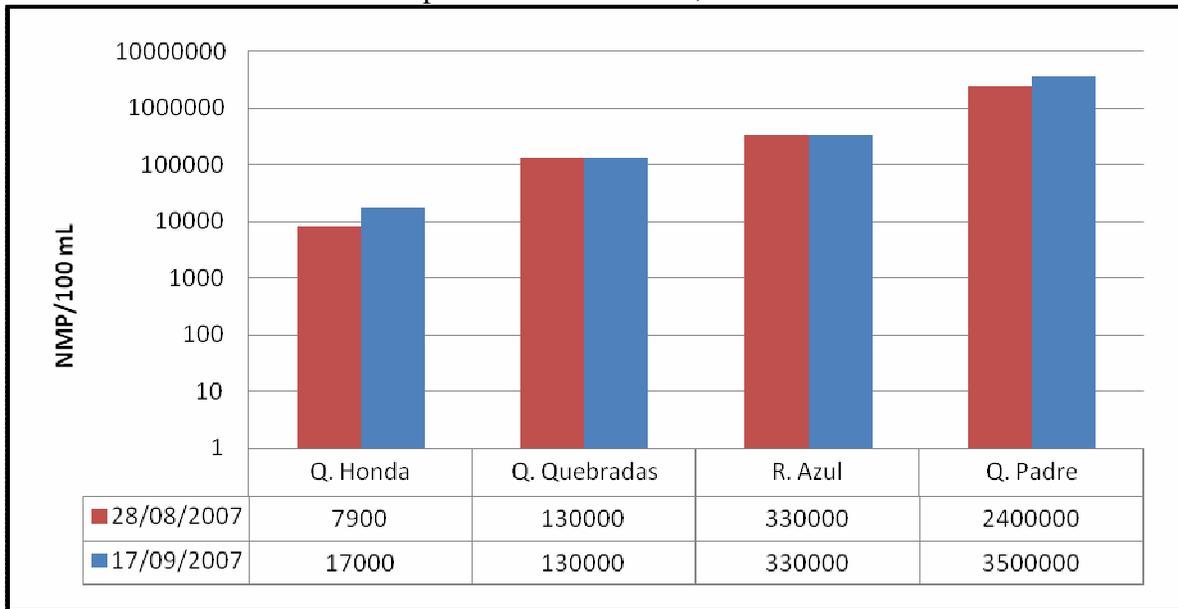
Las concentraciones aumentan constantemente, desde valores cercanos a los 5000 NMP/100ml en la parte alta de la cuenca, hasta valores superiores al millón de NMP/100ml, alcanzados en la parte baja de la cuenca. Estos valores generan que se den conflictos uso-calidad, limitando los usos del recurso al uso hidroeléctrico con limitaciones, impidiendo su uso en riego, acuicultura y demás actividades.

Gráfico 4.43 Perfil Longitudinal, Coliformes Fecales.



Los valores de los afluentes son bastante elevados y muestran una tendencia al aumento conforme se avanza en la cuenca.

Gráfico 4.44 Aporte de los afluentes, Coliformes Fecales.



4.2.4.9 Escherichia Coli

En los gráficos 4.45 y 4.46 se presentan el perfil longitudinal y los aportes de los afluentes, respectivamente, en materia de los valores de niveles de la bacteria Escherichia coli (E. Coli) presentes en el río.

El comportamiento de los valores de E. Coli es muy similar al mostrado por los coliformes fecales.

Gráfico 4.45 Perfil Longitudinal, E. Coli.

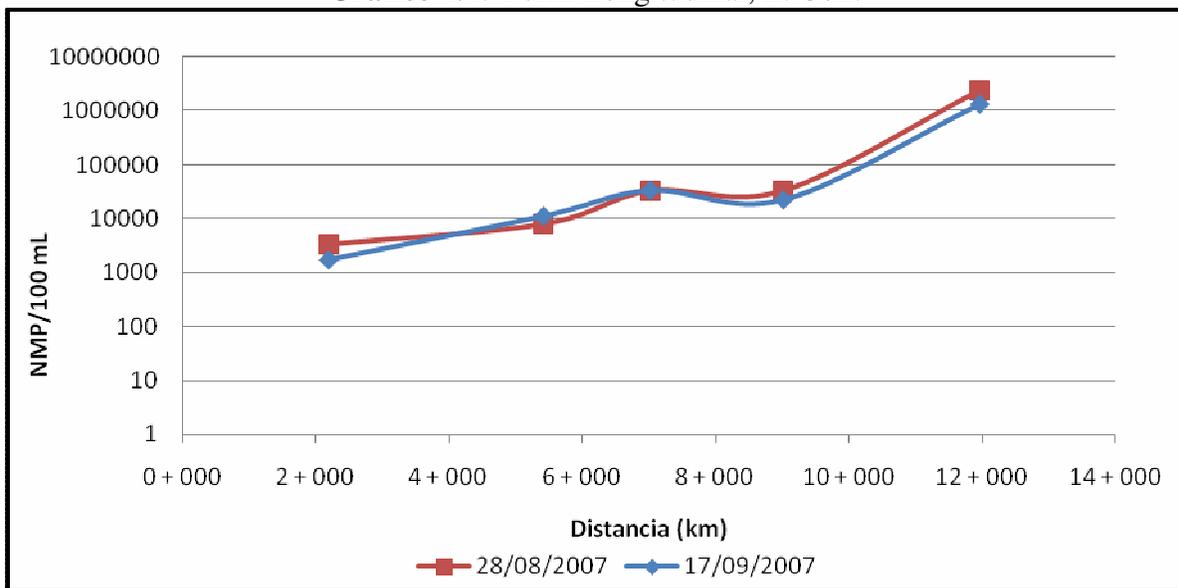
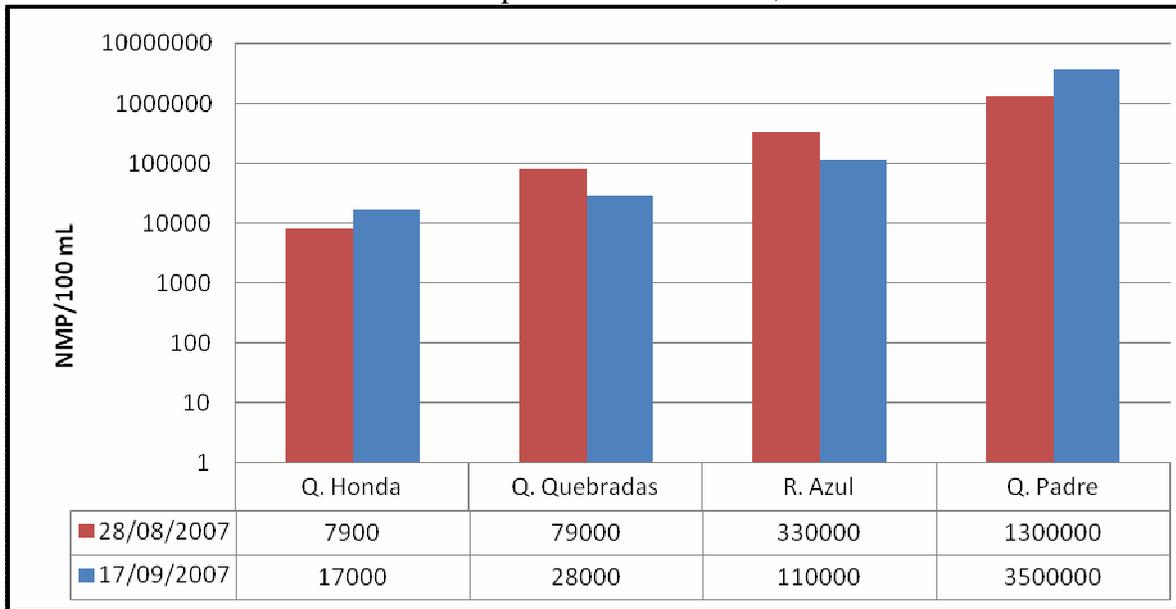


Gráfico 4.46 Aporte de los afluentes, E. Coli.



4.2.4.10 Alcalinidad

La capacidad del agua para neutralizar ácidos se conoce como alcalinidad, por lo que aguas con alcalinidades muy bajas no tienen capacidad para oponerse a la acidificación (disminución de pH).

Los valores obtenidos para la alcalinidad, tanto del cauce principal como de los afluentes, clasifican el agua como muy alcalina, ya que en general presenta concentraciones mayores a los 75 mg/l.

En general, los procesos que se dan dentro del agua afectan la alcalinidad generando aumentos y disminuciones. Entre los procesos que producen aumento se encuentran: la desnitrificación y la hidrólisis del nitrógeno orgánico, entre otros. Algunos procesos que provocan una disminución de la alcalinidad son: la nitrificación y la hidrólisis del fósforo orgánico (Chapra, 1997).

Gráfico 4.47 Perfil Longitudinal, Alcalinidad.

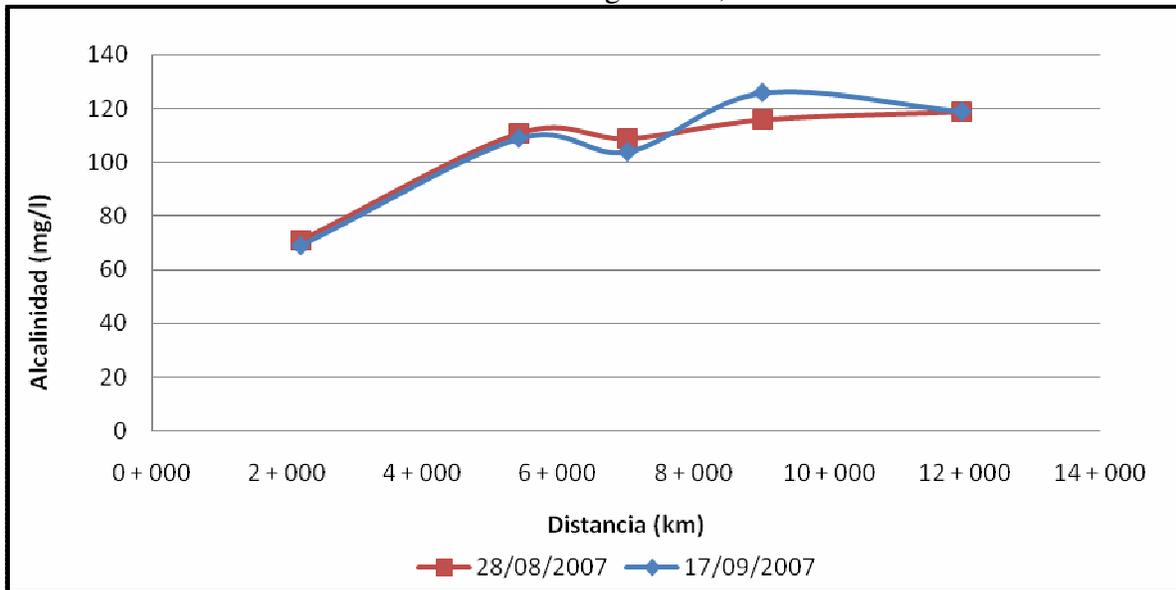
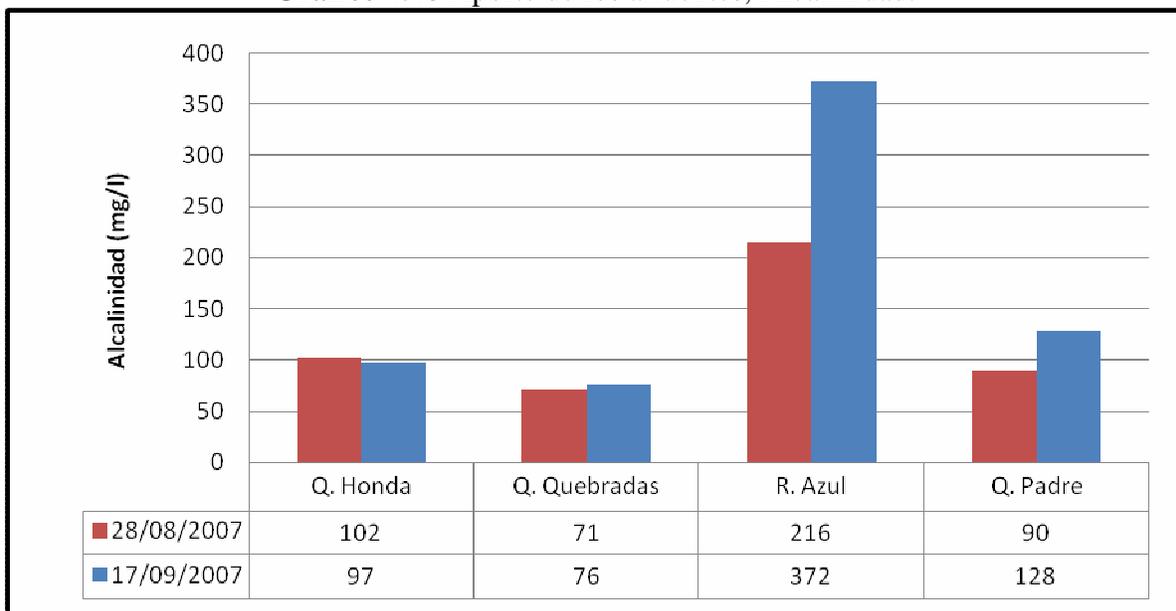


Gráfico 4.48 Aporte de los afluentes, Alcalinidad.



4.2.4.11 Dureza Total

La dureza es propia a cada lugar, ya que depende del tipo de rocas del suelo. Este es un parámetro de calidad del agua potable principalmente para sistemas de abastecimiento de agua; debido a que la dureza, depende de la cantidad de iones calcio y magnesio en disolución presentes

en el agua, los cuales forman precipitados en la interacción con el jabón, lo que genera pérdida del lavado.

Los valores obtenidos para la dureza, tanto del cauce principal como de los afluentes, clasifican el agua como aguas ligeramente duras, ya que, en general, presenta concentraciones entre los 50-100 mg/l de carbonato cálcico.

Gráfico 4.49 Perfil Longitudinal, Dureza Total.

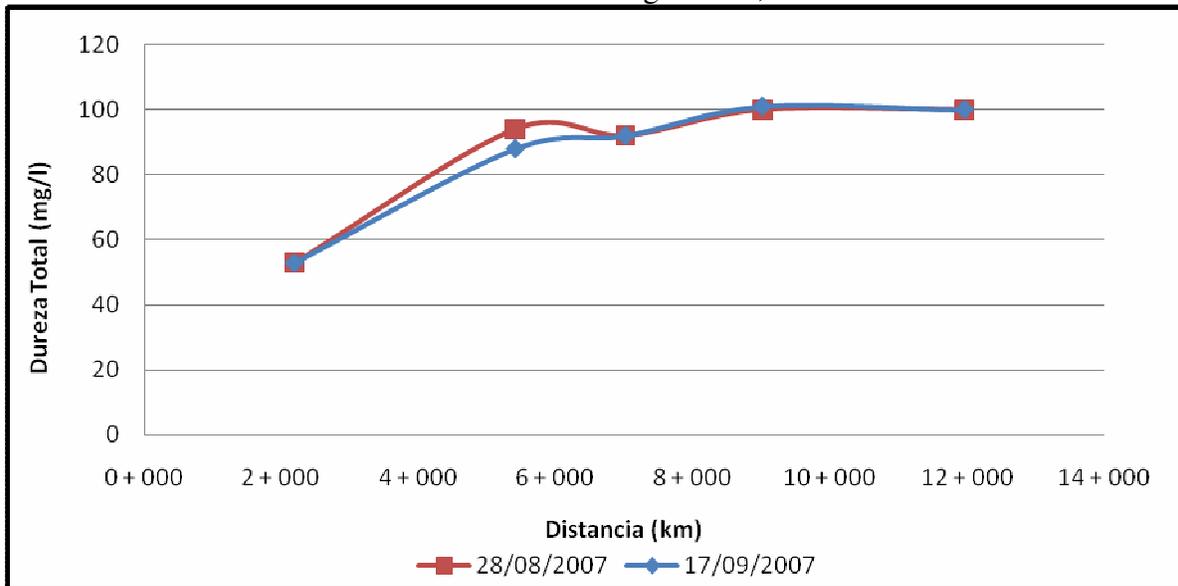
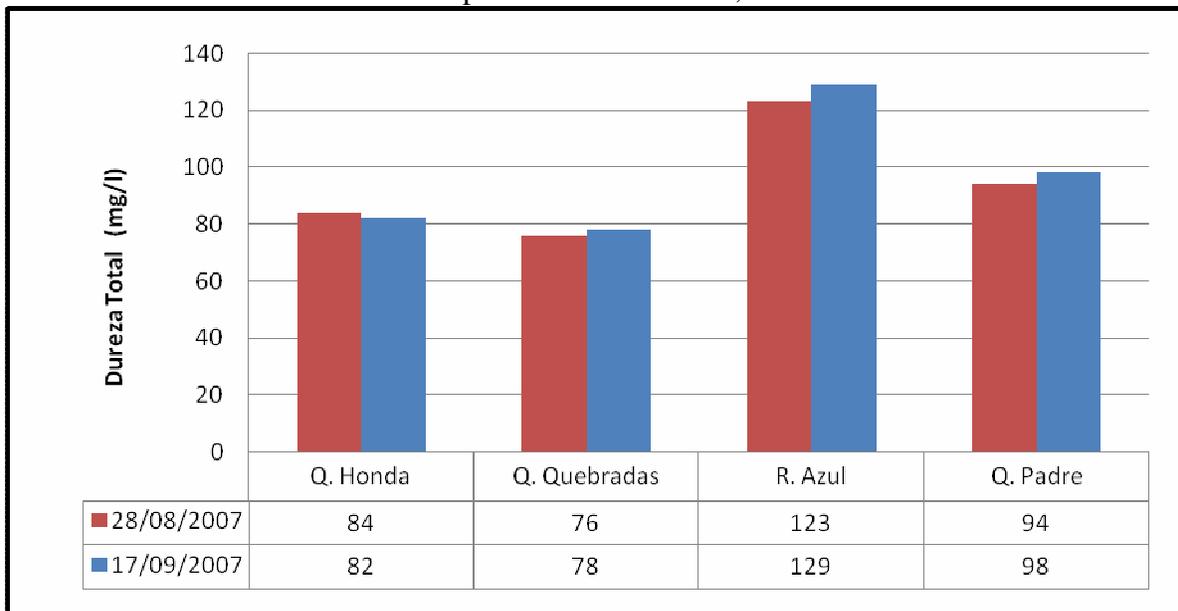


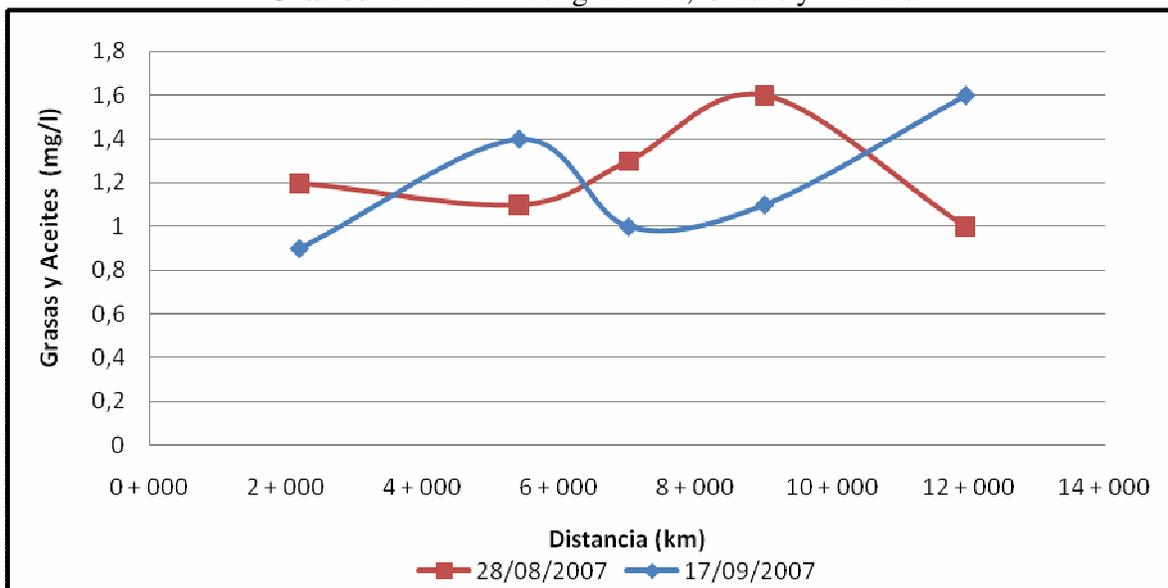
Gráfico 4.50 Aporte de los afluentes, Dureza Total.



