

**MODELO DE SIMULACIÓN DE TRANSPORTE DE METALES
PESADOS EN LA CUENCA BAJA DEL RIO TUNJUELO”**

JOHN FABRICIO BEDOYA CONTRERAS

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTA DC
2007**

MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

TESIS DE GRADO

**MODELO DE SIMULACIÓN DE TRANSPORTE Y CALIDAD DE AGUA PARA
METALES PESADOS EN LA CUENCA BAJA DEL RIO TUNJUELO”**

JOHN FABRICIO BEDOYA CONTRERAS

Código 41912510

DIRECTOR: INGENIERO CIVIL, OSCAR PEREZ

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTA D.C.

2007

MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

NOTA DE ACEPTACION

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO 1

JURADO 2

AGRADECIMIENTOS

A ESA PERSONA SABIA QUE FUE MI PADRE Y A DIANA AGUILAR POR SU INFINITA AYUDA.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	1
1. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	3
1.1. Generalidades	3
1.1.1. Zona del proyecto	3
1.2. Planteamiento del problema	6
1.3. Objetivo	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivo Específicos	8
1.4. Antecedentes	9
1.5. Justificación del problema	11
CAPITULO II: MARCO DE REFERENCIA	14
2.1. Marco teórico conceptual	14
2.1.1. Calidad de agua en espacios naturales impacto y modelación	14
2.1.2. Concepto de calidad de agua	15
2.1.3. La problemática de calidad del agua	18
2.1.4. Metales pesados	20
2.1.4.1. Los efectos del cromo en el ambiente	21
2.1.4.2. Los efectos del cobre en el ambiente	21
2.1.4.3. Los efectos del plomo en el ambiente	22
2.1.5. Modelo de trazas de metales: balance de masa y distribución de cargas residuales en ríos	23

2.2.5. Barrio san benito	63
2.2.5.1. Aspectos geográficos del barrio	64
CAPITULO III: ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ZONA	67
3.1. Línea base ambiental de la zona de influencia	67
3.1.1. Calidad del agua del río Tunjuelo	67
3.1.2. Fuentes de contaminación	68
3.1.3. Aguas negras domésticas	68
3.1.4. Aguas residuales industriales	69
3.1.5. Aguas de escorrentías superficial	70
3.1.6. Contaminación química	71
3.1.7. Contaminación física	72
3.1.7.1. Contaminación bacteriológica	73
3.1.8. Parte alta de la cuenca	74
3.1.9. Fauna	76
3.2. Descripción de la zona a ser modelada	77
CAPITULO IV: METODOLOGÍA DEL PROYECTO	83
4.1. Metodología general	83
4.2. Fases ejecutadas para la obtención del Modelo ADZ	85
4.2.1. Fase I	85
4.2.1.1. Ubicación de puntos de muestreo	85
4.2.1.2. Toma de muestras para metales pesados	85
4.2.1.3. Trabajo de campo	86
4.2.1.4. Ensayo de trazadores	90
4.2.2. Fase II	94

4.2.2.1. Análisis de laboratorio	94
4.2.2.1.1. Laboratorio de trazadores	94
4.2.2.1.2. Digestión de muestras y lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica	96
4.2.2.2. Lectura de muestras	96
4.2.3. Fase III: Desarrollo y Conformación del Modelo ADZ.	102
4.2.3.1. Conformación del modelo ADZ (Adveccion Dead Zone) al sistema computacional modelación de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo	
4.2.3.2 Formulación para hallar variables de ecuación del modelo de metales	103
4.2.3.3 Modelo para metales	107
4.2.3.4. Calibración y verificación de un modelo	109
CAPITULO V: RESULTADOS AL DESARROLLO DEL MODELO	111
5.1. Modelo ADZ de transporte de solutos	111
5.2. Modelo ADZ de calidad del agua para metales	113
CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS	127
6.1 Análisis de Datos Obtenidos	
CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Ubicación en Bogota - Río Tunjuelo	5
Figura 2.1. Esquema contaminación de aguas fluviales	19
Figura 2.2. Procesos de absorción de metales pesados Lenntech	22
Figura 2.3. Procesos de absorción de metales pesados	26
Figura 2.4. Tanque que representa la difusión molecular	30
Figura 2.5. Perfiles de velocidad de advección y dispersión en un canal	31
Figura 2.6. Efectos de advección y dispersión en una nube de tinta	32
Figura 2.7. Volumen unitario de agua - control (chapra)	33
Figura 2.8. Etapas de un modelo de calidad de agua	45
Figura 2.9. Diagrama que representa tiempo de viaje	50
Figura 2.10. Almacenamiento temporal	52
Figura 2.11. Ubicación barrio san benito	65
Figura 3.1. Puntos de muestreo	79
Figura 5.2. Hoja de cálculo con el modelo de metales	114

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla2.1 Principales cuencas de drenaje de la ciudad de Bogotá	61
Tabla 3.1 Carga orgánica de las aguas residuales	67
Tabla 3.2 Resumen de la calidad Química del río Tunjuelo en su desembocadura	69
Tabla 3.3 Resumen de concentración de metales pesados en los lodos contenidos en el fondo del río Tunjuelo	71
Tabla 4.1 Lectura de conductancia para soluciones tipo	95
Tabla 4.2. Resultados de concentración metales pesados (Hg, Cu, Pb, Cr)	98
Tabla 4.3. Resultados de concentración metales pesados (Hg, Cu, Pb, Cr)	99
Tabla 4.4. Resultados de concentración metales pesados (Hg, Cu, Pb, Cr)	100
Tabla 4.5. Resultados de concentración metales pesados (Hg, Cu, Pb, Cr) Laboratorio ANTEK	101
Tabla 4.6 Distancia entre puntos de monitoreo (plano Agustín Codazzi 1989)	103
Tabla 4.7. Constantes de destino de metales pesados	107
Tabla 5.1. Resultados modelos ADZ transporte	112
Tabla 5.3. Datos a introducir en la herramienta Solver de Excel	116
Tabla 6.1. Modelo ADZ de transporte de solutos	140

INDICE DE GRAFICAS

	Página
Grafica 4.1. Curva de calibración – Ensayo de Trazadores	96
Grafica 5.1 Modelo ADZ de Transporte y concentración de metales Los puntos de muestreo A Y B	111
Grafica 5.2 Modelo general para el mercurio en la cuenca baja del río Tunjuelo	117
Grafica 5.3 Modelo general para el cobre en la cuenca baja del río Tunjuelo	118
Grafica 5.4 Modelo general para el plomo en la cuenca baja del río Tunjuelo	119
Grafica 5.5. Modelo general para el cromo en la cuenca baja del río Tunjuelo	120
Grafica 5.6. Modelo para el mercurio - cuenca baja del río Tunjuelo - primera campaña	121
Grafica 5.7. Modelo para el cobre - cuenca baja del río Tunjuelo - primera campaña	122
Grafica 5.8. Modelo para el plomo - cuenca baja del río Tunjuelo - primera campaña	123
Grafica 5.9. Modelo para el cromo – cuenca baja del río Tunjuelo - Primera campaña	124
Grafica 5.10. Modelo para el mercurio- cuenca baja del río Tunjuelo - segunda campaña	125
Grafica 5.11. Modelo para el cobre - cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña	126

Grafica 5.12. Modelo para el plomo - cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña	127
Grafica 5.13. Modelo para el cromo cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña	128
Grafica 5.14. Modelo para el mercurio - cuenca baja del río Tunjuelo - tercera campaña	129
Grafica 5.15. Modelo para el cobre - cuenca baja del río Tunjuelo - tercera campaña	130
Grafica 5.16. Modelo para el cromo - cuenca baja del río Tunjuelo - tercera campaña	131
Grafica 5.17. Modelo para el plomo cuenca baja del río Tunjuelo – tercera campaña	132
Grafica 5.18. Modelo para el mercurio - cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña	133
Grafica 5.19. Modelo para el cobre - cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña	134
Grafica 5.20. Modelo para el cromo - cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña	135
Grafica 5.21. Modelo para el plomo - cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña	136
Grafica 6.1. Modelo ADZ transporte de solutos	138