4.2.4.12 Grasas y Aceites

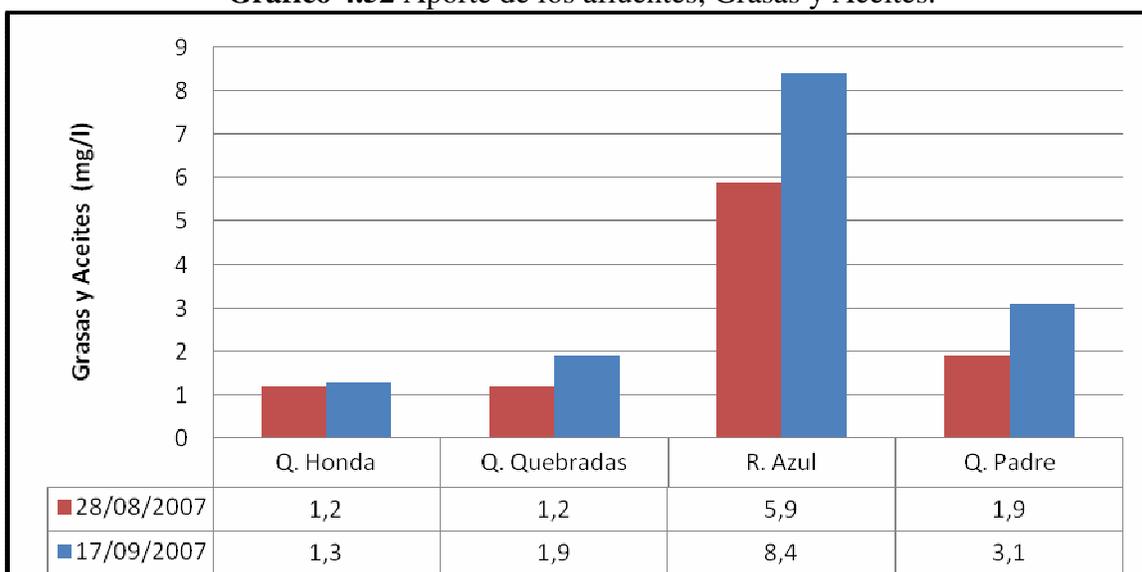
Las grasas y aceites no se desean en el agua. En general, se tiene que los valores obtenidos para este río son bajos, por lo que no se generan grandes conflictos uso-calidad del agua.

Gráfico 4.51 Perfil Longitudinal, Grasas y Aceites.



La situación con los afluentes es distinta principalmente en Río Azul y Quebrada Padre, ya que estos presentan valores mayores, por lo que se limitarían sus usos debido a conflictos de uso-calidad.

Gráfico 4.52 Aporte de los afluentes, Grasas y Aceites.



CAPITULO 5: Modelación

En este capítulo, se describe el trabajo de modelación de la calidad del agua del Río Damas, realizado con base en el trabajo preliminar (estudio de la zona) y en el trabajo de campo (campañas de medición), así como los resultados de laboratorio.

La modelación se realiza por medio de QUAL2K, el cual es un libro de Excel que está programado en Visual Basic, el cual contiene varias hojas para el ingreso de los datos. El modelo genera diferentes resultados, que muestra en diferentes hojas electrónicas dentro del libro electrónico.

5.2. Metodología

En este apartado, se describen los pasos a seguir y las consideraciones a tomar para modelar la calidad del agua del Río Damas.

5.2.1. Formulación numérica

Al escoger el modelo, se parte del supuesto de que tiene soluciones analíticas y cerradas para los casos en estudio, ya que ha sido utilizado de manera reiterada y el código ha sido verificado en diferentes ocasiones mediante pruebas de pos-modelación y ejemplos sintéticos.

La capacidad de asimilación, de agua residual que tiene una corriente, la evalúa el modelo mediante la simulación de varios indicadores de calidad del agua. Para lograr esto, utiliza una solución en diferencias finitas de las ecuaciones de advección y dispersión, tanto de masa como de reacción. Esta solución considera el flujo en estado permanente.

Puesto que el modelo utiliza el método de diferencias finitas, se debe considerar el número de Péclet, el cual es de gran importancia en la solución numérica. A través de éste, se puede hacer un análisis de la relación que existe entre los términos advectivo y difusivo. A partir de ello, se puede hacer el análisis de los problemas de inestabilidad en la ecuación de transporte cuando hay advección (Rosas, 2007). Para el caso del modelo QUAL2K el número de Péclet, debe ser menor que 2 ($Pe < 2$), para que no se genere inestabilidad en la solución numérica.

5.2.2. Conceptualización

Se debe conceptualizar de la mejor manera el sistema natural a modelar, esto se logra por medio de un estudio detallado, en el que se toma en cuenta los factores hidráulicos, de calidad del agua y logísticos. De esta manera, se definen los sitios de medición, los procesos dominantes y la complejidad del modelo.

Entre los factores hidráulicos, se deben considerar los puntos de control como presas y embalses, entre otros. Además se debe tomar en cuenta la variación de la sección transversal y la pendiente longitudinal.

La logística y trabajo de campo que se discutieron en el Capítulo 4, serán los que permitirán obtener los datos necesarios para la formulación del modelo, pero sobre todo contribuirá a la calibración del mismo. Esto debido a que se seguirá la masa de agua, aforando y muestreando parámetros de calidad en estaciones estratégicamente colocadas a lo largo del río, así como las descargas de mayor importancia que entran al río.

5.2.3. Condiciones de frontera

Se deben definir las condiciones de frontera, también llamada cabecera del río, con respecto a las cuales se desea medir el nivel de asimilación o depuración que presenta el cuerpo de agua ante el vertido de la carga contaminante.

Las condiciones para este caso se toman del primer punto de medición, Damas 1-Guatuso. Este sitio, se toma como punto de partida debido a que se encuentra aguas abajo de una planta de agua potable, con lo cual se espera medir el comportamiento del cauce ante las descargas contaminantes que sufre durante su trayecto y así analizar la respuesta del río ante los vertidos.

5.2.4. Tramos

Debido a que el río tiene propiedades hidráulicas, químicas y biológicas diferentes, se deben definir tramos en los cuales estas propiedades permanezcan constantes, ya que la capacidad de asimilación estará definida por estas propiedades.

El análisis de cada tramo requiere de distintos balances:

- Un balance hidrológico en términos del caudal (Q).
- Un balance térmico en términos de la temperatura (T).
- Un balance de masa en términos de concentración (C) de cada elemento.

En cada uno de los tramos analizados, va a existir un cambio en la masa de cada contaminante, debido a: los procesos de transporte como advección y dispersión, los procesos internos como los ciclos de nitrógeno y fósforo y los aportes de fuentes externas o las abstracciones.

5.2.5. Fuentes

Son los elementos que tienden a modificar en mayor medida la calidad del agua en una corriente, casi siempre generando una disminución en la calidad y por lo tanto un aumento en los conflictos uso-calidad. Las fuentes pueden ser puntuales o difusas dependiendo de longitud de influencia.

5.2.5.1. Fuente difusas

En esta parte de la modelación se deben tomar aportes o abstracciones que se encuentran distribuidos en una longitud determinada a lo largo del río. Estos aportes pueden ser flujo subterráneo, escorrentía superficial o inclusive los vertidos de viviendas marginales se pueden considerar como descargas distribuidas o difusas.

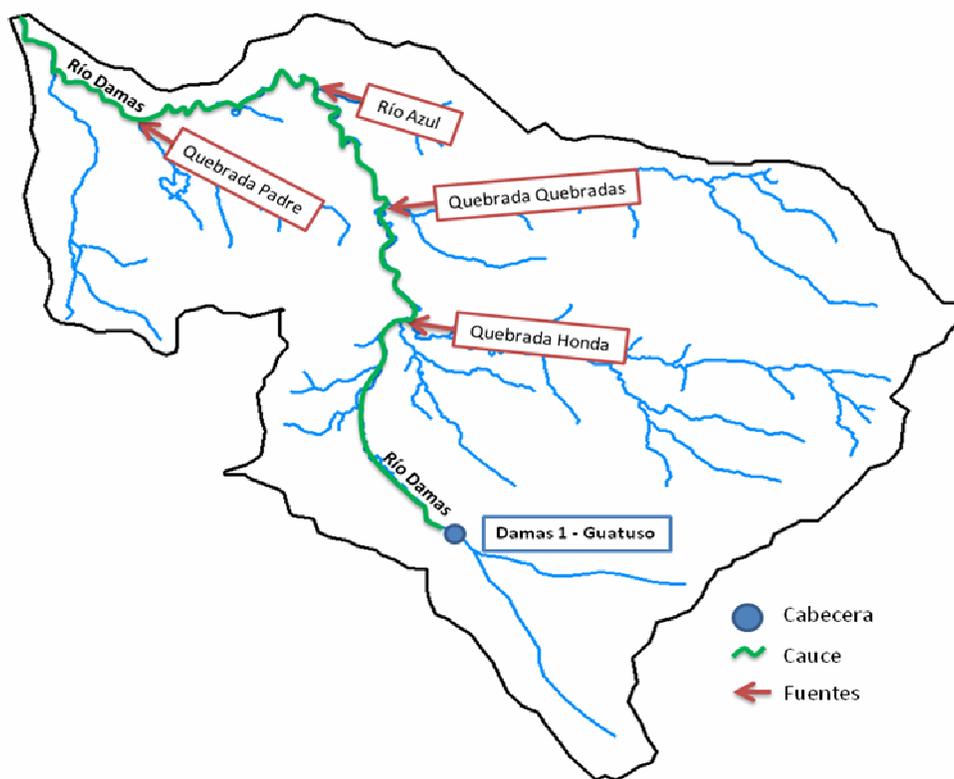
El análisis de este tipo de fuentes resulta más complejo, debido a que su caracterización (aporte de contaminantes y caudal) es de difícil estimación. Para poder tomarlos en cuenta, se deben estimar de forma directa o indirecta. La forma directa, se basaría en realizar campañas de medición e investigaciones paralelas para conocer las características de este tipo de fuentes. De manera indirecta, se utilizarían datos de investigaciones previas que contengan información acerca de los aportes de estas fuentes. Es por esto, que las fuentes difusas presentan un alto grado de incertidumbre.

Para el modelo, no se consideran aportes de fuentes difusas bajo el supuesto de que el aporte del caudal base que pudiera existir no modificaba en forma considerable las condiciones de calidad de agua del sistema analizado. Además, las campañas de medición se realizaron en días que no hubo aporte de escorrentía superficial. Por otro lado, no existe información sobre la caracterización de las descargas por parte de las viviendas marginales, ni se conoce su variación temporal o espacial.

5.2.5.2. Fuentes puntuales

Dentro de las fuentes puntuales se consideran los vertidos o abstracciones que se generan al cauce principal en puntos específicos del este. Los vertidos pueden ser efluentes o afluentes y las abstracciones pueden ser canales de derivación o puntos de bombeo. Los efluentes son las descargas generadas por plantas de tratamiento o alcantarillado sanitario, entre otros, mientras que los afluentes son los ríos y quebradas tributarias del cauce principal.

Figura 5.1. Esquema del Modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Para la zona de estudio se tomaron en cuenta cuatro fuentes puntuales para la modelación, estas fuentes se consideraron de gran importancia en cuanto a sus aportes de contaminantes y de caudal. Estas se aforaron y muestrearon de manera que se pudieron caracterizar de forma detallada.

Las fuentes puntuales modeladas son afluentes al cauce principal que drenan distintas zonas de la cuenca. Las siguientes con las fuentes puntuales modeladas, que también se pueden observar en la Figura 5.1.

- Quebrada Honda.

- Quebrada Quebradas.
- Río Azul
- Quebrada Padre.

5.2 Datos de entrada

De las campañas de medición se obtuvieron los valores para la definición de las condiciones de frontera (Damas 1 - Guatuso), así como las fuentes puntuales que vierten al cauce principal (ver Figura 5.1.). Los datos obtenidos deben suministrar la información hidráulica y los niveles de la calidad del agua, de manera tal que se puedan realizar los balances en la corriente estudiada.

5.2.1 Indicadores calidad del agua

Entre los indicadores de la calidad del agua que se deben ingresar al modelo se encuentran:

Obtenidos en campo

- Conductividad: medida indirecta del nivel de contaminación.
- pH: en el modelo se toma en cuenta en el control de procesos como la amonificación.
- Temperatura del agua: de ella dependen las constantes de degradación y reacción (a 20 °C), así como diversos parámetros de calidad del agua.
- Temperatura del ambiente: necesario para el ajuste del modelo de temperatura, junto con los parámetros meteorológicos y de radiación.

Obtenidos en el laboratorio

- Alcalinidad: involucrada en los procesos como desnitrificación y la amonificación.

Formas de carbono:

- Carbono de Descomposición Rápida: se considera como la DBO y se modela como un proceso de degradación de primer orden.
- Carbono de Descomposición Lenta: se toma como la diferencia entre la DQO y la DBO. Indicador de sustancias como grasas y aceites, que presentan procesos de degradación y reacción lentos.

- Materia Orgánica Particulada: esta forma del carbono se modela como la diferencia de los valores medidos de DBO total y filtrada. En la modelación se toma en cuenta su hidrólisis, así como la remoción por sedimentación.

Formas de nitrógeno:

- Nitrógeno Orgánico: obtenido de la diferencia entre el NTK y el nitrógeno amoniacal. Nutriente que inicia el ciclo del nitrógeno, que sufre hidrólisis (amonificación) y es producto de la desnitrificación.
- Nitrógeno Amoniacal: obtenido directamente en las campañas de medición. Producto de amonificación.
- Nitratos: medido en las campañas. Es el resultado de procesos de demanda de oxígeno como la nitrificación de los nitritos.

Formas de fósforo:

- Fósforo Orgánico: obtenido mediante el muestreo en el río. Nutriente que afecta los procesos de reireación. En la modelación se considera la hidrólisis.
- Fósforo Soluble Reactivo: medido en las campañas. Forma del fósforo que asimilan más fácil las plantas.

5.2.2 Información hidráulica

La información hidráulica es de gran importancia en un modelo de calidad de agua, por diversos factores. Entre ellos, la velocidad del flujo determina los tiempos de viaje de los contaminantes en el tramo estudiado (tiempo disponible para degradación o reacción). Además de la velocidad, el ancho y la profundidad de la sección transversal determinan la tasa de reaireación y, por lo tanto, su capacidad de autodepuración. Por esta razón, es necesario disponer de datos hidráulicos confiables de los tramos modelados.

La información hidráulica que se le suministra al modelo consiste en: los valores de caudal de las fuentes y en las curvas de descarga de las secciones representativas del río.

Los valores de caudal de las cuatro fuentes se aforaron en las campañas de calibración y se suministraron al modelo tal cuales (ver apartado 4.2.2.).

Las curvas de descarga se obtienen para cada uno de los puntos en los cuales se obtuvo la sección transversal (campana tiempos de viaje). Se obtuvieron curvas para velocidad y tirante, dependientes del caudal de tipo potencial:

$$V = \alpha \cdot Q^\beta \quad (5.1)$$

$$H = a \cdot Q^b \quad (5.2)$$

Donde:

V : Velocidad (m/s)

H : Tirante (m)

Q : Caudal (m^3/s)

α : coeficiente de tirante

b : exponente de tirante

α : coeficiente de velocidad

β : exponente de velocidad

Los valores de los coeficientes y exponentes de las curvas para las secciones se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Coeficientes y exponentes de las curvas de descarga

Estación	Velocidad		Tirante	
	α	β	a	b
Damas 1 – Guatuso	0.991	0.289	0.476	0.436
Damas 2 – Patarrá	0.751	0.331	0.308	0.472
Damas 4- San Antonio	0.674	0.357	0.216	0.531
Damas 5 - Desamparados	0.900	0.294	0.468	0.385

5.2.3 Radiación solar

Varios de los procesos considerados dependen de la luz solar, por lo que se deben introducirse las constantes de:

- *Extinción de la luz de fondo*: Este parámetro representa la luz de extinción debido al agua y el color. Se toma como valor 0.5 /m. (Chapra, 2007).
- *Extinción de luz debido a los sólidos suspendidos*: presenta un comportamiento no lineal y se recomienda 0.052 1/m-(mgD/L) (Di Toro 1978).
- *Extinción de luz debido a la MOP*: se recomienda 0.174 1/m-(mgD/L) (Di Toro 1978) y presenta un comportamiento no lineal.

5.2.4 Información Meteorológica

Las condiciones atmosféricas afectan debido a la atenuación que brinda la atmósfera y a la radiación de onda larga.

- *Temperatura del aire*: Obtenida en las campañas de medición.
- *Temperatura de punto de rocío*: Se estima en 3°C menos que la temperatura ambiente, lo que equivale a una humedad relativa entre 75 y 85% (Chapra, 1997).
- *Velocidad del viento*: no se estimó debido a que no se considera reaireación debido al viento ni que este afecte de forma significativa a la temperatura.
- *Cobertura nubosa*: Se indica un porcentaje según lo observado en las campañas de medición, para ambas campañas se aproxima como 25%.
- *Contaminación*: Se establecen 2 categorías “claro” y con “smog” que se utilizan en el modelo de atenuación solar atmosférica de Bras. Se estimó que la zona de estudio clasificaba como “claro”.

5.2.5 Constantes de calidad del agua

Para poder caracterizar de forma correcta los procesos que se dan en la corriente se deben definir las constantes que afectan la calidad del agua, que no están sujetos a calibración, así como:

- *Constantes estequiométricas*. Los valores recomendados (Chapra, 1997) para su cálculo son:

- Carbono 40 gC
- Nitrógeno 7.2 gN
- Fósforo 1 gP
- MOP 100 gD

Las constantes se pueden calcular de la siguiente manera:

$$r_{xy} = \frac{gX}{gY} \quad (5.3)$$

Donde:

r_{xy} es la cantidad masa (g) del elemento X que es utilizada debido al consumo de 1 g del elemento Y .

gX: masa del elemento X (g)

gY: masa del elemento Y (g)

Para el caso de la generación y consumo de oxígeno (Chapra, 1997):

- Por la oxidación del carbono $r_{oc} = 2.69 \text{ gO}_2/\text{gC}$
- Para la nitrificación $r_{on} = 4.57 \text{ gO}_2/\text{gN}$

- *Constantes de reacción y degradación.* Se definen dependiendo del indicador de la calidad del agua (Chapra, 1997; Camacho, 2003):
 - Velocidad de sedimentación SST 0.2 m/d
 - Oxígeno
 - Inhibición por la descomposición del carbono 0.1 mgO/L
 - Inhibición por la nitrificación 0.3 mgO/L
 - Inhibición por la denitrificación 0.5 mgO/L
 - Hidrólisis del carbono de descomposición lenta 0.01 1/d
- *Constantes de corrección por temperatura* (Chapra, 1997; Camacho, 2003): varía entre 1.0 y 1.07.