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de ANTEK

Anexo 2. Datos de conductancia - laboratorio Uni-salle, trazadores

Anexo 3. Modelo ADZ de transporte de solutos - Hoja de calculo

Anexo 4. Modelo general de metales - Hoja de calculo

Anexo 5. Plano general de ubicación – plancha 264- 11- B4. Esc= 1:10.000

Instituto Geográfico Agustín Codazzi

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Foto 3.1. Puente entrada relleno sanitario de Doña Juana	80
Foto 3.2. Puente Meissen	80
Foto 3.3. Puente quebrada la Chiguaza	81
Foto 3.4. Puente Av. Boyaca	82
Foto 4.1. Recipientes para toma de muestras	86
Foto 4.2. Recipientes para toma de muestras	88
Foto 4.3. Toma compuesta de muestras- campaña 1	88
Foto 4.4. Toma de muestras - campaña 1	89
Foto 4.5. Toma de muestras - campaña 2	89
Foto 4.6. Toma de muestras - campaña 3	90
Foto 4.7. Mezcla de sal (NaCl) - Ensayo de trazadores	91
Foto 4.8 Mezcla de sal (NaCl) - Ensayo de trazadores	92
Foto 4.9. Inyección de sal (NaCl) - Ensayo de trazadores	92
Foto 4.10. Inyección de sal (NaCl) - Ensayo de trazadores	93
Foto 4.11. Sentido de flujo Inyección de sal (NaCl) y punto de lectura A - B	93

INTRODUCCIÓN

Son conocidos los grandes beneficios que brindan los ríos, tanto para el medio ambiente, como para la población humana; pero la incidencia del hombre y su conducta descontrolada sobre el medio natural, trae consigo daños que en algunos casos son difíciles de reparar. Su afán de vida, traducido en crecimiento poblacional, necesidad de tierras, masificación de industrias e implementación de nuevos procesos, nos lleva a un mundo cambiante, que deteriora y acaba con nuestro entorno.

Con el desarrollo de esta tesis se desea aportar un estudio significativo acerca de uno de los temas contenidos en la modelación matemática en cuerpos de agua, como lo son la “advección y la dispersión”; mostrando el comportamiento de los contaminantes en un medio acuático.

La elaboración de este modelo de simulación de calidad de agua, pretende hacer un aporte a la problemática ambiental; colaborando en futuras soluciones en asocio con estudios posteriores en el mismo campo, y encausado a los metales pesados en los cuerpos de agua en Colombia.

Este proyecto de investigación enfoca su estudio en uno de los graves problemas ambientales en Colombia como es “La Contaminación de los Ríos”,

concentrándose en uno de los principales ríos de Bogotá, como lo es “El Rio Tunjuelo”, en cuyo paso por la zona de Usme hasta el barrio san Benito, se viene

contaminando por los desagües de fabricas productoras de cueros, explotación minera, el Relleno Sanitario de Doña Juana, y otras fabricas menores.

La investigación plantea identificar el comportamiento de los contaminantes en el agua, siguiendo sus características de transporte y difusión en el medio de acuerdo con sus propiedades intrínsecas. Se aplican entonces las variables necesarias a un modelo en estado estable de calidad de agua (concentración de metales), que se convierta en la plataforma para la simulación de escenarios de saneamiento y recuperación del río, analizando contextos acordes con la variación en las condiciones de la corriente esperadas y la aplicación de planes de saneamiento básico, a la Cuenca Media del Río Tunjuelo.

1. PROYECTO DE INVESTIGACION

1. 1 GENERALIDADES

1.1.1 Zona del Proyecto

El proyecto se ejecuta en el río Tunjuelo, el cual nace en la laguna de los Tunjuelos en cercanías del páramo de Sumapaz por encima de los 3800 metros sobre el nivel del mar, a partir de tres cauces mayores relativamente paralelos que fluyen en dirección predominante del sur hacia el norte, el páramo de Sumapaz y los ríos Mugroso, Chísaca, que al unirse forma el río Tunjuelo, el cual continua en similar dirección hasta la parte baja donde gira en dirección al occidente hasta desembocar al río Bogotá a una cota aproximada de 2510 msnm, recorriendo una distancia total de cerca de 53 Km. Drena un área aproximada de 390 Km² mas que las otras cuencas de los ríos de la ciudad, la influencia de su ronda hidráulica cubre mas de 2.000.000 de personas (un tercio de la población de Bogotá), por lo tanto se convierte en una cuenca estratégica para el desarrollo de la Ciudad y para el proceso de saneamiento y descontaminación del mismo río Bogotá.