5.3 Variables respuesta

Una vez que se han ingresado los datos al modelo, se deben realizar varios ajustes de distintos parámetros, los cuales mejorarán la representatividad del modelo y facilitarán el proceso de calibración.

Los ajustes iniciales son la corrección del perfil de temperatura, las correcciones de las constantes de reaeración y el análisis de los perfiles de calidad (sin calibrar). Mientras que los ajustes finales, se basan en la calibración concluyente del modelo.

5.3.1 Perfil de temperatura

De forma inicial antes de realizar el análisis de los constituyentes y la calibración de los parámetros de calidad del agua, se deben ajustar los valores de la información meteorológica (ver apartado 5.2.4.) hasta que el modelo refleje un perfil de temperatura que ajuste de buena manera los datos de temperatura observados. Este ajuste, se debe hacer de manera subjetiva, variando de forma manual los valores de información meteorológica y radiación solar.

5.3.2 Reaeración

El modelo QUAL2K maneja varias opciones para la constante de reaeración a utilizar, pero se debe tener el cuidado de que estas apliquen para el río analizado. Las que presenta el modelo, fueron desarrolladas para ríos grandes y de planicies, los cuales presentan características de reaeración muy diferentes al sistema analizado. Es por esto, que se recomienda que se utilicen constantes de reaeración desarrolladas para casos similares al río en estudio.

Las constantes que se recomiendan, se obtendrían por medio de expresiones con la forma de la Ecuación 5.4, con las variaciones que se muestran en la Tabla 5.2. provenientes de diversos estudios y autores en ríos de condiciones similares (Chapra, 1997; Camacho, 2003; Arenas, 2003).

$$K_a = C \frac{\Delta H}{t} \quad (5.4)$$

Donde:

- K_a : Constante de reaireación (1/d)
- C : Coeficiente de reaireación (1/m)
- ΔH : Diferencia de niveles (m)
- t : Tiempo de viaje (d)

Tabla 5.2. Coeficientes de reaireación.

Autor(es)	Año	Coeficiente de reaireación (1/m)	Característica
Tsivoglou - Wallace	1972	0,1573	Obtenida de estudios con trazadores
Tsivoglou - Neal	1976	0,3609	Basadas en estudios a ríos pequeños con alta pendiente
		0,1172	
Grant	1976	0,2620	Obtenida de un estudio a diez ríos pequeños
	1978	0,1748	Obtenida mediante el uso de trazadores radioactivos
Shindala - Truax	1980	0,1573	Obtenidas mediante análisis estadísticos de reaireación
		0,1748	

Fuente: Valendina, 2005; Tsivogluo, 1976.

Para el modelo se escogió el coeficiente de Tsivoglou-Wallace y Shindala-Truax (Tsivoglou, 1976).

$$K_a = 0.1573 \frac{\Delta H}{t} \quad (5.5)$$

Debido a que fueron los que mostraron mejor ajuste y de acuerdo con investigaciones anteriores (Camacho, 2003) realizadas en ríos con características similares, esta ecuación es la que tiende a representar mejor los valores de reaireación.

5.3.3 Parámetros de calidad del agua

Luego de realizar los ajustes del perfil de temperatura y de las constantes de reaeración, se “corre” el modelo y se generan los perfiles de cada uno de los constituyentes de calidad del agua, con lo que se puede obtener el grado de ajuste brindado por el modelo previo a la calibración.

Los ajustes mostrados, se pueden mejorar variando los parámetros del modelo, ya que estos son los que controlan la calidad del agua y por lo tanto son los que estarán sujetos a calibración en el modelo.

Los parámetros corresponden tasas de cada uno de los procesos que representan (Camacho, 2003; Chapra, 1997):

- Descomposición rápida de la materia orgánica.
- Hidrólisis de nitrógeno orgánico.
- Nitrificación de amonio.
- Desnitrificación de nitratos.
- Hidrólisis de fósforo orgánico.
- Hidrólisis de la Materia Orgánica Particulada (MOP).
- Velocidad de sedimentación de la Materia Orgánica Particulada (MOP).

Puesto que estos parámetros son los que controlan en mayor medida los indicadores calidad del agua, su estimación se debe realizar por medio de una metodología objetiva, que garantice el ajuste del modelo con los valores observados y muestre la interacción existente entre estos parámetros.

CAPITULO 6: Calibración

En este capítulo, se detalla la metodología de calibración utilizada y los resultados obtenidos de la misma. Además, se muestran los valores de entrada y las variables de salida requeridos para llevar a cabo la calibración.

Este tipo de calibración ha sido utilizada en gran cantidad de proyectos (Arenas, 2003; Cmacho, 2003, 2004, 2006; Díaz, 2004; Valendia, 2005), siendo varios de estos con la misma aplicación al modelo de calidad de agua en análisis.

6.1 Metodología

Debido a la complejidad y el tiempo requerido para la calibración subjetiva, es necesario y útil, emplear una metodología objetiva para la calibración del modelo.

La metodología que se escogió para la calibración del modelo, es la de Estimación de Incertidumbre Generalizada, GLUE. Su aplicación se hace mediante MCAT, una herramienta de análisis desarrollada en MATLAB, que permite el análisis de simulaciones de Monte-Carlo.

La metodología empleada, permite calibrar con los datos de una campaña de medición de forma independiente o con los datos de todas las campañas logrando una calibración simultánea.

En este proyecto, las calibraciones del modelo se realizaron por separado y de manera independiente, para cada una de las campañas de medición. Esto debido a la que las fuentes contempladas son cauces naturales como quebradas y ríos tributarios (afluentes), los cuales presentan gran variabilidad temporal en la carga contaminante y en el caudal.

Para la selección del modelo definitivo, se toman los mejores valores obtenidos de cada una de las calibraciones y se selecciona el modelo óptimo por criterios de ajuste. Para poder realizar esta selección, se crean diagramas de dispersión y de sensibilidad paramétrica y así determinar los parámetros dominantes y sensibles.

La función objetivo que se utiliza como criterio de ajuste y optimización del modelo a calibrar es el coeficiente de determinación (Camacho, 2003).

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} \quad (6.1)$$

Es decir,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \frac{(y_o - y_s)^2}{n}}{\sum \frac{(y_o - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (6.2)$$

Donde, el R^2 tiene los siguientes límites:

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

Y:

- R^2 : coeficiente de determinación
- σ^2 : varianza de los residuos del modelo
- σ_y^2 : varianza de los datos observados
- y_o : valores observados
- y_s : valores simulados
- \bar{y} : promedio valores observados
- n : cantidad de valores observados

En el coeficiente de determinación, el cociente expresa la relación entre el error que se encuentra al comparar los valores observados contra los valores simulados ($y_o - y_s$) y la diferencia entre los valores observados y el promedio de estos ($y_o - \bar{y}$). Por medio de esta fórmula, se intenta comprobar que, efectivamente, los datos modelados explican de mejor manera los datos observados que el promedio simple de estos. Cuando la diferencia entre los datos observados y el promedio es muy grande y el error entre los datos observados y los simulados es pequeño, el cociente tenderá a cero, es decir, el coeficiente de determinación se acercará a uno.

El R^2 se obtiene para cada uno de los modelos simulados utilizando un criterio combinado. Esto quiere decir que, se comparan los valores de oxígeno disuelto, DBO, nitrógeno total y amoniacal, fósforo total y reactivo, MOP y SST, obtenidos en cada una de las campañas de calibración con los resultados del modelo para dos mil simulaciones. Sin embargo, es posible realizar la optimización para los parámetros con todas estas variables de calidad del agua o con una combinación de ellas, que el investigador considere que son las más relevantes.

6.2 Datos de entrada

Según se detalló en la metodología, los datos de entrada para la calibración son aquellos datos de las campañas de medición o datos observados, los parámetros del modelo y los datos simulados, estos se detallan a continuación.

6.2.1 Datos observados

Se toman los valores de calidad del agua medidos a lo largo del cauce, a saber Damas 1 a Damas 5, como los datos para la calibración, ya que estos son los que ayudarán a determinar los parámetros óptimos para el modelo, como se explicó anteriormente.

Los indicadores de calidad de agua seleccionados para la calibración son:

- Oxígeno disuelto (OD)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Nitrógeno total y amoniacal (NT y NH_4)
- Fósforo total y reactivo (FT y SRP)
- Materia orgánica particulada (MOP)
- Sólidos suspendidos totales (SST)

6.2.2 Parámetros

Una vez que los datos observados han sido colocados en el modelo QUAL2K, se obtienen series aleatorias de posibles parámetros a partir de un rango definido con anterioridad (Ver Tabla 6.1.).

No se tiene información previa sobre la naturaleza de las distribuciones de los parámetros ni su correlación, por lo que se utiliza la distribución uniforme para generar los parámetros de forma aleatoria. Debido a que se utilizan distribuciones uniformes, solamente se deben especificar los límites superior e inferior en los cuales deben variar los parámetros. Los límites establecidos deben ser lo suficientemente amplios, para que cualquier posible combinación de parámetros de comportamiento sea simulado. Sin embargo, si se establecen límites demasiado amplios entonces se producirían pocas combinaciones de parámetros, por lo que sería más difícil encontrar la combinación óptima que calibre el modelo de la mejor manera.

Al tener dos campañas de calibración, se debe ejecutar el modelo con las mismas series de parámetros aleatorios para cada una de las campañas. En total se obtuvieron dos mil series de parámetros aleatorios con los que se simuló el modelo cuatro mil veces (dos mil veces para cada campaña).

Los rangos de variación para cada parámetro se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.1. Rango de variación de los parámetros

Descripción	Nombre	Límites	
		Inferior	Superior
Tasa de descomposición rápida de la materia orgánica	DescC	0.0	5.0
Hidrólisis de nitrógeno orgánico	HydroN	0.0	5.0
Tasa de nitrificación de amonio	NitriA	0.0	5.0
Tasa de desnitrificación de nitratos	DeniN	0.0	2.0
Hidrólisis de fósforo orgánico	HydroP	0.0	5.0
Hidrólisis MOP	HydroMOP	0.0	5.0
Velocidad de sedimentación MOP	VelsedMOP	0.0	5.0

Fuente: Chapra, et. al. , 2007.

6.2.3 Datos simulados

Posteriormente, se ejecuta el modelo con cada una de estas series de parámetros aleatorios y se van obteniendo los resultados simulados (salidas del modelo) con cada una de las series de parámetros. Tanto los parámetros aleatorios, como los valores simulados, son almacenados en una matriz de salida.

De esta forma, se obtienen dos mil respuestas del modelo ante las posibles combinaciones de parámetros que se puedan generar dentro de los rangos seleccionados, esperando cubrir de esta manera las respuestas posibles del modelo y seleccionar por lo tanto la combinación de parámetros que genere mejor ajuste.

6.3 Análisis de dispersión y sensibilidad

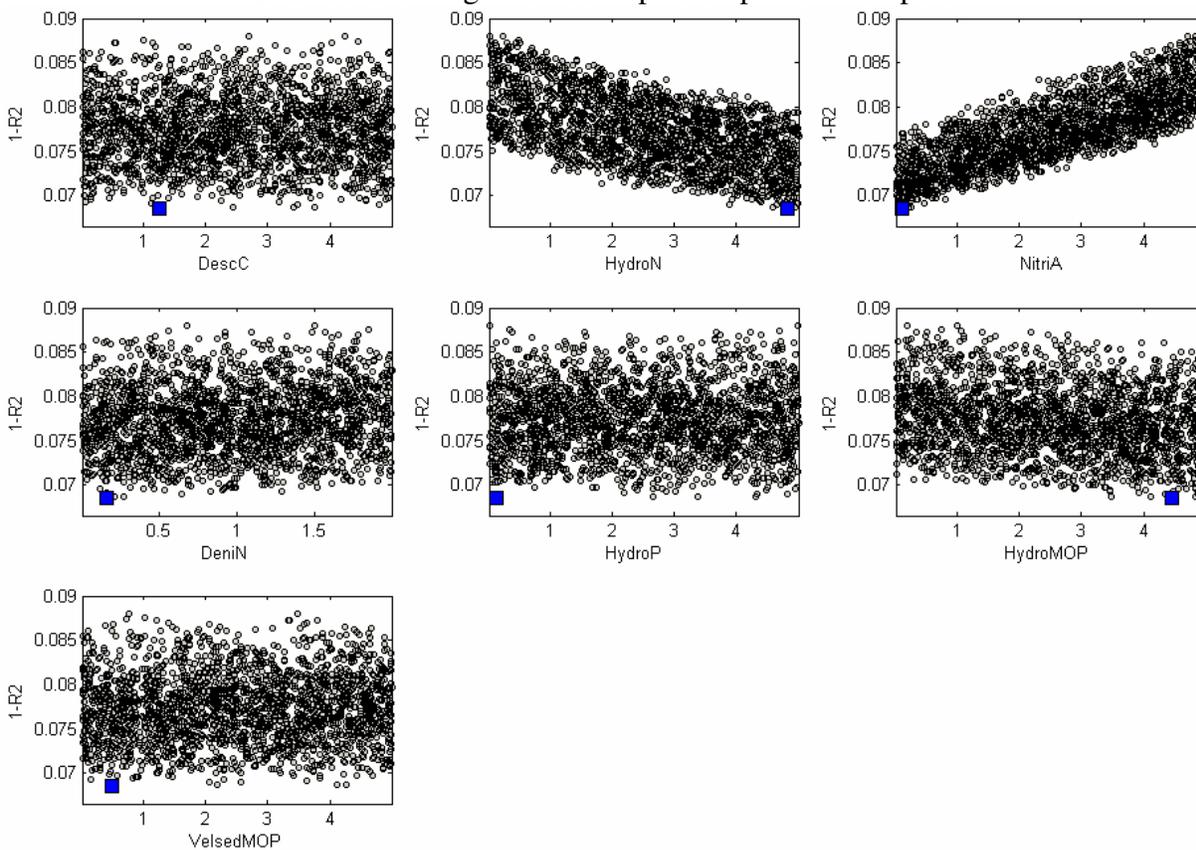
Con el fin de medir el ajuste de los parámetros del modelo, se generan diagramas de dispersión o “dotty plots” que muestran los valores de los parámetros de cada corrida contra los valores de la función objetivo. Con estos diagramas, se puede observar el ajuste que cada una de las series de parámetros generó con respecto a los valores observados. Los diagramas se generan para cada una de las campañas de medición, ya que a partir de ambas, se escoge aquella serie de parámetros que produzca los mejores resultados, en cualquiera de las dos campañas.

Para cada campaña, se obtienen los parámetros que describen los diez “mejores modelos”, por lo que, de 20 series de parámetros se define la serie óptima para ambas campañas. Para elegirla, se deben analizar los diagramas de dispersión y los gráficos de sensibilidad.

En los gráficos de dispersión, se puede observar la tendencia que tiene cada uno de los parámetros con respecto al R^2 que produjo. En este caso, los mejores parámetros son aquellos que producen un valor bajo, ya que se grafican contra uno menos el coeficiente de determinación ($1-R^2$). La mejor combinación de parámetros es la que se muestra con el punto azul en cada una de las campañas.

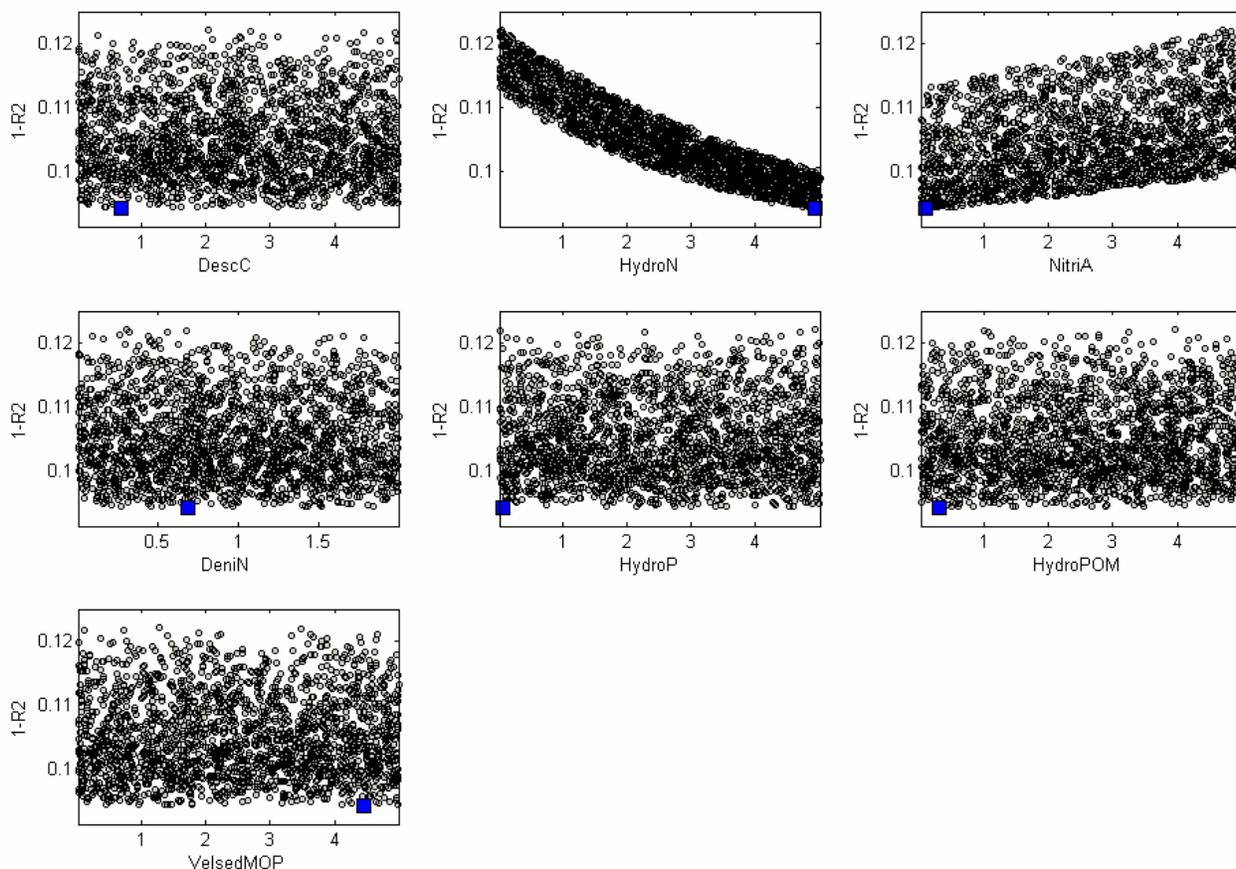
En el Gráfico 6.1, se puede observar cómo existe una marcada tendencia para los parámetros: HydroN y NitriA, en la primera campaña. Para el caso de HydroN, valores más altos producen un R^2 mayor. Mientras que para NitriA, valores más bajos producen un R^2 mayor. En el caso de los parámetros restantes, no se observa una tendencia marcada que permita diferenciar, a simple vista, cuales valores dentro del rango podrían generar un R^2 mayor que otros.

Gráfico 6.1. Diagramas de dispersión primera campaña.



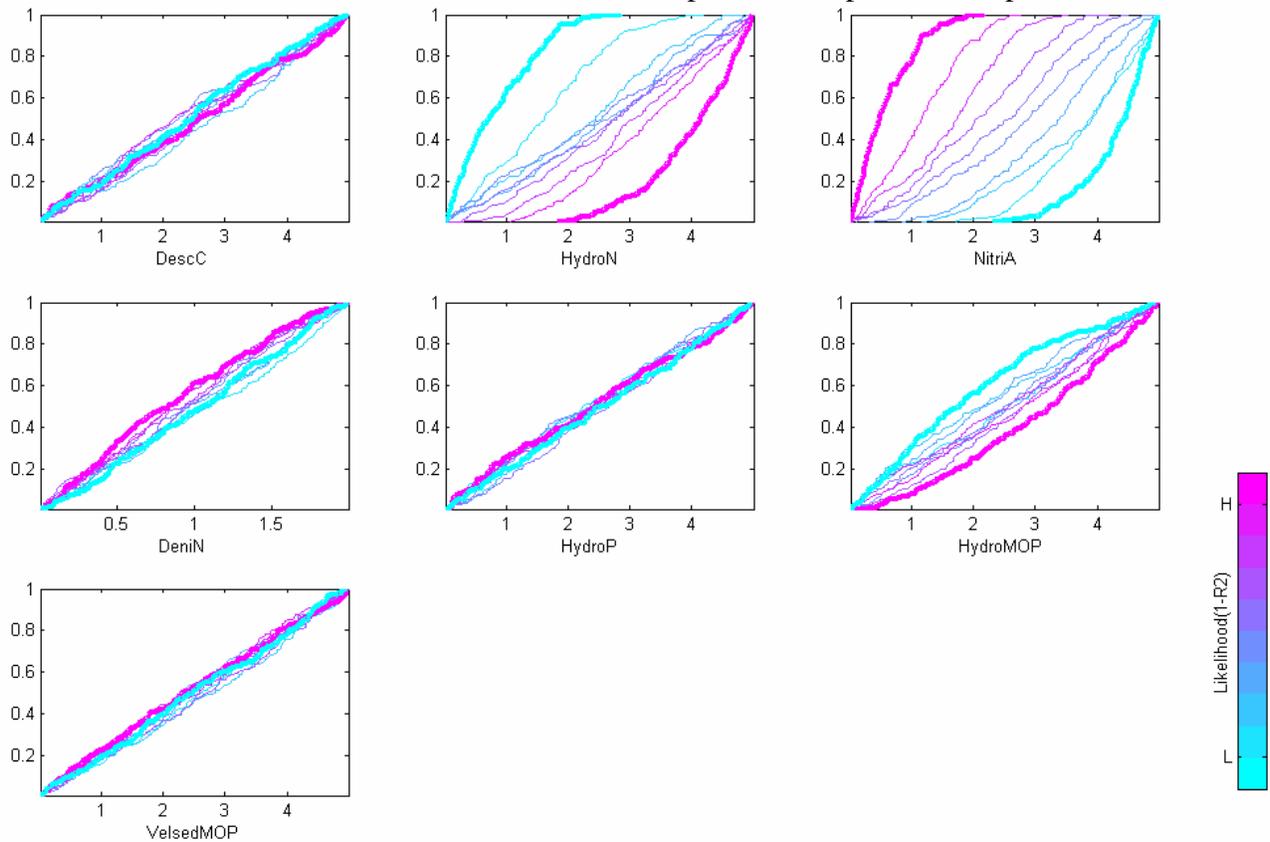
Por otro lado, para el caso de la segunda campaña, se puede observar en el Gráfico 6.2 como nuevamente existe una tendencia marcada para los parámetros: HydroN y NitriA. Estos presentan la misma tendencia que en la primera campaña, es decir, ante valores altos de HydroN mayor R^2 ; y ante valores bajos de NitriA mayor R^2 .

Gráfico 6.2. Diagramas de dispersión segunda campaña.



Para complementar el análisis de los resultados de los diagramas de dispersión, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar que tan “sensible” es un modelo ante cambios en los valores de los parámetros. Por medio del análisis de sensibilidad, se puede determinar el nivel de precisión necesaria de un parámetro para que el modelo sea suficientemente útil y válido. Si la prueba revela que el modelo es insensible, entonces se puede utilizar cualquier valor que genere un buen R^2 junto con los otros parámetros sin importar dónde se ubica este valor en el rango de datos.

Gráfico 6.3. Gráficos de sensibilidad paramétrica primera campaña.

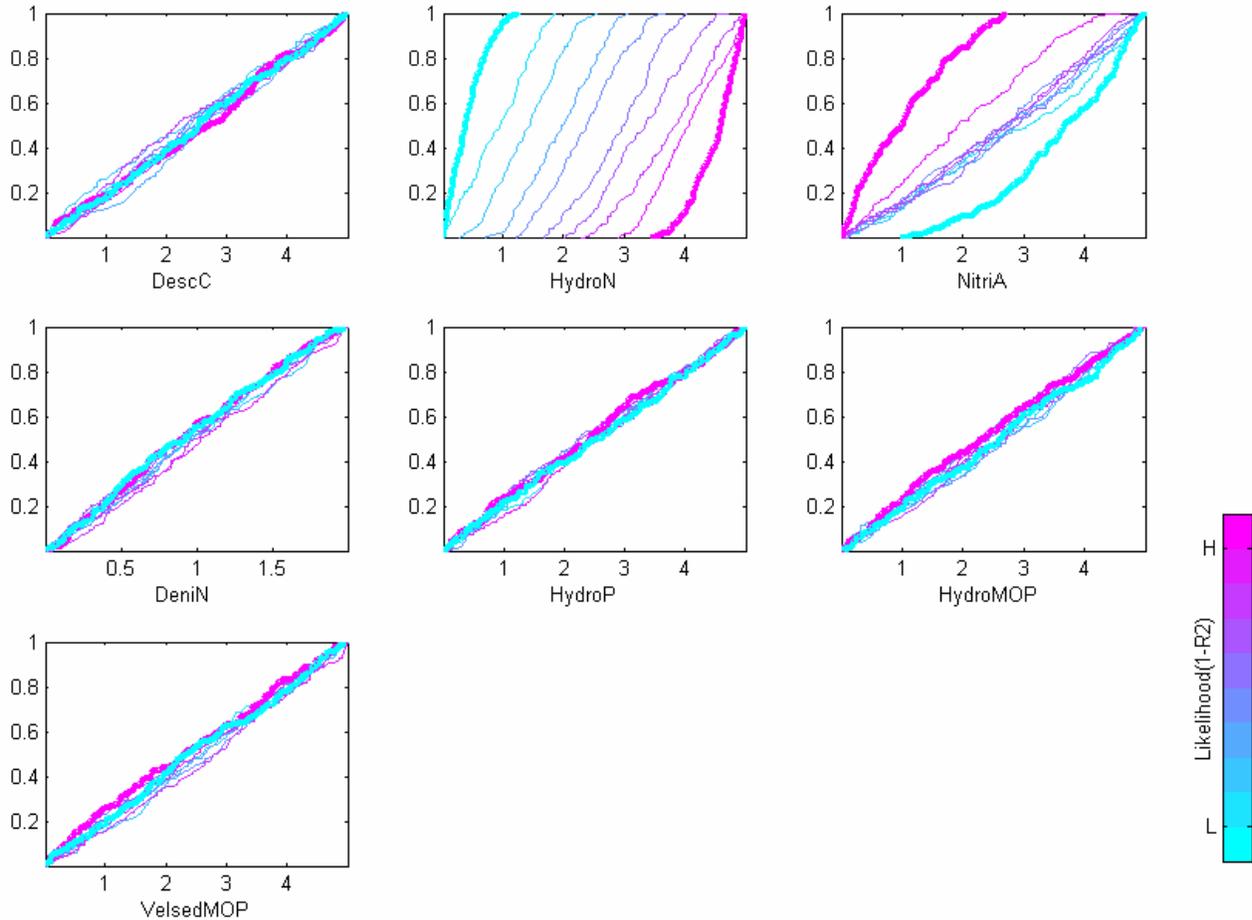


La primera campaña es la que mostró mayor sensibilidad, ya que tres de siete de sus parámetros son sensibles a cambios dentro del rango de valores. Mientras que en la segunda campaña, solamente dos parámetros resultaron sensibles. La sensibilidad se puede observar en aquellos gráficos cuyas líneas están más separadas unas de otras. Cada una de estas líneas representa una clase de valores, estas clases representan los datos divididos en diez grupos de igual tamaño. Los colores representan el grado del coeficiente de determinación que resultó de cada clase de valores. Por lo tanto, las líneas más celestes son las clases de valores que generan un mayor R^2 , mientras que las líneas más rosadas son las que generan un R^2 menor.

En la primera campaña se generan cambios en los resultado de los valores modelados dependiendo del rango en que se encuentren los parámetros: HydroN, NitriA y HidroPOM. Mientras que para los parámetros DescC, DeniN, HyproP y ValesMOP, el resultado no produciría un R^2 estadísticamente significativo al cambiar los valores a los largo del rango.

Por otro lado, para la segunda campaña solamente los parámetros HydroN y NitriA producen un R^2 significativamente diferente al mover sus valores dentro del rango estudiado.

Gráfico 6.4. Gráficos de sensibilidad paramétrica segunda campaña.



Como el fin, es encontrar una sola serie de parámetros que produzca los mejores resultados para ambas campañas, se debe tomar en cuenta los resultados de ambas conjuntamente. Por lo tanto, se tiene que:

- Para ambas campañas el parámetro HydroN resultó sensible, este parámetro produce los mejores coeficientes de determinación cuando se mueve en la misma dirección dentro del rango de datos. Es decir, para obtener una buena estimación en ambas campañas, se debe escoger un valor de HydroN alto. (Ver Gráficos 6.1 y 6.2).
- De la misma manera, para ambas campañas el parámetro NitriA resultó sensible, este parámetro produjo los mejores coeficientes de determinación cuando se mueve en la misma dirección dentro del rango de datos. Es decir, para obtener una buena estimación en ambas campañas, se debe escoger un valor de NitriA bajo. (Ver Gráficos 6.1 y 6.2).

- De igual manera, en la primera campaña HydroMOP resultó sensible, por lo que el valor escogido debería estar dentro del límite superior del rango (Ver Gráfico 6.1). Como no resultó sensible en la segunda campaña, esta decisión satisfaría las necesidades para ambas campañas.

De acuerdo a lo anterior, las tablas 6.2 y 6.3 muestran las series de parámetros que obtuvieron los mejores coeficientes de determinación (R^2) para ambas campañas. Finalmente, se escogió la serie de parámetros que se muestra en azul en la Tabla 6.2 y 6.3, ya que esta produjo los mejores resultados en ambas campañas y los valores cumplen con el análisis descrito anteriormente.

Esta serie de parámetros se evalúa tanto para la primera campaña como para la segunda, y se corrobora su buen ajuste.

Tabla 6.2. Parámetros óptimos primera campaña.

DescC	HydroN	NitriA	DeniN	HydroP	HydroMOP	VelsedMOP	R ²
1,240	4,814	0,096	0,161	0,127	4,463	0,481	0,9315
3,423	4,939	0,196	0,210	4,308	4,113	4,271	0,9314
2,434	4,590	0,255	0,173	2,654	4,833	2,194	0,9313
3,765	4,945	0,069	0,267	3,382	3,489	4,120	0,9313
3,473	3,896	0,099	0,159	4,322	4,870	2,574	0,9311
4,787	4,654	0,172	0,645	4,820	4,345	2,059	0,9310
1,130	4,994	0,461	0,158	2,186	3,926	3,620	0,9309
0,050	4,401	0,031	1,285	3,005	4,485	2,294	0,9308
3,187	4,798	0,137	0,831	2,859	3,461	0,154	0,9307
4,582	4,693	0,248	0,908	2,387	4,036	0,822	0,9306

Tabla 6.3. Parámetros óptimos segunda campaña.

DescC	HydroN	NitriA	DeniN	HydroP	HydroMOP	VelsedMOP	R ²
0,674	4,920	0,069	0,683	0,051	0,288	4,466	0,9058
1,614	4,939	0,548	1,839	3,001	0,587	1,352	0,9056
1,866	4,931	0,135	1,417	2,130	2,672	0,447	0,9056
3,129	4,980	0,483	1,434	3,544	1,475	1,460	0,9056
0,422	4,814	0,214	0,527	2,725	0,478	1,786	0,9055
4,369	4,971	0,411	0,451	4,513	1,445	0,958	0,9055
0,433	4,960	0,266	0,962	1,678	2,887	1,391	0,9055
1,490	4,745	0,246	1,513	4,581	0,833	4,991	0,9055
3,765	4,945	0,069	0,267	3,382	3,489	4,120	0,9054
1,983	4,886	0,660	1,398	3,456	0,427	1,784	0,9054

6.4 Análisis de resultados del modelo calibrado

Una vez seleccionados, mediante el proceso de calibración, los parámetros óptimos del modelo, se corren nuevamente las campañas de medición, para obtener los resultados con el modelo calibrado.

Los resultados calibrados para ambas campañas se utilizan para evaluar la calidad del agua del río y por lo tanto los posibles conflictos uso-calidad que se puedan presentar.

La evaluación se realiza por medio de la metodología expuesta en el decreto “Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales”, utilizando por lo tanto la “Metodología del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Físico-Química del Agua” y los parámetros complementarios que se indican en el decreto, los cuales estuvieron sujetos a modelación.

Es por esto, que los resultados se muestran separados en varias partes:

- Perfiles para utilización del Sistema Holandés de Valoración (SHV):
 - Oxígeno disuelto y oxígeno disuelto de saturación (OD y ODs)
 - Demanda bioquímica de oxígeno
 - Nitrógeno amoniacal
- Perfiles de parámetros complementarios de evaluación:
 - Sólidos suspendidos totales
 - Nitratos
 - Coliformes fecales
 - Potencial de hidrógeno
 - Temperatura
- Perfiles modelados de calidad del agua que no forman parte de las metodologías de clasificación:
 - Conductividad
 - Alcalinidad
 - Fósforo soluble reactivo
 - Nitrógeno total

5.4.1 Perfiles para el Sistema Holandés de Valoración

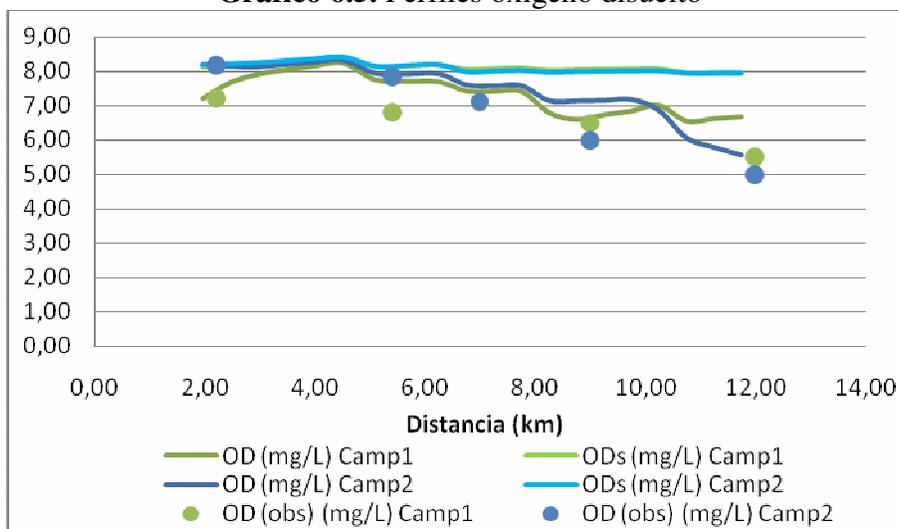
Se muestran los perfiles necesarios para clasificar el río según el Sistema Holandés de Valoración (SHV).

En el Gráfico 6.5. se muestran los perfiles de oxígeno disuelto y oxígeno disuelto de saturación, así como los datos de campo observados para ambas campañas de medición.

Del gráfico se puede observar, que se logró un mejor ajuste para los valores de la segunda campaña de medición mientras que para la primera campaña, si bien se muestra un ajuste menor, se observa una mayor variabilidad en el comportamiento de los valores de campo.

Además, se observa que, en la parte alta, la cuenca presenta gran reaireación por lo que los niveles de oxígeno son cercanos a los de saturación, mientras que en la parte media y baja las concentraciones disminuyen considerablemente mostrando un deterioro en la calidad del agua.

Gráfico 6.5. Perfiles oxígeno disuelto



Con la información del Gráfico 6.7. se pueden obtener los valores de porcentaje de saturación de oxígeno (PSO) para todo el río, por lo que se logra referenciar con respecto al oxígeno de saturación el “déficit” existente de oxígeno disuelto.

Además, se observa que la parte alta e inicios de la parte media de la cuenca (hasta los 6km) los valores se mantienen superiores al 90%, presentando disminuciones considerables en la parte baja, llegando hasta valores de 60%.