A lo largo de su cauce pueden distinguirse tres secciones bien definidas en cuanto a su topografía y drenaje así:

a. Cuenca Alta : sección comprendida entre su nacimiento y el embalse de La Regadera. Presenta una pendiente muy pronunciada, propia de los ríos de montaña que oscila entre el 15% y el 3% y hasta este sitio tiene una extensión del

orden de 161 km². El drenaje de este sector es rápido en razón a sus las altas pendientes y los alineamientos relativamente rectos.

b. Cuenca Media: sección comprendida entre el embalse de La Regadera y el embalse que actualmente se encuentra en construcción, denominado Cantarrana (5 km aguas debajo de Usme). La pendiente promedio en este sector es del orden de 3%, que aunque menor que la anterior, es aún suficiente para garantizar un buen drenaje. El área de la cuenca hasta el sitio de Cantarrana es de 267 km².

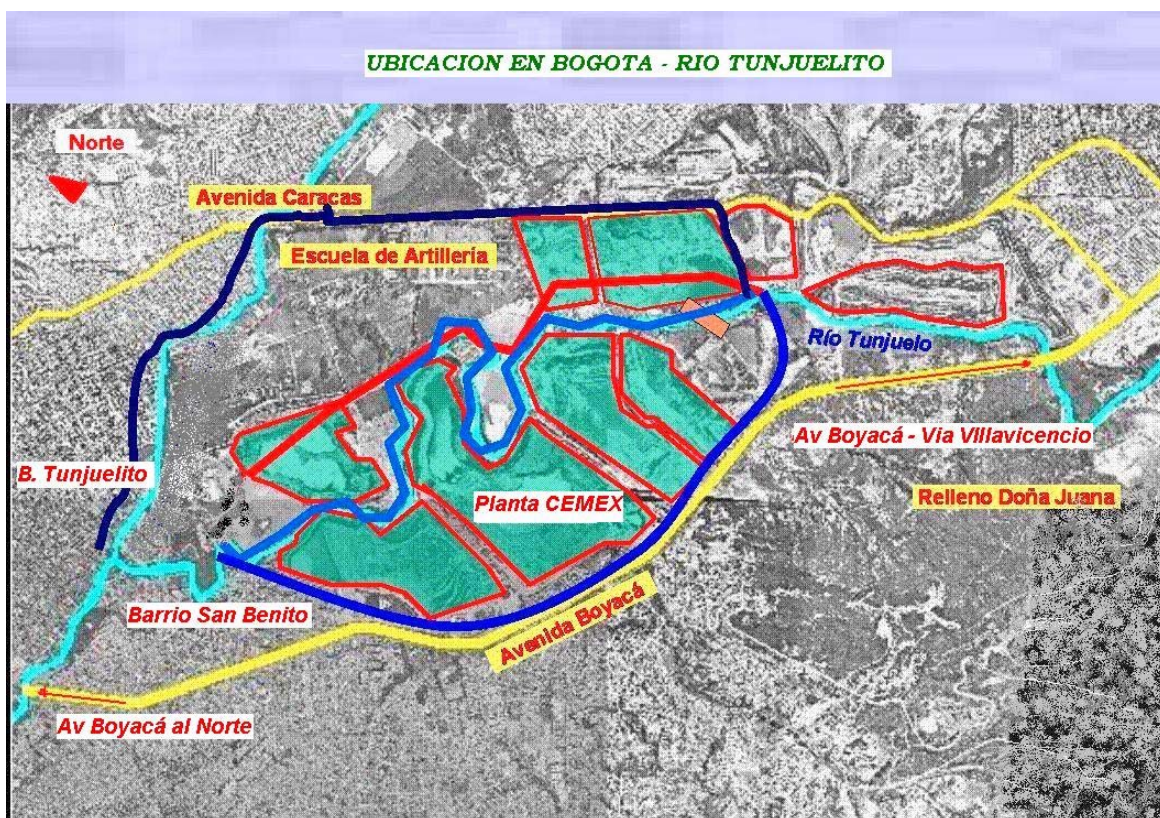
c. Cuenca Baja o sector inferior del río: sección comprendida entre el sitio de canteras llamada Cantarrana y el Río Bogotá, y esta constituido por dos zonas; una alta (sector Cantarrana -La Fiscala) donde el Río aún presenta pendientes superiores al 1% y capacidad adecuada para evacuar grandes crecientes, y una zona baja con pendientes del orden del 0.05% y por consiguiente con un drenaje deficiente. Este último es el sector La Fiscala- LaTolosa-Bosa- Río Bogotá.