Gráfico 6.6. Perfil PSO

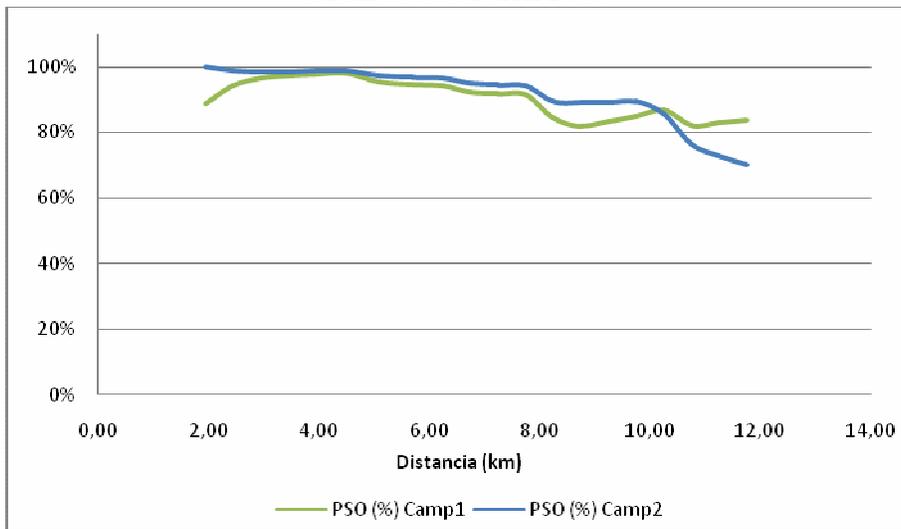
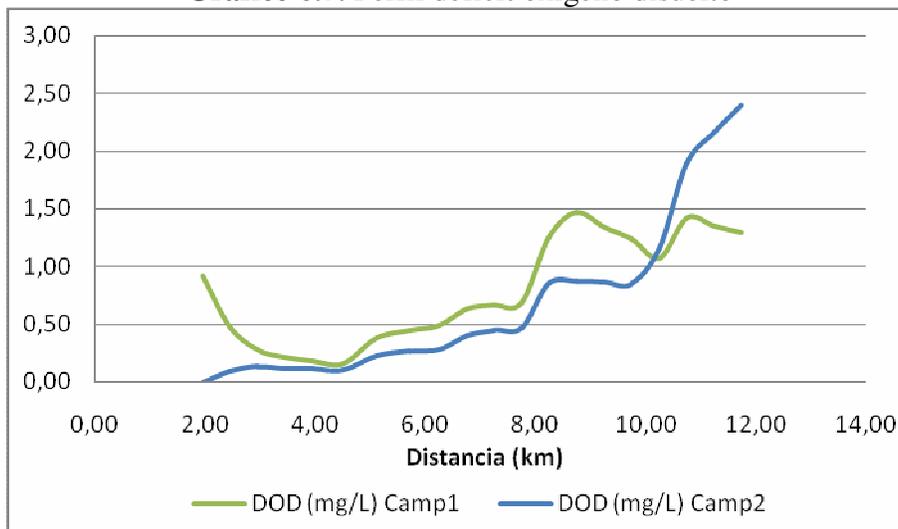


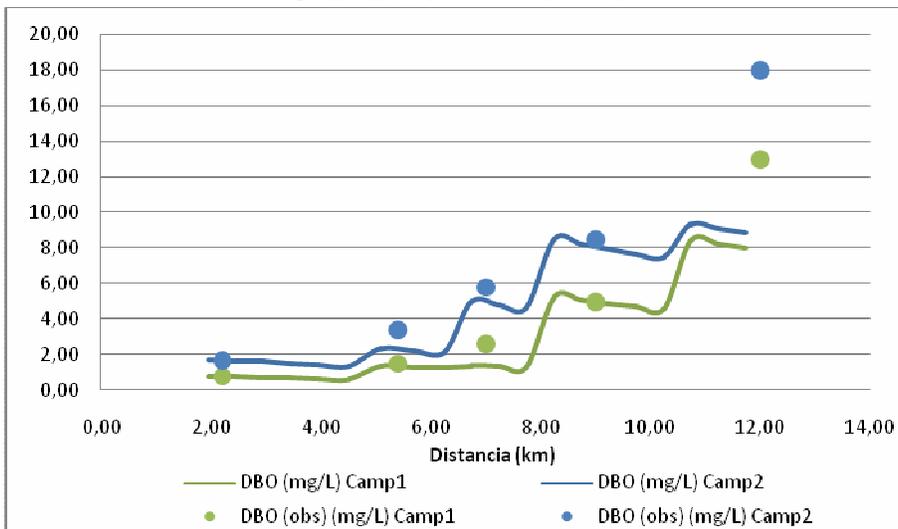
Gráfico 6.7. Perfil déficit oxígeno disuelto



Las concentraciones de DBO para ambas campañas, tanto modeladas como medidas en campo se muestran en el Gráfico 6.8. Para este parámetro, se obtienen buenos ajustes en los valores iniciales, pero este ajuste se va perdiendo conforme se avanza en la cuenca debido a la existencia de gran cantidad de descargas que no se pueden medir, por lo que este gráfico demuestra como el río presenta gran sensibilidad ante las descargas que no se contemplan en el modelo. Es decir, acá se logra apreciar el impacto que puede producir el no contabilizar todos los posibles aportes de contaminantes que se generan en la zona urbana, tal como descargas de las viviendas marginales, el

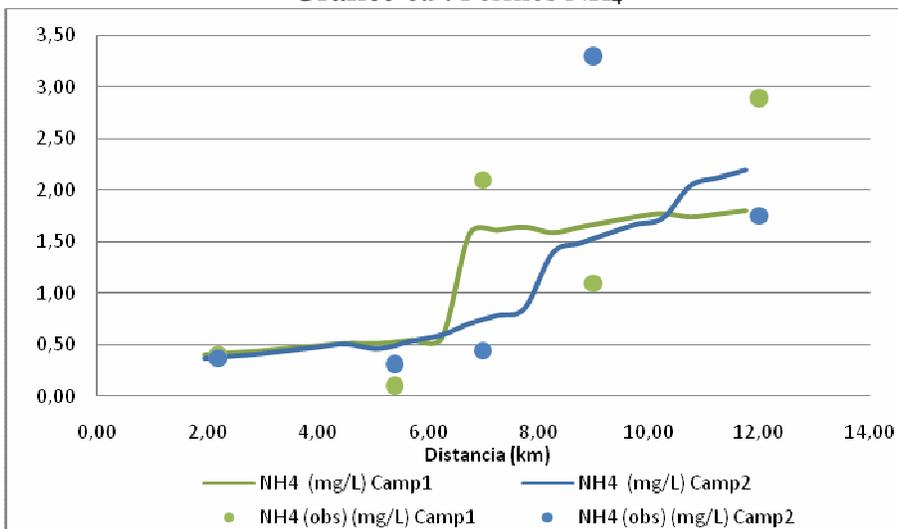
mal estado del alcantarillado sanitario y quebradas tributarias que no se contemplan al final de la cuenca.

Gráfico 6.8. Perfiles DBO



En general, el río no presenta conflictos de uso calidad según el Decreto N. 339303-MINAE-S con respecto al nitrógeno amoniacal, ya que las concentraciones obtenidas, tanto en la campaña de medición como en los perfiles del modelo, se encuentran por debajo de 5mg/L. Las diferencias mostradas entre los valores observados y los modelados (Ver Gráfico 6.9.) se deben principalmente a que las concentraciones son muy variables aún en un rango tan pequeño. Por lo tanto, en general, el modelo no precisa los valores de forma exacta, ya que la calibración define un perfil que ajuste de la mejor manera los valores observados sin necesidad de coincidir en forma exacta, con los datos observados.

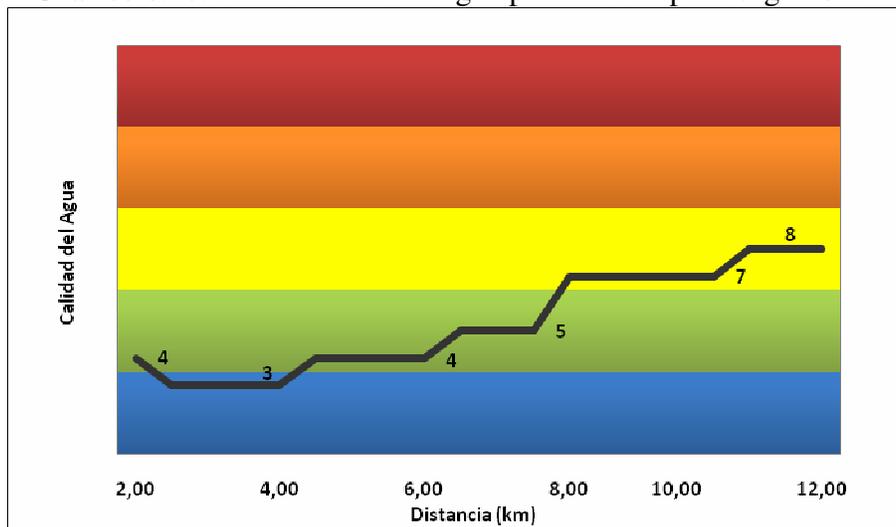
Gráfico 6.9. Perfiles NH₄



A partir de los perfiles modelados, mostrados anteriormente, se obtienen los valores del Índice del SHV de forma continua a lo largo del río. Estos índices muestran cuál es la valoración de calidad del agua, según cinco clases, en cada punto. De esta manera, se obtuvo un perfil de la calidad del agua a lo largo del río que permite conocer la variación en el grado de contaminación y en los conflictos uso-calidad.

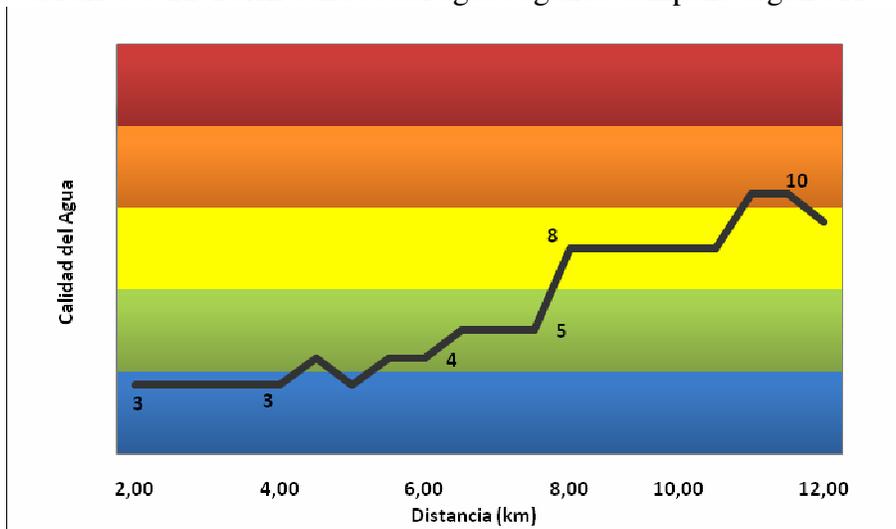
En el caso de la primera campaña de medición, se observa en el Gráfico 6.10. que efectivamente, el río presenta gran autodepuración en la parte alta, conservando niveles elevados en la calidad del agua, ya que, si bien empieza con una calidad moderada, esta mejora debido a procesos de reaeración. Por otro lado, para la parte media del río, los niveles de contaminación aumentan paulatinamente, manteniéndose con contaminación incipiente (zona verde).

Gráfico 6.10. Perfil calidad del agua primera campaña según SHV



En la segunda campaña, los resultados obtenidos al analizar el cauce con el SHV, son similares a los mostrados en la primera campaña. Sin embargo, en este caso se muestra una degradación más rápida en la calidad del agua, llegando a niveles superiores de contaminación.

Gráfico 6.11. Perfil calidad del agua segunda campaña según SHV



5.4.2 Perfiles complementarios

Tal y como lo señala el decreto para la “Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales”, se deben analizar parámetros complementarios en el caso de que se consideren relevantes, por calidad del medio ambiente y/o la salud humana. Por esto, se analizan por medio de la metodología del decreto los perfiles de: SST, nitratos, coliformes fecales, pH y temperatura.

Para el caso de los sólidos suspendidos totales (Gráfico 6.12), se observa cómo de nuevo, la parte alta de la cuenca se clasifica como “sin contaminación” y la parte baja mantiene la misma categoría (contaminación moderada) que se le asignó según el SHV.

Gráfico 6.12. Perfil sólidos suspendidos totales

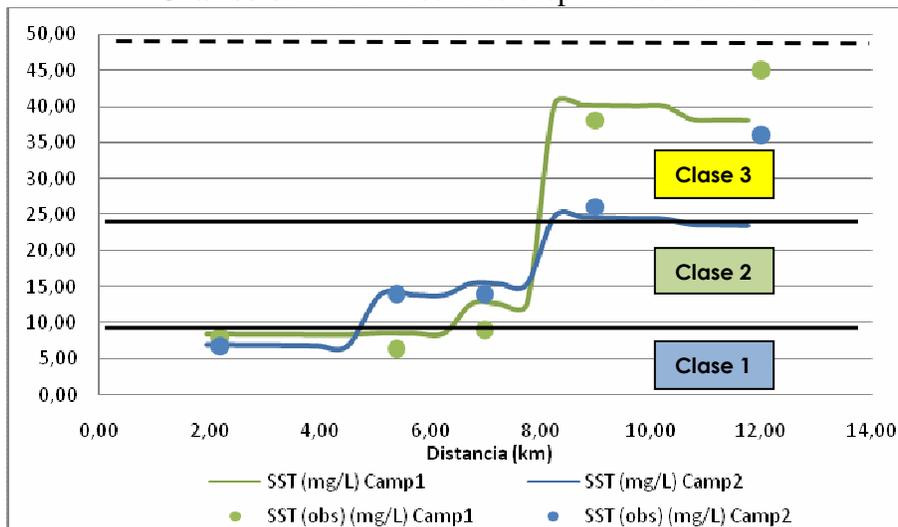
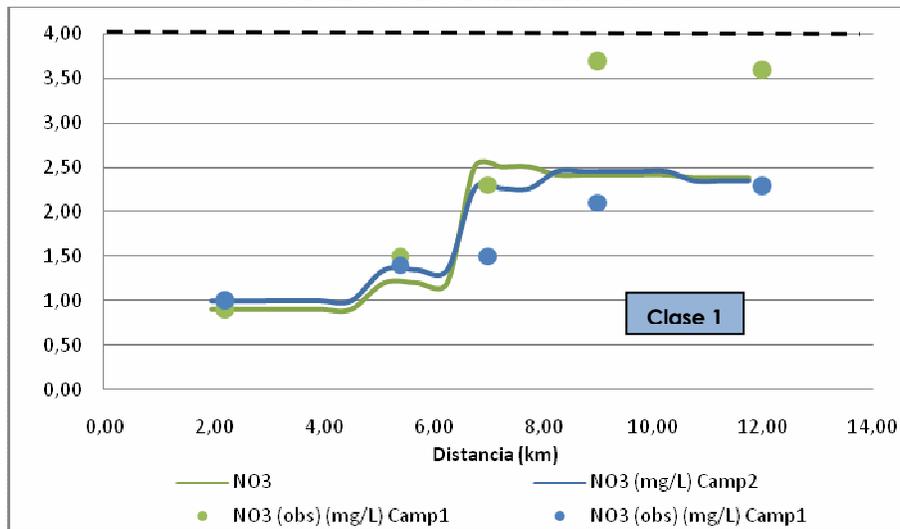


Gráfico 6.13. Perfil nitratos

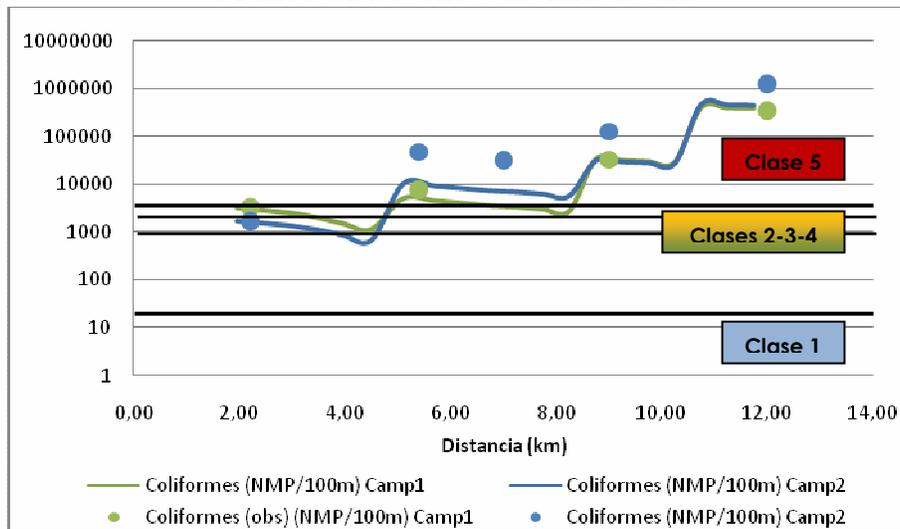


El Gráfico 6.13 muestra el comportamiento de los nitratos a lo largo del río. Este comportamiento, es similar al mostrado por el nitrógeno amoniacal, analizado con el SHV. Por lo tanto, según este parámetro, el río se clasifica como clase 1 en toda su extensión sin que se den conflictos de uso-calidad por las concentraciones presentadas de nitratos.

A diferencia de los demás indicadores de calidad de agua analizados, el comportamiento mostrado por los coliformes fecales a lo largo del río, muestra el “verdadero” problema de calidad del agua del río.

En el Gráfico 6.14. se muestra como los niveles de coliformes fecales indican problemas severos de contaminación en casi la totalidad del río. Esto porque, desde la parte alta, se observan condiciones de contaminación incipiente (clase 2) y moderada (clase 3), condiciones que no se dan en ningún otro indicador. Además, se muestra como desde la parte media de la cuenca, se dan condiciones de contaminación severa, provocando, por lo tanto, conflictos uso-calidad que limitan su utilidad casi por completo, ya que el agua pierde capacidad de potabilización, riego y recreación, entre otros.

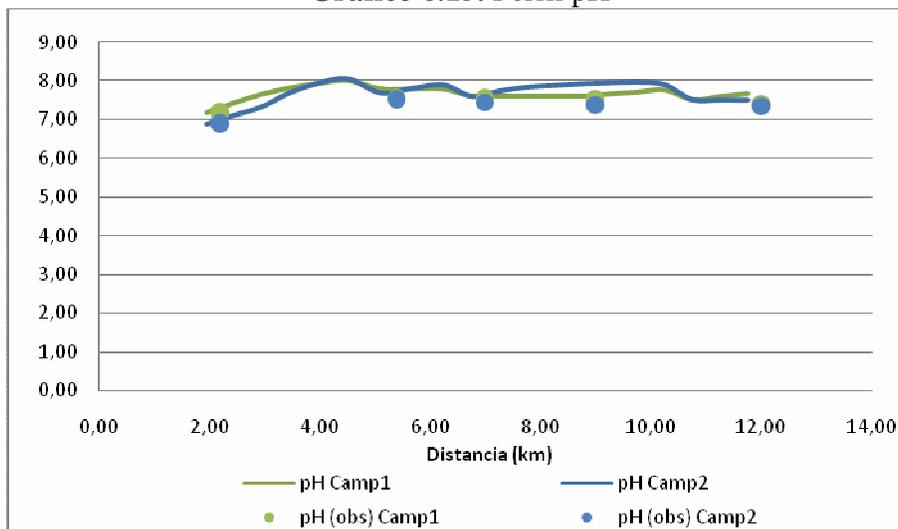
Gráfico 6.14. Perfil coliformes fecales



El análisis de la variable bacteriológica muestra resultados que no se obtienen mediante el análisis de parámetros físico-químicos, por lo que es de gran importancia que la clasificación de la calidad de agua en un río se realice de forma integral considerando todos los posibles factores que puedan estar afectándolo.

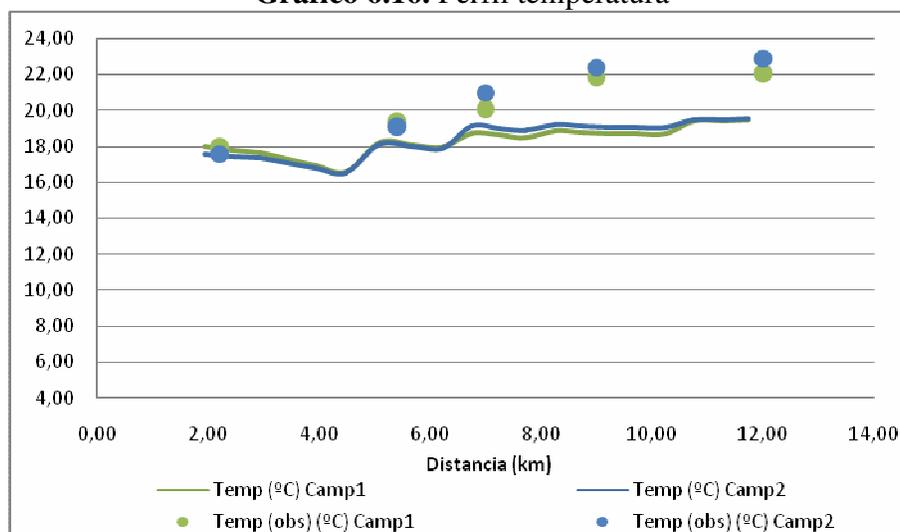
El perfil de pH mostrado en el Gráfico 6.15 indica niveles normales (no muy ácidos ni muy básicos) que afectan la calidad del agua significativamente. Además, se puede observar el buen ajuste que el modelo proporciona.

Gráfico 6.15. Perfil pH



Con respecto a la temperatura (Ver Gráfico 6.16), ésta presenta valores normales que no genera conflictos uso-calidad. El ajuste del perfil de temperatura, no es el mejor para la parte baja del río; sin embargo, el comportamiento mostrado por el modelo es similar al observado en las campañas de medición.

Gráfico 6.16. Perfil temperatura



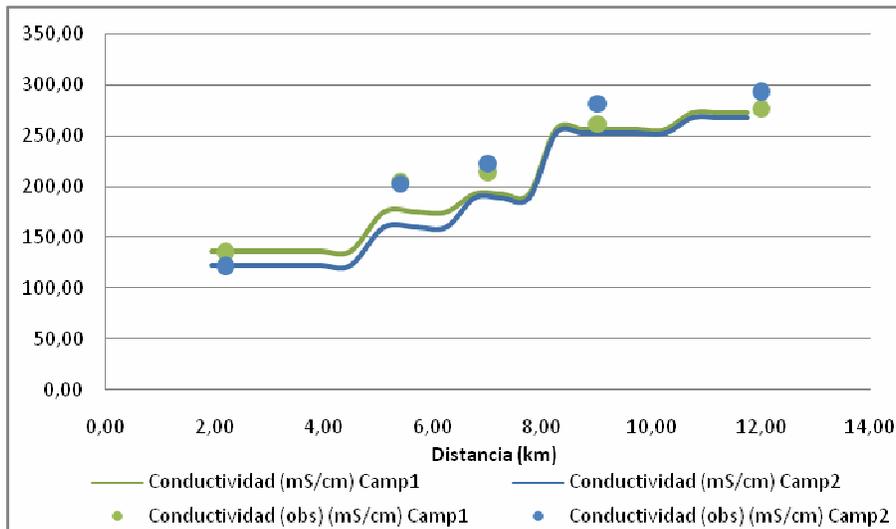
5.4.3 Otros perfiles modelados

Como parte de la modelación de la calidad del agua del río, se obtienen otros perfiles de distintos parámetros de calidad del agua, que también interactúan en el comportamiento de la calidad del agua del río. Estas variables no son empleadas por la metodología de clasificación de cuerpos de agua que se detalla en apartados anteriores, mas aún ayudan a dar una visión más amplia de las condiciones de calidad de agua.

Entre estas variables, se encuentran: la conductividad, alcalinidad, fósforo soluble reactivo y nitrógeno total.

Para el caso de la conductividad (Ver Gráfico 6.17), se observa un incremento sostenido conforme se avanza en la cuenca y cómo el comportamiento es muy similar en ambas campañas. Para este parámetro se obtuvieron buenos ajustes en la calibración.

Gráfico 6.17. Perfil conductividad



Tanto para la alcalinidad, como para el fósforo soluble reactivo y el nitrógeno total, se mantiene el esquema observado a lo largo del análisis. Es decir, se observa un alza en los niveles de cada variable, conforme se avanza en la cuenca. (Ver Gráficos 6.18 a 6.20).

Gráfico 6.18. Perfil alcalinidad

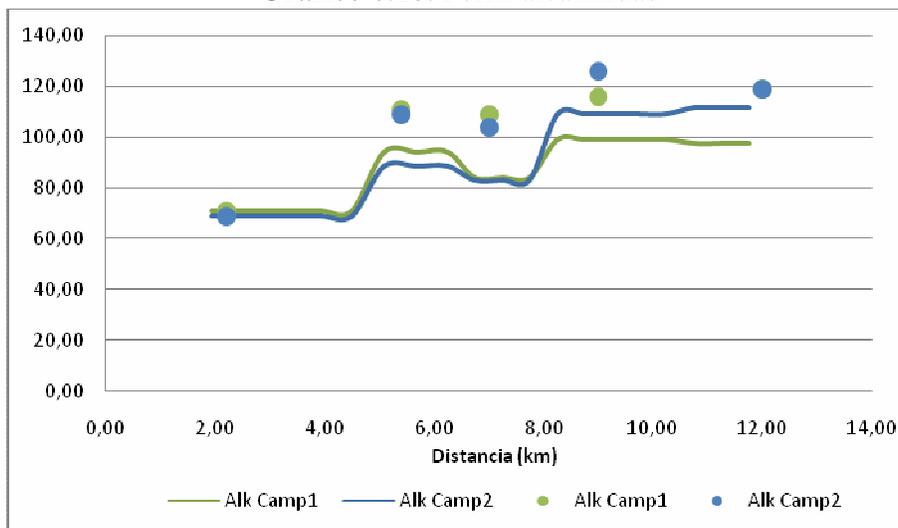


Gráfico 6.19. Perfil fósforo soluble reactivo

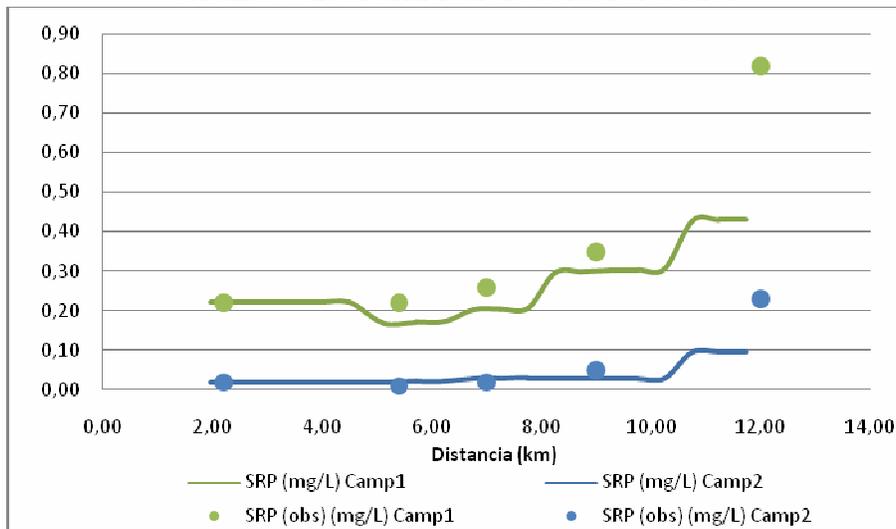
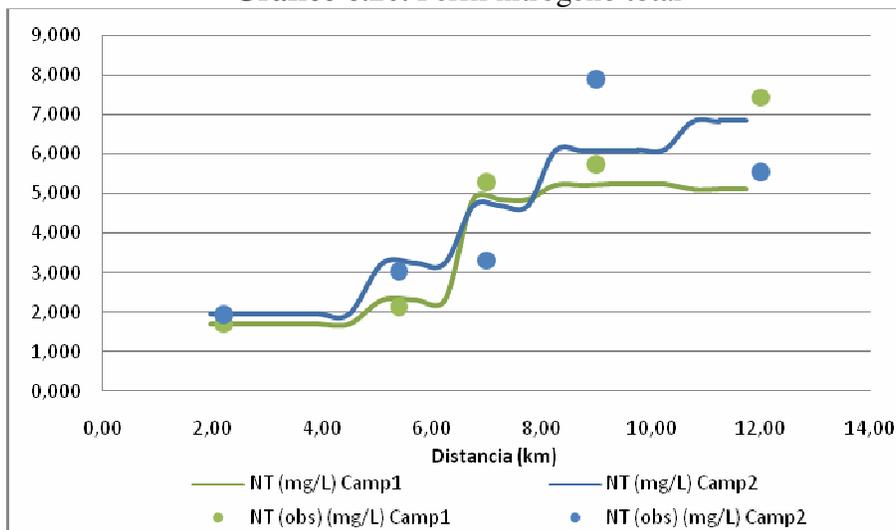


Gráfico 6.20. Perfil nitrógeno total



CAPITULO 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Las campañas de medición sirvieron como fuente de información fundamental para el análisis de la cuenca, el montaje del modelo y la calibración del mismo, ya que por medio de éstas, se pudo realizar una caracterización hidráulica y de la calidad del agua. Esto debido a que de las campañas se obtuvieron pendientes longitudinales, secciones transversales típicas y caudales, que sirvieron para estimar los tiempos de viaje. Además, se realizó una caracterización detallada de la calidad del agua, mediante la medición de veintitrés indicadores en nueve puntos de la cuenca, cinco dentro del cauce principal y cuatro afluentes principales, para un total de 207 datos observados.
- La mayoría de la información obtenida en las campañas de medición, se utilizó en la modelación de la calidad del agua y, por lo tanto, sirvió de base para la calibración del modelo, ya que el grado de ajuste obtenido se realizó mediante la comparación entre estos resultados y las salidas del modelo.
- Los aforos obtenidos en las campañas de medición, describen de manera precisa el comportamiento registrado en las campañas de calibración, con lo que se redujo la incertidumbre al estimar los tiempos de viaje y la dispersión de solutos.
- Las mediciones de las condiciones de frontera (Damas 1) y de las características hidráulicas, así como la caracterización de las descargas al río, permitieron formular un modelo del sistema natural en estudio que se pudo analizar con la herramienta QUAL2K.
- El sistema natural estudiado posee muchos factores que afectan su comportamiento, por lo tanto aumenta la complejidad en la modelación, ya que al ser un río de corta longitud y con caudales bajos se ve influenciado por las descargas marginales. Esto genera que los resultados obtenidos en la modelación pierdan ajuste al final de la zona de estudio, ya que, las descargas no medidas aumentan considerablemente. Lo anterior debido a que quedaba fuera del alcance del proyecto realizar la caracterización de las descargas marginales.
- La formulación del modelo es válida para la parte media y alta de la cuenca (calidad del agua afectada por descargas puntuales de afluentes), sin embargo no describe su

comportamiento en la parte baja, puesto que su conceptualización no representa el comportamiento real.

- El sistema natural en su parte alta cuenta con altos valores de autodepuración. Esto debido a las elevadas pendientes y, en general, a las características hidráulicas que promueven la reaeración (tramo Damas1 - Damas2). Esta capacidad de autodepuración, se conjuga con pocas descargas contaminantes, lo que da como resultado niveles altos de calidad del agua. Luego, en la parte media y baja, se dan condiciones de poca autodepuración gobernadas por las bajas pendientes y gran cantidad de descargas debido al cambio en el uso del suelo. Esto a causa de que en esta parte, el uso del suelo es primordialmente urbano. Lo anterior, genera que la calidad del agua decaiga bruscamente, ya que la capacidad de autodepuración del río la sobrepasan las descargas de contaminantes, generando un “déficit” en la calidad del agua que se podría mejorar teniendo un mayor control de las descargas.
- En la parte media y baja, se generan conflictos uso-calidad, debido a que las concentraciones de diferentes determinantes de calidad de agua, superan los estándares definidos para distintos usos del agua como riego, recreación y abastecimiento. El principal determinante que genera éstos conflictos son los coliformes fecales, ya que éste se convierte en el factor crítico de la calidad del agua y define la restricción en el uso. Por lo tanto, se infiere que el principal problema de la cuenca es bacteriológico.
- La ampliación de los rangos de los parámetros y de la cantidad de simulaciones con respecto a investigaciones anteriores produjo una mayor cantidad de combinaciones de modelos posibles y disminuyó la incertidumbre de los resultados obtenidos, es decir, se aumentó la probabilidad de obtener los valores de los parámetros que mejor describen el modelo en estudio.
- El análisis de dispersión y sensibilidad facilitó la escogencia del modelo óptimo de forma objetiva. Además, se redujo considerablemente el tiempo de calibración, si este se compara con la calibración manual y subjetiva.
- El coeficiente de determinación, permitió realizar un análisis objetivo de los datos modelados con respecto a los observados. Por medio de este análisis, se considera que se logra eficiencia en el modelo al describir los valores muestreados. Sin embargo, es claro que, debido a factores que no son tomados en cuenta en el modelo (descargas marginales), no se obtuvo un buen ajuste al final del tramo en estudio

7.2 Recomendaciones

- Debido a los buenos resultados obtenidos en las campañas de tiempos de viaje, se recomienda utilizar este procedimiento (aforar el cauce el día antes de la campaña de calibración) en futuras campañas de medición.
- Capacitar al equipo de trabajo del AyA, tanto al de campo como al de oficina sobre la logística de las campañas de medición y el uso de modelos de calidad del agua, para futuras campañas.
- Realizar campañas de medición en los meses de época seca para corroborar los datos calibrados y analizar la zona de estudio en condiciones críticas.
- Los trabajos del AyA a realizar en la cuenca como medidas de saneamiento deben ir enfocados en mejorar el sistema de alcantarillado sanitario, el cual presenta mala cobertura y poca efectividad en la recolección de aguas residuales de la parte baja de la cuenca, debido al escaso o nulo mantenimiento del alcantarillado sanitario en esta zona.
- Se deben orientar investigaciones en la cuenca que analicen la cobertura verdadera y la efectividad real del sistema de alcantarillado sanitario, aumentando la cantidad de conexiones, así como las posibles soluciones a un sistema de alcantarillado que se encuentra en pésimo estado y que, por lo tanto, no cumple la función destinada.
- Se debe adoptar una posición activa y firme en materia de protección de las cuencas, por parte de las entidades estatales competentes, a saber, Municipalidad de Desamparados, AyA y MINAE principalmente. Dándole alta prioridad y relevancia estratégica al desarrollo de medidas de recuperación de las cuencas.
- Aplicar con mano dura eliminando la impunidad, las herramientas legales para la protección de cauces, como el Reglamento de Vertido, el Reglamento para la Evaluación de Cuerpos de Agua y el Canon Ambiental, haciendo uso del principio de “quien contamina paga” para mantener un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Lo anterior se puede lograr mediante la utilización de modelos de calidad del agua, en los cuales se determine de manera objetiva y realista los impactos generados por distintas actividades antropogénicas.
- Se recomienda la utilización de la metodología de calibración para futuros proyectos, debido a su objetividad y facilidad de aplicación.

- Extender el uso de modelos de calidad del agua a los ríos de mayor importancia del país, con el fin de utilizar los modelos como herramientas de planificación del recurso hídrico. Para esto, se deben caracterizar de manera tal que se garantice la correcta conceptualización de los modelos, de forma tal que se describa de la mejor manera el comportamiento del sistema natural.
- Aumentar la profundidad del tema en estudio en el programa de la carrera de Ingeniería Civil, en las distintas universidades del país.

Bibliografía

1. Arenas, G. A. Modelación de la Calidad del Agua en Ríos de Montaña-Quebrada Lejía. Tesis de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes. 2003. Bogotá. Colombia.
2. Arenas, G. A. Estimación Experimental de la Tasa de Reaireación en Ríos de Montaña. Tesis de Postgrado en Ingeniería Civil y Ambiental con énfasis en Agua. Universidad de los Andes. 2004. Bogotá. Colombia.
3. Breierova, L.; Choudhari, M. An Introduction to Sensitivity Analysis. MIT System Dynamics in Education Project. 1996. Massachussets. U.S.A.
4. Calvo, G., Mora, J. “Evaluación y clasificación preliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón Parte I: Análisis de la contaminación de cuatro ríos del área metropolitana”. Tecnología en Marcha. 2007. Costa Rica.
5. Camacho, L. A. Modelación de la Calidad del Agua del río Grande de Tárcoles: Informe Final. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 2003. San José, Costa Rica.
6. Camacho, L.A.; Díaz, M.A. Metodología para la obtención de un Modelo Predictivo de Transporte de Solutos y de Calidad del Agua en Ríos – Caso Río Bogotá. Seminario Internacional de Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, 2003. Universidad del Valle/Instituto Cinara.
7. Camacho, L.A.; Céspedes, D. Metodología de Calibración de Modelos Hidrológicos e Hidráulicos de Flujo no Permanente – Aplicación en la Cuenca Media del Río Bogotá, Colombia. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 2004. São Paulo. Brasil.
8. Camacho, L.A.; Díaz, M.A.; Valentín E. Metodología para la Cuantificación y Caracterización de las Aguas Urbanas-Caso Ciudad de Girardot. XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Universidad de Cauca. 2006. Colombia.
9. Camacho, L.A. Calibración y Comparación de Modelos de Transporte de Solutos en Ríos de Montaña. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 2006. Guyana. Venezuela.
10. Castillo, R.G. Identificación de zonas de riesgo potencial y contaminación en la cuenca del Río Damas, mediante sistemas de información geográfica. Tesis Licenciatura en Ingeniería Civil. 1999. UCR.

11. Chapra, S.C., et al. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality Version 2.07: Documentation and Users Manual. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Tufts, 2007, Estados Unidos.
12. Chapra, S. C. Surface Water-Quality Modelling, McGraw-Hill. 1997. Nueva York, Estados Unidos.
13. Chow, V.T., et al.. Applied Hydrology. McGraw-Hill 1988. New York,.
14. Díaz, B. E. Modelación de la Calidad del Agua en el Interceptor Río Bogotá en los Tramos Fucha-Tunjuelo-Canoas. Tesis de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes. 2004. Bogotá. Colombia.
15. Di Toro, D.M. Sediment Flux Modeling. 2001. Wiley-Interscience, Nueva York, Estados Unidos.
16. García, J.; Rodríguez, J.I.; Vidal, J. Aprenda MATLAB 7.0. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2005. Madrid. España.
17. Gonzáles, S.E.; Morales, M.C. La participación social en la gestión del recurso hídrico en la micro cuenca del Río Damas. Tesis Maestría en Salud Pública con énfasis en Ambiente y Desarrollo Humano. 2001. UCR.
18. Liu, H.; Chen, W. Probabilistic Sensitivity Analysis Methods for Design under Uncertainty. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Northwestern University.
19. Lizano, V. Evaluación de la calidad del agua del Río Damas en función del uso del suelo de la cuenca. Tesis Licenciatura en Ingeniería Civil. 2001. UCR.
20. Martínez, J.; Ulate, Z. Gestión local en la cuenca del Río Damas: un enfoque de Educación ambiental en el distrito de Damas de Desamparados. Tesis Maestría en Salud Pública con énfasis en Ambiente y Desarrollo Humano. 2003. UCR.
21. OPS/OMS, Informe del Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento de Costa Rica, 2002, Costa Rica.
22. Moore, H. MATLAB para Ingenieros. Pearson Prentice Hall. 2007.
23. Orozco, A. Metodología para la Calibración de Modelos Hidráulicos de Alcantarillados. Magíster Tesis. Universidad de los Andes. 2005. Bogotá. Colombia.
24. Ramirez, J.M. “Calidad de Aguas Residuales en los Sistemas de Depuración Operados y Administrados por AyA y Estudios Especiales de Interés Institucional”. 2005. Costa Rica.

25. Rosas, A.; Herrera, I. El Número de Péclet y su Significación en la Modelación de Transporte Difusivo de Contaminantes. Instituto de Geofísica. Universidad Autónoma de México. 2007. Distrito Federal. México.
26. Tsivoglou, E. C., Neal, L.A. Tracer Measurement of Reaeration. III. Predicting the Reaeration Capacity of Inland Streams. Journal of the Water Pollution Control Federation. 1976.
27. Valendia, C. Obtención de la Constante de Reaireación y Modelación de la Calidad del Agua de Río de Montaña Colombiano. Tesis de Pregrado en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes. 2005. Bogotá. Colombia.
28. Wagener, T. et al. Monte-Carlo Analysis Toolbox User Manual. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Imperial College of Science Technology and Medicine, 2001, London, UK.
29. Distrito 10° Damas, cantón 3° Desamparados. Dirección General de Estadística y Censos. Sección Cartografía y Divulgación. Departamento de Censos. 2007. San José. Costa Rica.
30. La Gaceta, .N. 178. 17 de Setiembre, 2007. Decreto N. 33903-MINAE-S “Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales”.
31. Environmental Protection Agency, EPA. <http://www.epa.gov/>. 2007-2008.
32. Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, PRODUS. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 2007.