En su trayecto el río cruza la avenida Boyacá en dos puntos uno a la entrada del relleno sanitario de Doña Juana y el segundo en el puente que limita el Barrio San Benito y el Tunal, Para este proyecto, se contemplo un espacio físico del río entre el puente a la entrada del relleno como punto inicial y el puente en el barrio san Benito-Tunal como punto final del estudio que pertenece a la cuenca baja del tercer sector de planicie del río¹; y que corresponde a la zona de mayor desarrollo industrial a lo largo del río, generando de manera significativa vertimientos

¹ Levantamiento topográfico río Tunjuelo EAAB-Hidroestudios 1997

industriales de todo tipo. **Figura 1. 1 y Anexo 5 Plano general (Instituto Geográfico Agustín Codazzi Plancha 246 – II – B4)**

Figura 1.1 : Ubicación en Bogotá – Río Tunjuelo – El autor 2007



1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las descargas que durante mas de 50 años el Río Tunjuelo ha recibido por actividades antropogénicas, han generado el deterioro de la cuenca media y baja del mismo. La presencia del relleno sanitario de Doña Juana, la exaltación minera, las Industrias de Cueros del barrio San Benito y otras industrias se convierten en los principales aportantes de diferentes contaminantes entre los que se encuentran los metales pesados.

Durante su recorrido el río Tunjuelo en su cuenca media recibe cargas orgánicas, provenientes de la zona del Municipio de Usme principalmente de actividades ganadera, porcicola, el matadero municipal y el Relleno Sanitario de Doña Juana el cual ejerce influencia sobre el sector de la cuenca media y por ende afecta e interviene la contaminación del río en general.

Sobre la zona baja que corresponde a sector plano del río, influyen factores de contaminación como el producido por la extracción minera en cabeza de concretera Cemex y Ladrillera Santa Fe. Así mismo en el barrio San Benito se encuentra la raíz de uno de los principales problemas de contaminación del río, por la presencia de curtiembreras industriales y artesanales, que vierten los residuos de lavado y procesamiento de cueros al Río Tunjuelo. Algunas de éstas sustancias son químicos utilizados en la coloración, como las sales de metales pesados (cromo y cobre), hidróxido de sodio, sales de amoniaco, ácidos clorados y aceites sulfonados, todos estos difíciles de tratar. En San Benito el sistema de

alcantarillado se obstruye por sólidos de las aguas de desecho y las inundación de las calles en época de invierno.

Se presentan también casos de morbilidad frecuentes como diarreas, fiebres, gripas y enfermedades de la piel, cuyas causas posiblemente se hallen en la contaminación hídrica y atmosférica de la zona, debido a las curtiembres, tanto en el sector de San Benito, como en la parte alta del río Tunjuelo y a la explotación y lavado de arenas.

Sobre la desembocadura de la Quebrada Chiguaza en el río Tunjuelo se ubica una invasión al lado y lado de la ronda del río, donde se encuentran un número no determinado de fabricas menores, pero que aportan un caudal considerable sin apartar que dicha quebrada recoge cargas orgánicas e industriales de otras áreas fuera de la zona de influencia del río Tunjuelo.

Esta investigación, analizo el problema de contaminación por metales pesados en la cuenca baja del Río Tunjuelo y a su vez los escenarios de simulación en los cuales se puedan identificar el comportamiento de transporte de acuerdo a los aspectos físicos externos que influyen sobre el contaminante y su forma de dispersión en el medio acuático en para determinar las condiciones Dispersiva y Advectiva de algunos metales pesados como el plomo (Pb), el Mercurio (Hg), el Cobre (Cu), y el Cromo (Cr), aportados por factores de descarga desde el relleno sanitario de Doña Juana y las zona industrial de San Benito.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Simular e implementar un modelo en estado estable de agua superficial para observar y analizar el comportamiento de la concentración y transporte de metales pesados , en la cuenca baja del Río Tunjuelo.