Anexos

Anexo A:

Procedimiento para la implementación del modelo QUAL2K

I. Objetivo

Establecer un manual que sirva de guía para la modelación y calibración de la herramienta QUAL2K, de forma que facilite la implementación del modelo y, por lo tanto, permita planificar el saneamiento ambiental en ríos en futuros proyectos.

II. Alcances

- i. El procedimiento explicará los pasos de forma general, de manera que se describan todos los trabajos involucrados en el proceso, por lo que no se describirán de forma detallada cada uno de los cálculos y supuestos a realizar.
- ii. La metodología propuesta en este documento debe tomarse como recomendación, ya que, es una propuesta y por lo tanto está sujeta a modificaciones y mejoras en futuras investigaciones.
- iii. Las herramientas informáticas de cálculo utilizadas en la calibración, nombradas en este documento, deben tomarse como recomendación y queda a juicio del lector su utilización en futuros proyectos.
- iv. El procedimiento está dirigido a un lector con conocimientos en análisis de calidad del agua en ríos y en los procesos que estos conllevan.

III. Definiciones

Afluentes: arroyo o río secundario que desemboca o desagua en otro principal.

Calibración: acción de ajustar, con la mayor exactitud posible, los resultados de un modelo con los valores de los datos observados.

Incertidumbre: rango en el cual se espera encontrar el “valor real” de la concentración del determinante de calidad del agua.

MATLAB: lenguaje de programación que incluye los conceptos básicos comunes de la mayoría de los lenguajes.

Modelación: Formular en forma matemática, un sistema o una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

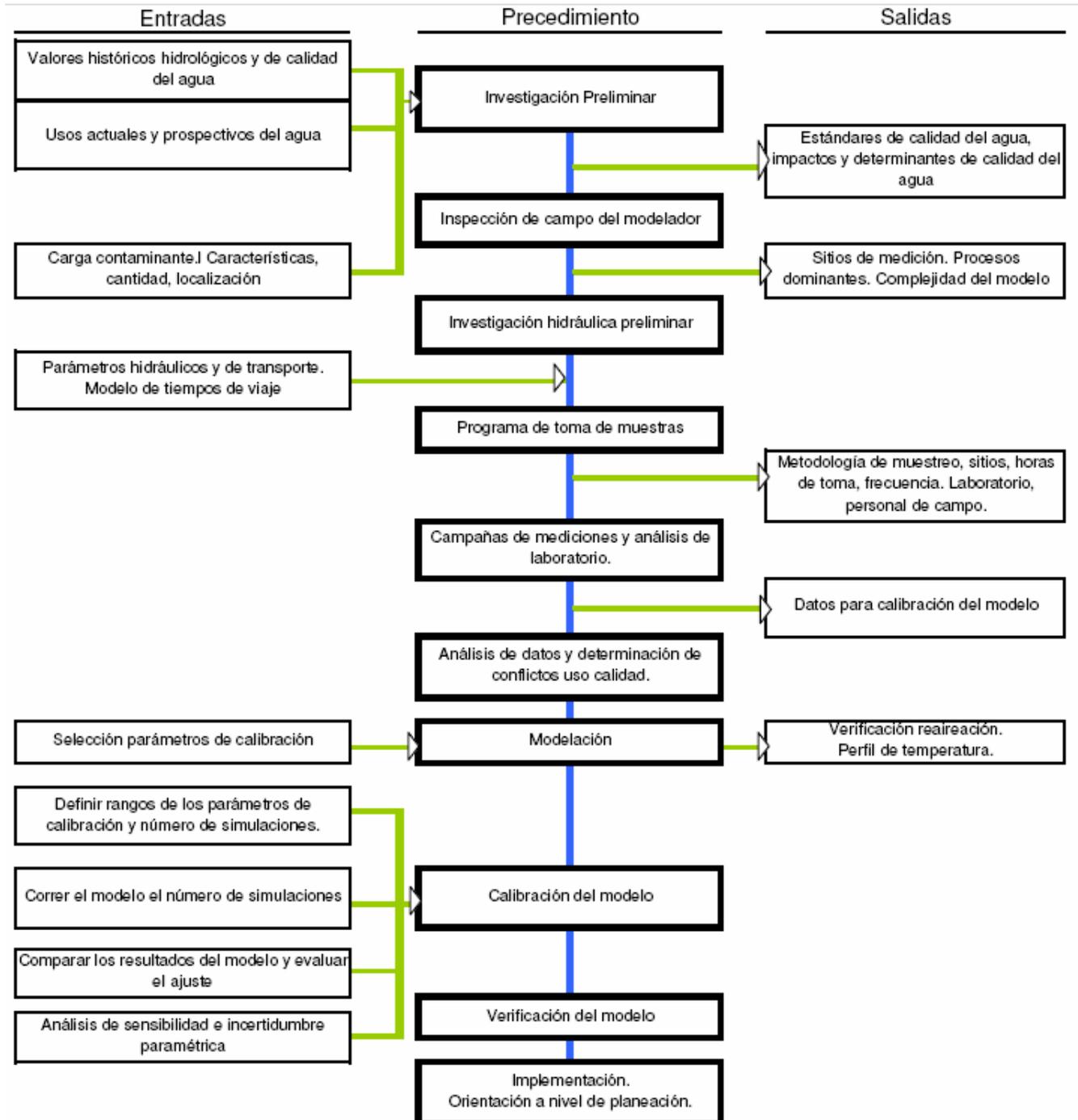
Reaireación: capacidad de un sistema natural de recuperar los niveles de oxígeno disuelto.

Simulación: experimentación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo por medio de un modelo.

Sensibilidad: capacidad de respuesta de un modelo ante pequeñas variaciones en los parámetros.

IV. Procedimiento

Figura A1: Procedimiento para la implementación del modelo QUAL2K.



A continuación se detallan los diferentes pasos a seguir en una modelación de calidad del agua y en la calibración del modelo.

i. Investigación Preliminar

El primer paso sugerido en un estudio de modelación de la calidad del agua de un río, es recopilar la información correspondiente a usos del agua y de las características y cantidad de carga contaminante que recibe a lo largo de su recorrido.

El conocimiento de las características del agua residual vertida y de la información histórica de calidad del agua observada en el cuerpo receptor permite:

- Establecer, de acuerdo con los usos del agua, los estándares de calidad del agua que deben alcanzarse en diferentes sectores del río a lo largo del tiempo. Los estándares de calidad del agua permitirán identificar conflictos uso-calidad.
- Conocer la necesidad, importancia, y complejidad del modelo requerido y estimar el costo de un error de modelación (Chapra, 1997).
- Identificar los principales impactos ambientales que se generan en la corriente y los determinantes de calidad del agua en los cuales se deberá centrar la modelación.

Es importante realizar estudios del uso del agua que incluyan desarrollos agrícolas e industriales previstos o deseables, y de desarrollos urbanos aguas abajo.

La cantidad de agua residual vertida a la fuente receptora es un dato fundamental en estudios de saneamiento ambiental y por supuesto para la modelación en una fase posterior de simulación de alternativas de saneamiento.

Las mediciones directas de cantidad y calidad del agua vertida en cada afluente durante algún tiempo, por ejemplo una semana, se recomiendan pues permiten reducir sustancialmente la incertidumbre en la carga contaminante estimada (Díaz Granados y Camacho, 2003).

Además se deben definir las características propias del cauce a nivel ambiental, que se deben tomar en cuenta en la modelación del sistema natural

ii. Inspección de Campo

Como segundo paso se sugiere que el modelador realice en una inspección detallada inicial de campo con el fin de conocer el sistema natural que será modelado.

La inspección de campo permitirá:

- Definir los sitios de medición requeridos a lo largo del río donde se tomarán datos para la calibración del modelo. Tales como afluentes y sitios principales de descarga al río que deberán ser monitoreados para calcular cargas contaminantes de entrada al río.
- Identificar cuales afluentes y sitios secundarios dejarán de monitorearse, bien por su pequeño tamaño, o bien por recursos económicos limitados los altos costos de un programa de medición.
- Confirmar el nivel de complejidad requerido del modelo.
- Observar los procesos que se deben representar en el modelo, como reaireación.
- Indicar la incertidumbre asociada con las fuentes y cargas de contaminación.
- Ver la ubicación de estructuras hidráulicas, afluentes y vertimientos principales.
- Localizar puntos principales con GPS y realizar registros fotográficos.
- Definir aspectos generales de logística con el equipo de trabajo.

iii. Investigación Hidráulica

Es necesario recopilar información geométrica e hidráulica del sistema modelado, antes de realizar campañas de medición de calidad de agua para la obtención de datos de calibración del modelo.

Para diseñar correctamente campañas de medición de la calidad del agua se recomienda realizar una investigación hidráulica preliminar la cual se puede complementar con la utilización de ensayos con trazadores.

Se recomienda la realización de aforos de caudal para diferentes condiciones hidrológicas en cada sección transversal de medición de la corriente receptora que se haya definido en la inspección de campo, con el fin de producir curvas de descarga del tirante, velocidad, ambas con respecto al caudal. A partir de estos datos es posible estimar tiempos de viaje.

iv. Programación toma de muestras

El programa de mediciones de campo permitirá la obtención de datos necesarios para la calibración del modelo, por lo que, el diseño y la programación de la toma de datos y de los determinantes de calidad del agua deben ser tales que permitan la calibración del modelo con un bajo grado de incertidumbre.

Se deben tomar las mediciones de aforo y de calidad del agua a la misma masa de agua, esto con el fin de reducir la incertidumbre generada por la variación temporal de las descargas, ya que, con esto se garantiza la conservación de la masa de agua y contaminantes.

Para monitorear la misma masa de agua, se requiere programar de manera precisa la hora de toma de la muestra en las diferentes secciones del río, así como en los vertidos que se estimaron en la modelación.

Se deben indicar las mediciones los determinantes que deben monitorearse en campo y los que se deben analizar en el laboratorio.

El personal de campo debe estar debidamente capacitado con respecto a la logística necesaria en la toma de muestras.

v. Campañas de medición y análisis de laboratorio

Las mediciones de campo se deben realizar a la hora programada y en los sitios claramente designados siguiendo las instrucciones previamente definidas.

La persona encargada de la modelación debe acompañar el monitoreo de campo y estar pendiente que las muestras se tomen en los sitios exactos y a la hora indicada.

Además se debe coordinar con el laboratorio en la realización de los análisis y asegurarse que las características y unidades reportadas para cada determinante corresponden con las solicitadas previamente.

Se recomienda realizar al menos dos o tres campañas de mediciones siguiendo la masa de agua para diferentes condiciones hidrológicas, de ser posible con condiciones de caudal bajo, medio y alto, para calibrar y verificar el modelo de calidad de agua, de manera que se permita estimar la incertidumbre del modelo.

vi. Análisis de datos observados

Luego de realizar las mediciones de campo de cada campaña, se obtienen los resultados de forma puntual de las condiciones de la calidad y cantidad de agua observada.

El análisis de los datos observados permite:

- Identificar fuentes principales de contaminación.
- Entender e identificar procesos dominantes de transformación de calidad del agua.
- Entender las magnitudes de las cargas contaminantes principales.
- Identificar los sitios y variables importantes de medición.
- Estimar las incongruencias que puedan existir en los valores observados, tales como valores que se encuentren fuera de los rangos naturales.
- Identificar conflictos uso-calidad.

vii. Montaje del modelo calidad del agua

Con base en el trabajo realizado en los pasos anteriores se tiene la información necesaria para realizar el montaje del modelo de la zona de estudio.

Los pasos dentro de la modelación se encuentran:

- Ingresar las condiciones de frontera, con respecto a las cuales se desee medir la variación de la calidad del agua.
- Ingresar los valores de cada uno de los determinantes de calidad del agua y de los valores de caudal, de cada una de las fuentes, ya sean estas puntuales o difusas, que se consideran que afectan el comportamiento tanto de la calidad del agua como hidráulico. (ver Figura A2).
- Dividir el sistema natural en tramos con propiedades hidráulicas, químicas y biológicas constantes, ya que la capacidad de asimilación estará definida por estas propiedades. (ver Figura A3)
- Especificar las constantes de la calidad del agua: estequiométricas, de reacción y degradación y de corrección por temperatura. (ver Figura A4)
- Como parte de la modelación se debe realizar una verificación de las constantes de reaeración y se deben corregir las que plantea el modelo e ingresar de forma manual las constantes que apliquen.

- Antes de realizar las simulaciones de Monte-Carlo del modelo, se ajustan subjetivamente datos de nubosidad, coeficientes de contaminación y velocidad de viento hasta obtener un perfil de temperatura modelado que ajuste con los datos de temperatura observados en campo. (ver Figura A5)

Para formular el modelo del sistema natural en la herramienta QUAL2K, se deben suministrar más de 100 datos de entrada, gran cantidad de los cuales requieren buen juicio en su estimación. Para información sobre el uso específico del modelo QUAL2K, debe referirse a la página:

<http://www.epa.gov/Athens/wwqtsc/html/qual2k.html>

viii. Calibración del Modelo

En el modelo de calidad del agua la cinética de las reacciones que se ven involucradas son particulares para cada tipo de agua residual, además se desconocen demasiadas heterogeneidades espaciales y temporales de los sistemas físicos y son muchos los procesos que interactúan en modelos de calidad del agua. Lo anterior obliga necesariamente a calibrar los modelos que se aplican a un sistema natural particular utilizando parámetros de calibración.

La calibración de modelos con varios parámetros es un problema complejo que requiere métodos de calibración objetiva.

Se recomienda utilizar métodos basados en simulaciones de Monte-Carlo como la metodología de estimación de incertidumbre generalizada, análisis que se puede realizar mediante MATLAB, con una herramienta que permite el análisis de simulaciones de Monte-Carlo (MCAT) para mayor información referirse a la página:

<http://www3.imperial.ac.uk/ewre/research/software/toolkit>

Los pasos de la metodología de calibración son:

- Definir los parámetros sujetos a calibración.
- Seleccionar una función objetivo que sirva como criterio de ajuste, se recomienda la utilización del coeficiente de determinación R^2 , el cual permite realizar una comparación entre los datos observados y los datos modelados de forma objetiva.
- Definir el rango en que variarán los parámetros.

- Definir el número de simulaciones a realizar. (ver Figura A6)
- Evaluar el ajuste del modelo mediante gráficos de dispersión y de sensibilidad paramétrica. (ver Figura A7)

ix. Verificación del Modelo

Este paso consiste en verificar la capacidad del modelo de pronosticar condiciones observadas no incluidas en la calibración. Este proceso debe realizarse de forma permanente.

Estas verificaciones se deben realizar en caso de modificaciones físicas del sistema modelado como:

- Dragado del río.
- Rectificación de cauce.
- Construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales.

En algunos se requerirá plantear nuevamente el modelo de calidad del agua debido al cambio en las condiciones que se tomaron en cuenta en la modelación y calibración inicial, debido que los cambios en las condiciones medioambientales

Debe tenerse el cuidado de utilizar y mantener los rangos de los parámetros de calibración dentro de los valores físicos probables y no cambiar los valores fuera de estos rangos para lograr el ajuste del modelo.

x. Implementación y Análisis de Simulaciones de Calidad

Luego de realizada la modelación con la respectiva calibración, se podrán definir las medidas que solucionarán los conflictos uso-calidad en la cuenca.

Lo que se pretende es producir el valor de de la concentración más probable de los diferentes determinantes de calidad del agua como: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, nutrientes, coliformes, que se presentará a lo largo del río.

Los valores de caudal y de carga contaminante de los afluentes en las simulaciones son inciertos, por lo que los análisis que se realicen son probabilísticos de las condiciones ambientales del sistema estudiado.

Figura A2: Fuentes QUAL2K

		Point	Point			Susp	Diss	Slow	Fast	Organic	Ammon	Nitrate	
		Outflow	Inflow	Temp	Cons	Solids	Oxygen	C	C	N	N	N	
9	Name	Location (km)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(C)	(units)	(mg/L)	(mg/L)	mgC/L	mgC/L	(ugN/L)	(ugN/L)	(ugN/L)
10	Efluente	0.150	0	0.0020	27.2	971	100	4.5	316.00	108.00	10000	22000	360
11	Marranera	0.300	0	0.0014	25.3	93.4	16	6.8	41.00	144.00	2010	690	150
12													
13													
14													
15													

Figura A3: División en tramos en modelo QUAL2K

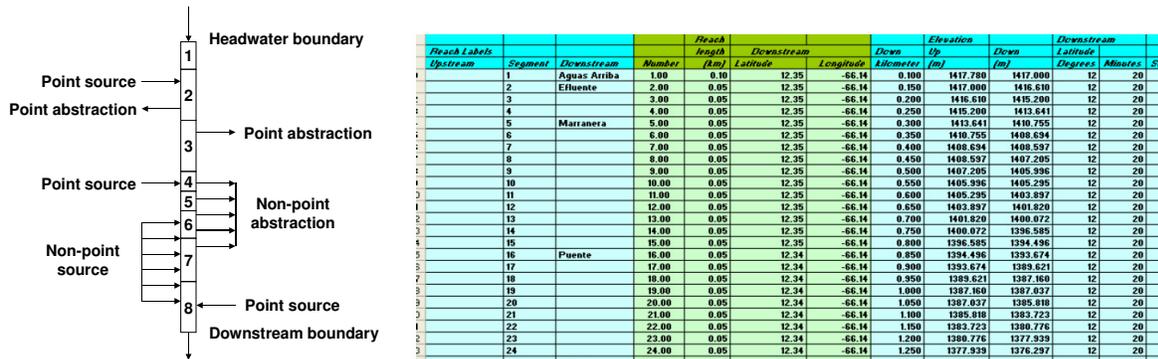


Figura A4: Constantes de calidad del agua modelo QUAL2K

Parameter	Value	Units
Inorganic suspended solids		
Settling velocity	1	m/d
Stoichiometry:		
Carbon	40	mgC
Nitrogen	7.2	mgN
Phosphorus	1	mgP
Dry weight	100	mgd
Chlorophyll	1	mgA
Oxygen		
Temp Corr (Reaeration)	1.024	
O2 for Carbon oxidation	2.67	gO/gC
O2 for Nitrification	4.57	gO/gN
Oxygen inhib C Decomp	0.1	mgO/L
Oxygen inhib Nitrif	0.3	mgO/L
Slow C:		
Hydrolysis	0.01	/d
Temp Corr	1.07	
Fast C:		
Decomposition	1.1924	/d
Temp Corr	1.047	
Organic N:		
Hydrolysis	0.5132	/d
Temp Corr	1.07	
Ammonium:		
Nitrification	1.7706	/d
Temp Corr	1.07	
Nitrate		
Denitrification	0.6811	/d
Temp Corr	1.07	
Oxygen level denitr	0.5	mgO/L
Organic P:		
Hydrolysis	0.1527	/d
Temp Corr	1.07	
Floating Plants (Phytoplankton)		

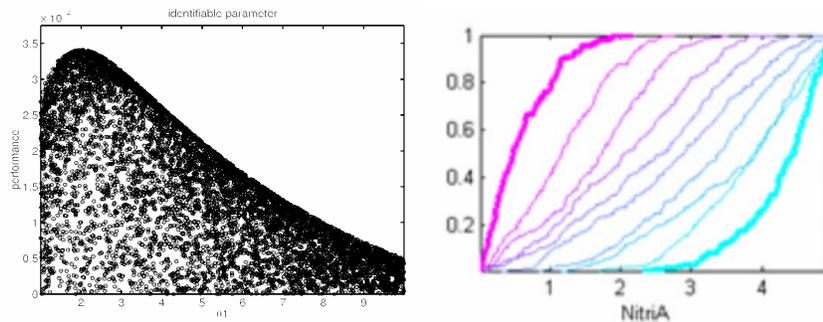
Figura A5: Información meteorológica modelo QUAL2K

7						Air	Dew-Point	Wind	Cloud	Poll	Daily	Daytime	Photo
8	Reach	Reach	Reach	Kilometer		Temp	Temp	Speed	Cover	(2-clear)	Solar	PAR	period
9	Upstream	Downstream	Number	Start	End	Ta(C)	Td(C)	Uw(mps)	C (%)	(5-smog)	(ly/d)	(ly/d)	(hrs)
10		Aguas Arriba	1.00	0.00	0.10	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
11		Efluente	2.00	0.10	0.15	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
12			3.00	0.15	0.20	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
13			4.00	0.20	0.25	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
14		Marranera	5.00	0.25	0.30	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
15			6.00	0.30	0.35	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
16			7.00	0.35	0.40	28.000	25.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
17			8.00	0.40	0.45	28.500	25.500	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
18			9.00	0.45	0.50	28.500	25.500	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
19			10.00	0.50	0.55	28.500	25.500	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
20			11.00	0.55	0.60	28.500	25.500	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
21			12.00	0.60	0.65	28.500	25.500	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
22			13.00	0.65	0.70	28.500	25.500	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
23			14.00	0.70	0.75	29.000	26.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
24			15.00	0.75	0.80	29.000	26.000	0.000	0	2	696.69	617.63	12.18
25		Puente	16.00	0.80	0.85	29.000	26.000	0.000	0	2	696.69	617.64	12.18
26			17.00	0.85	0.90	29.000	26.000	0.000	0	2	696.69	617.64	12.18

Figura A6: Rangos parámetros de calibración

# Simulación	Parámetro / Input							Output
	1	2	3	4	5	6	7	
1	=RAND()*5	3,150	4,244	3,649	2,873	0,388	1,812	?
2	2,628	0,881	3,655	2,365	3,408	2,199	2,523	?
3	1,494	0,010	4,906	4,652	0,273	3,737	2,039	?
4	4,478	3,715	3,774	0,591	3,668	1,624	3,428	?
5	0,763	0,198	2,546	2,856	1,699	2,112	2,644	?
.
.
2000	1,040	2,753	4,964	2,998	4,742	2,689	2,007	?
Rango	0-5

Figura A7: Gráficos de dispersión y sensibilidad



Anexo B:

Tabulación de datos campañas de medición

Tabla A1. Aforos cauce principal

Campaña	Fecha	Damas 1	Damas 2	Damas 3	Damas 4	Damas 5
Tiempos de viaje	27/08/2007	79 l/s	689 l/s	-	1088 l/s	1825 l/s
	17/09/2007	124 l/s	679 l/s	-	1175 l/s	1358 l/s
Calibración	27/08/2007	78 l/s	399 l/s	750 l/s	862 l/s	1262 l/s
	17/09/2007	110 l/s	630 l/s	961 l/s	1186 l/s	1300 l/s

Tabla A2. Aforos afluentes

Campaña	Fecha	Q. Honda	Q. Quebradas	R. Azul	Q. Padre
Calibración	27/08/2007	231 l/s	240 l/s	70 l/s	122 l/s
	17/09/2007	252 l/s	268 l/s	62 l/s	100 l/s

Tabla A3. Muestréos en el río campaña de medición 1

Punto		Río				
Fecha	28/08/2007	Damas 1	Damas 2	Damas 3	Damas 4	Damas 5
PARAMETRO	UNIDADES	2 + 188	5 + 412	7 + 016	9 + 013	11 + 961
Potencial de Hidrógeno, pH		7,18	7,56	7,56	7,53	7,4
Conductividad	μS/cm	136	205	215	262	277
Temperatura del Agua	°C	18	19,4	20,1	21,9	22,1
Temperatura del Ambiente	°C	19	20,7	21,2	22,6	29
Oxígeno Disuelto	mg/L	7,21	6,8	7,1	6,48	5,5
DBO Total	mg/L	0,79	1,5	2,6	5	13
DBO Disuelto	mg/L	0,36	1,3	2,4	4,5	10
DQO Total	mg/L	6	15	18	15	29
DQO Disuelto	mg/L	4	6	7	9	16
STT	mg/L	119	153,4	177	234	306
SDT	mg/L	111	147	168	196	261
SST	mg/L	8	6,4	9,1	38	45
SSS	mL/L/hr	0	0	0	0	0
Nitrógeno Orgánico	mg/L	0,41	0,54	0,9	0,95	0,94
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,4	0,01	2,1	1,1	2,9
Nitrógeno Kjeldahl Total	mg/L	0,81	0,55	3	2	3,9
Nitrato	mg/L	0,9	1,5	2,3	3,7	3,6
Fósforo Soluble	mg/L	0,22	0,22	0,26	0,35	0,82
Fósforo Total	mg/L	0,22	0,22	0,33	0,35	1,02
Alcalinidad	mg/L	71	111	109	116	119
Dureza Total	mg/L	53	94	92	100	100
Grasas y Aceites	mg/L	1,2	1,1	1,3	1,6	1
E.coli	NMP/100 mL	3300	7900	33000	33000	2400000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	3300	7900	33000	33000	3500000

Tabla A4. Muestreos en los afluentes campaña de medición 1

Punto		Afluentes			
Fecha	28/08/2007	Q. Honda	Q. Quebradas	R. Azul	Q. Padre
PARAMETRO	UNIDADES	5 + 070	6 + 725	8 + 400	10 + 644
Potencial de Hidrógeno, pH		7,67	7,37	7,6	6,76
Conductividad	μS/cm	188	216	752	356
Temperatura del Agua	°C	19	20	23	23
Temperatura del Ambiente	°C	26	26	28	29
Oxígeno Disuelto	mg/L	7,53	7,07	4,26	3,67
DBO Total	mg/L	1,7	1,64	38	29
DBO Disuelto	mg/L	1,2	0,69	23	23
DQO Total	mg/L	12	13	87	43
DQO Disuelto	mg/L	5	8	26	28
STT	mg/L	141	189	641	273
SDT	mg/L	133	172	398	251
SST	mg/L	8,2	17	243	23
SSS	mL/L/hr	0	0	1	0
Nitrógeno Orgánico	mg/L	0,76	1,1	5,72	0,84
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,46	2,8	0,67	1,37
Nitrógeno Kjedadhl Total	mg/L	1,22	2,9	6,39	2,21
Nitrato	mg/L	1,3	4,2	1,7	2,2
Fósforo Soluble	mg/L	0,15	0,24	0,97	1,04
Fósforo Total	mg/L	0,2	0,33	1,31	1,17
Alcalinidad	mg/L	102	71	216	90
Dureza Total	mg/L	84	76	123	94
Grasas y Aceites	mg/L	1,2	1,2	5,9	1,9
E.coli	NMP/100 mL	7900	79000	330000	1300000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	7900	130000	330000	2400000

Tabla A5. Muestréos en el río campaña de medición 2

Punto		Río				
Fecha	19/09/2007	Damas 1	Damas 2	Damas 3	Damas 4	Damas 5
PARAMETRO	UNIDADES	2 + 188	5 + 412	7 + 016	9 + 013	11 + 961
Potencial de Hidrógeno, pH		6,9	7,53	7,44	7,38	7,35
Conductividad	μS/cm	122	203	223	282	294
Temperatura del Agua	°C	17,6	19,1	21	22,4	22,9
Temperatura del Ambiente	°C	21,2	22,9	27,1	28,9	29,3
Oxígeno Disuelto	mg/L	8,2	7,87	7,14	6	5
DBO Total	mg/L	1,7	3,4	5,8	8,5	18
DBO Disuelto	mg/L	1,2	2,3	4	6	4
DQO Total	mg/L	10	16	19	25	42
DQO Disuelto	mg/L	4	6	6	14	26
STT	mg/L	91,2	143	152	207	250
SDT	mg/L	84,5	129	138	181	215
SST	mg/L	6,7	14	14	26	36
SSS	mL/L/hr	0	0	0	0,1	0,1
Nitrógeno Orgánico	mg/L	0,58	1,34	1,38	2,5	1,5
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,37	0,31	0,44	3,3	1,75
Nitrógeno Kjedadhl Total	mg/L	0,95	1,65	1,82	5,8	3,25
Nitrato	mg/L	1	1,4	1,5	2,1	2,3
Fósforo Soluble	mg/L	0,02	0,01	0,02	0,05	0,23
Alcalinidad	mg/L	69	109	104	126	119
Dureza Total	mg/L	53	88	92	101	100
Grasas y Aceites	mg/L	0,9	1,4	1	1,1	1,6
E.coli	NMP/100 mL	1700	11000	33000	22000	1300000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1700	49000	33000	130000	1300000

Tabla A6. Muestreos en los afluentes campaña de medición 2

Punto		Afluentes			
Fecha	19/09/2007	Q. Honda	Q. Quebradas	R. Azul	Q. Padre
PARAMETRO	UNIDADES	5 + 070	6 + 725	8 + 400	10 + 644
Potencial de Hidrógeno, pH		7,45	7,11	7,72	6,84
Conductividad	μS/cm	177	228	904	370
Temperatura del Agua	°C	19	21,1	23,7	22,6
Temperatura del Ambiente	°C	22,8	23,3	28,8	29,1
Oxígeno Disuelto	mg/L	7,87	7,4	3,34	3,2
DBO Total	mg/L	2,9	9,2	51	24
DBO Disuelto	mg/L	1,8	6,3	38	16
DQO Total	mg/L	13	27	141	66
DQO Disuelto	mg/L	2	10	113	50
STT	mg/L	129	185	583	264
SDT	mg/L	113	170	474	253
SST	mg/L	16	15	109	11
SSS	mL/L/hr	0	0	0,3	0
Nitrógeno Orgánico	mg/L	1,96	2,47	10	6,7
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,33	0,67	5,7	3,6
Nitrógeno Kjedadhl Total	mg/L	2,29	3,14	6,7	10,3
Nitrato	mg/L	1,5	3,5	4,4	1,6
Fósforo Soluble	mg/L	0,02	0,04	0,01	0,54
Alcalinidad	mg/L	97	76	372	128
Dureza Total	mg/L	82	78	129	98
Grasas y Aceites	mg/L	1,3	1,9	8,4	3,1
E.coli	NMP/100 mL	17000	28000	110000	3500000
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	17000	130000	330000	3500000

Anexo C:

Tabulación de datos modelados

Tabla A7. Puntaje Sistema Holandés de Valoración

<i>Distancia</i> (km)	Puntaje Campaña 1				Puntaje Campaña 2			
	<i>PSO</i>	<i>DBO</i>	<i>NH4</i>	Total	<i>PSO</i>	<i>DBO</i>	<i>NH4</i>	Total
1,95	2	1	1	4	1	1	1	3
2,45	1	1	1	3	1	1	1	3
2,95	1	1	1	3	1	1	1	3
3,45	1	1	1	3	1	1	1	3
3,95	1	1	1	3	1	1	1	3
4,50	1	1	2	4	1	1	2	4
5,10	1	1	2	4	1	1	1	3
5,70	1	1	2	4	1	1	2	4
6,25	1	1	2	4	1	1	2	4
6,75	1	1	3	5	1	2	2	5
7,25	1	1	3	5	1	2	2	5
7,75	1	1	3	5	1	2	2	5
8,25	2	2	3	7	2	3	3	8
8,75	2	2	3	7	2	3	3	8
9,25	2	2	3	7	2	3	3	8
9,75	2	2	3	7	2	3	3	8
10,25	2	2	3	7	2	3	3	8
10,75	2	3	3	8	2	4	4	10
11,25	2	3	3	8	2	4	4	10
11,75	2	3	3	8	2	3	4	9

Tabla A8. Resultados modelados Alk, SRP, Conductividad, NT

<i>Distancia</i>	<i>Alk</i>	<i>Alk</i>	<i>SRP</i>	<i>SRP</i>	<i>Conductividad</i>	<i>Conductividad</i>	<i>NT</i>	<i>NT</i>
<i>(km)</i>	<i>Camp1</i>	<i>Camp2</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp1</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp2</i>	<i>(mS/cm)</i> <i>Camp1</i>	<i>(mS/cm)</i> <i>Camp2</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp1</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp2</i>
1,95	71,00	69,00	0,22	0,02	136,00	122,00	1,710	1,950
2,45	71,00	69,00	0,22	0,02	136,00	122,00	1,711	1,951
2,95	71,00	69,00	0,22	0,02	136,00	122,00	1,712	1,952
3,45	71,00	69,00	0,22	0,02	136,00	122,00	1,713	1,953
3,95	71,00	69,00	0,22	0,02	136,00	122,00	1,714	1,954
4,50	71,00	69,00	0,22	0,02	136,00	122,00	1,715	1,955
5,10	94,20	88,48	0,17	0,02	174,92	160,27	2,319	3,234
5,70	94,20	88,48	0,17	0,02	174,92	160,27	2,320	3,236
6,25	94,20	88,48	0,17	0,02	174,92	160,27	2,321	3,238
6,75	84,06	83,17	0,20	0,03	192,87	189,11	4,847	4,690
7,25	84,06	83,17	0,21	0,03	192,87	189,11	4,848	4,693
7,75	84,06	83,17	0,21	0,03	192,87	189,11	4,849	4,697
8,25	98,96	108,98	0,30	0,03	255,99	253,01	5,220	6,078
8,75	98,96	108,98	0,30	0,03	255,99	253,01	5,224	6,083
9,25	98,96	108,98	0,30	0,03	255,99	253,01	5,229	6,088
9,75	98,95	108,98	0,30	0,03	255,99	253,01	5,233	6,093
10,25	98,95	108,98	0,31	0,03	255,99	253,01	5,236	6,096
10,75	97,48	111,38	0,43	0,09	272,43	267,77	5,104	6,832
11,25	97,48	111,38	0,43	0,09	272,43	267,77	5,108	6,837
11,75	97,48	111,38	0,43	0,10	272,43	267,77	5,112	6,841

Tabla A9. Resultados modelados Coliformes

<i>Distancia</i>	<i>(NMP/100m)</i>	<i>(NMP/100m)</i>
<i>(km)</i>	<i>Camp1</i>	<i>Camp2</i>
1,95	3300	1700,00
2,45	2912	1518,14
2,95	2570	1355,92
3,45	2087	1126,22
3,95	1549	862,89
4,50	1168	670,68
5,10	5186	10149,48
5,70	4624	9102,74
6,25	4092	8104,75
6,75	3649	7268,25
7,25	3429	6848,56
7,75	3087	6197,13
8,25	2792	5626,50
8,75	34233	30690,82
9,25	32526	29218,24
9,75	30904	27816,50
10,25	29775	26832,82
10,75	412319	456717,17
11,25	404893	448648,35
11,75	397543	440659,51

Tabla A10. Resultados modelados Temperatura, NO₃, pH, SST

<i>Distancia</i>	<i>Temp</i>	<i>NO₃</i>	<i>pH</i>	<i>SST</i>	<i>Temp</i>	<i>NO₃</i>	<i>pH</i>	<i>SST</i>
<i>(km)</i>	<i>(°C)</i> <i>Camp1</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp1</i>	<i>Camp1</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp1</i>	<i>(°C)</i> <i>Camp2</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp2</i>	<i>Camp2</i>	<i>(mg/L)</i> <i>Camp2</i>
1,95	18,00	0,90	7,18	8,43	17,60	1,00	6,90	6,90
2,45	17,82	0,90	7,43	8,42	17,47	1,00	7,13	6,88
2,95	17,65	0,90	7,65	8,40	17,34	1,00	7,35	6,85
3,45	17,26	0,90	7,81	8,38	17,06	1,00	7,71	6,81
3,95	16,92	0,90	7,93	8,37	16,81	1,00	7,95	6,77
4,50	16,58	0,90	8,00	8,34	16,55	1,00	8,07	6,73
5,10	18,24	1,20	7,79	8,59	18,12	1,35	7,71	13,89
5,70	18,10	1,20	7,79	8,57	18,00	1,35	7,83	13,84
6,25	17,99	1,20	7,79	8,56	17,91	1,35	7,91	13,80
6,75	18,74	2,51	7,61	12,64	19,14	2,26	7,62	15,46
7,25	18,61	2,51	7,61	12,62	19,02	2,27	7,76	15,39
7,75	18,49	2,51	7,61	12,60	18,90	2,27	7,86	15,31
8,25	18,88	2,42	7,61	40,23	19,22	2,46	7,90	24,73
8,75	18,80	2,42	7,60	40,17	19,13	2,46	7,94	24,62
9,25	18,74	2,42	7,66	40,10	19,08	2,46	7,97	24,51
9,75	18,72	2,42	7,71	40,04	19,04	2,46	7,99	24,41
10,25	18,72	2,42	7,76	39,99	19,04	2,46	7,92	24,35
10,75	19,43	2,39	7,51	38,12	19,50	2,35	7,53	23,60
11,25	19,45	2,39	7,60	38,07	19,51	2,35	7,53	23,52
11,75	19,47	2,39	7,67	38,01	19,53	2,35	7,52	23,45

Tabla A11. Resultados modelados OD, ODs, DBO, NH₄

<i>Distancia</i>	<i>OD</i>	<i>ODs</i>	<i>DBO</i>	<i>NH₄</i>	<i>OD</i>	<i>ODs</i>	<i>DBO</i>	<i>NH₄</i>
<i>(km)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>
	<i>Camp1</i>	<i>Camp1</i>	<i>Camp1</i>	<i>Camp1</i>	<i>Camp2</i>	<i>Camp2</i>	<i>Camp2</i>	<i>Camp2</i>
1,95	7,21	8,13	0,79	0,40	8,20	8,20	1,70	0,37
2,45	7,68	8,16	0,76	0,42	8,14	8,22	1,65	0,39
2,95	7,93	8,20	0,74	0,43	8,12	8,25	1,60	0,41
3,45	8,06	8,28	0,70	0,46	8,19	8,31	1,52	0,45
3,95	8,16	8,34	0,66	0,48	8,25	8,36	1,45	0,48
4,50	8,26	8,41	0,62	0,51	8,32	8,42	1,36	0,51
5,10	7,76	8,14	1,36	0,51	7,94	8,16	2,33	0,46
5,70	7,72	8,17	1,31	0,54	7,92	8,18	2,23	0,54
6,25	7,70	8,19	1,26	0,57	7,92	8,20	2,16	0,60
6,75	7,44	8,07	1,37	1,58	7,60	8,00	4,98	0,71
7,25	7,43	8,09	1,33	1,61	7,57	8,02	4,81	0,79
7,75	7,42	8,11	1,28	1,64	7,58	8,04	4,64	0,86
8,25	6,80	8,05	5,24	1,59	7,14	7,99	8,49	1,39
8,75	6,59	8,06	5,06	1,64	7,14	8,01	8,20	1,49
9,25	6,73	8,07	4,89	1,69	7,15	8,02	7,93	1,58
9,75	6,85	8,08	4,72	1,74	7,18	8,03	7,66	1,67
10,25	7,01	8,08	4,60	1,78	6,87	8,03	7,48	1,73
10,75	6,55	7,97	8,40	1,74	6,07	7,96	9,33	2,05
11,25	6,62	7,97	8,19	1,77	5,80	7,96	9,10	2,13
11,75	6,68	7,97	7,99	1,80	5,57	7,96	8,88	2,20