1. 3.2 Objetivos Específicos

- Estimar los parámetros del modelo de contaminación por metales pesados como el Cromo, el Plomo, el Mercurio y el Cobre en la cuenca baja del Río Tunjuelo.
- Diagnosticar la concentración de los metales pesados en el área de influencia del estudio específicamente en relleno sanitario de Doña Juana y el barrio san Benito.
- Desarrollar una base computacional en hoja electrónica para analizar las posibilidades técnicas que tiene la ecuación de Advección-Dispersión, para analizar el comportamiento de los contaminantes en la cuenca media del río Tunjuelo.

1.4 ANTECEDENTES

Para evaluar planes alternativos de ingeniería, para el control y manejo de la calidad del agua, pueden emplearse modelos matemáticos que relacionen la descarga de aguas residuales con la calidad de agua del cuerpo receptor. Los diversos grados de tratamiento, la reubicación de los puntos de descarga de aguas residuales, el aumento de los flujos mínimos, los sistemas de tratamiento regional en contraposición con las plantas múltiples, constituyen algunas de las alternativas de control, cuya influencia sobre la calidad del agua receptora puede evaluarse mediante la aplicación de los modelos matemáticos de calidad del agua. Los modelos también pueden ayudar a evaluar el mejoramiento de la calidad del agua mediante la eliminación de diferentes componentes de los contaminantes.

Por lo tanto en este proyecto se pretende identificar los parámetros de transporte e índices de repartición de metales altamente tóxicos en el cuerpo de agua. Para este proyecto se consideraran como base del temario de estudio las siguientes investigaciones realizadas:

a. Efectos de Los vertimientos de las curtiembres del municipio de Villapinzón sobre las comunidades bentónicas del río Bogotá, GODOY, 2001. Bogotá, CIFI, Uniandes 2000.

Este estudio tuvo como objeto evaluar los cambios presentados en las variables fisicoquímicas presentados en las comunidades bentónicas de la Cuenca del río Bogotá como resultado de la descarga principalmente de las curtiembres de Villapinzón; entre sus conclusiones se destaca el defecto notable sobre la calidad del agua por la variación alta de conductividad, **metales**, cloruros, sólidos. suspendidos y dureza total. Los principales problemas generados por los vertimientos de las curtiembres sobre las comunidades de macro invertebrados están relacionados principalmente con la respiración, y el hábito, no solo por los altos valores registrados de las especies fisicoquímicas sino por su variación en el tiempo.

b. Interacción de los metales pesados entre el sedimento y la columna de agua en el caso del río Bogotá, Uribe, 1995 CIFI-UNIANDES.

En este documento, se hicieron análisis de Plomo, Níquel, Cromo y Cadmio en la cuenca alta del río Bogotá, y se montaron en columnas aeróbicas y anaerobias, pudiéndose observar que la transferencia de metales pesados entre el sedimentos y la columna de agua no parece ser difusivo, sin embargo por efectos de resuspensión y aumento de concentraciones debido a la tendencia de los metales a fijarse, el metal se mantiene en concentración. La mayor concentración de metales en sedimentos se observa en la columna anaerobia.

c. Modelación de la calidad del agua del río Bogota cuenca baja, Diaz F. Et al. Uniandes, Cifi, 2002.

d. Modelo de calidad del agua del río Bogotá, Uniandes- EAAB E.S.P. Bogota 2001, 2002.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las particularidades de problema de contaminación en la cuenca baja del Río Tunjuelo, corresponde precisamente a los altos niveles de contaminación de diferente índole donde se encuentran también, trazas de metales pesados.

Estas concentraciones existentes se asocian directamente con el vertimiento de residuos de sulfato crómico, provenientes de la actividad industrial del proceso de curtido de pieles, el cual es una actividad bastante profusa en la zona del barrio San Benito.

El caso de los metales pesados, es analizado como tóxicos, tienen importantes diferencias con los contaminantes convencionales; en el caso de este tipo de tóxicos no existen ciclos orgánicos que se puedan aprovechar para explicar su disposición en el ambiente y el manejo adecuado de los mismos para su mitigación.

Los tóxicos son decididamente más nocivos para organismos que los contaminantes convencionales, y la dificultad que implica su manejo se atribuye a la complejidad de las relaciones químicas que se generan con su presencia en sistemas acuáticos. Inicialmente los tóxicos tienden a repartirse en formas disueltas y en formas particuladas, las cuales implican que su análisis no solo se concentre en la corriente sino que involucre las concentraciones en el lecho y zonas bénticas del cuerpo de agua. Esta interrelación se conoce como la razón de partición; la razón de partición o fracción de partición, indica que cantidad del contaminante esta presente en forma disuelta, particulada y sedimentable.

Para el caso de los metales predominan la concentración en forma particulada, y por ello están más afectados por mecanismos de transporte como sedimentación, resuspensión¹ y sorción¹ por el lecho. En el caso de la sorción por el lecho, es común que los metales se mezclen con materia orgánica o otros tóxicos orgánicos, formando complejos compuestos los cuales tienden a su sedimentación.

Existen otros mecanismos como intercambio iónico, o sorción física de superficies como el carbón activado.

Los tóxicos en general son compuestos que afectan directamente los organismos en medios acuáticos, se suplen de la cadena alimenticia para extender su efecto

¹ Resuspensión: Una remezcla de partículas de sedimentos y desechos que regresan al agua por tormentas, corrientes, organismos y actividades humanas como excavaciones. .

² Sorción: Procesos y reacciones que tienen lugar en los poros o en la superficie de un sólido.

en el ecosistema, Este fenómeno se conoce como biomagnificación, los organismos de las primeras etapas de la cadena trófica (plancton, algas y macro-invertebrados) al consumir alimentos, a la vez consumen trazas de los tóxicos que están concentrados en los mismos alimentos, y a su vez los acumulan en sus organismos, (bioacumulación), repitiendo el proceso en etapas superiores de la misma cadena alimenticia, hasta llegar a organismos superiores como peces e inclusive en el ser humano. Por tal razón, este proyecto pretende aportar en la investigación el comportamiento de transporte que sufre los metales pesados en un medio como es el agua, además de servir como documento de consulta para otras estudios de la misma línea de investigación.

Finalmente, se desea lograr implementar un modelo de calidad, que sea compatible con otros modelos, que puedan ser corrido, calibrado, y sirva de soporte para nuevas investigaciones.

CAPITULO II: MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO- CONCEPTUAL

2.1.1 Calidad del agua en espacios naturales: Impacto y Modelación

El aumento poblacional y su continua necesidad de desarrollo imponen progresivamente mayores exigencias a los sistemas hídricos, ya que la intensificación de la interacción del manejo del agua en una cuenca, considerando los sectores de energía, industria agricultura y antropogenia se traducen en trastornos ambientales, que modifican los sistemas acuáticos, manifestándose sobre la productividad de sistemas naturales. Esta preocupación, existente desde hace algunas décadas, se ha traducido en estudiar los sistemas hídricos, desde una perspectiva amplia que permita un manejo consecuente sobre las hoyas hidrográficas, dando especial significado a la dimensión ambiental en particular en los aspectos concernientes a la calidad del agua. Por ello desde una perspectiva integral del manejo de los recursos hídricos, es conveniente conocer la influencia o impacto ambiental, sobre el entorno y en particular en la calidad del agua de los cursos receptores además, las obras de infraestructura, actos administrativos que permiten otorgamiento de derechos de agua, manejo agrícola, o cualquier proyecto de inversión en una cuenca hidrográfica producen o eventualmente producirían, Impactos significativos sobre los ecosistemas y por consiguiente a los cuerpos superficiales o subterráneos de agua. Esto significa conocer, en el caso, condiciones existentes, y prever la alteración de la calidad del agua, que ocurriría posterior a la intervención humana.

Se podría decir entonces que para eventos impactantes se desarrollan herramientas validas para mejorar las condiciones ambientales cuando se conforman proyectos como la construcción de obra de riego o hidroeléctricas, instalación de alguna industria que evacue residuos líquidos o la incorporación de alcantarillado de aguas servidas, cambio de uso del suelo o mejoramiento del sistema de evacuación de aguas servidas de algunas ciudades, entre muchas otras posibilidades. La herramienta adecuada para estos fines es la denominada genéricamente **modelo de calidad de agua**.

De esta forma la calidad del agua de los espacios naturales se ve alterada y los impactos sobre ella deben ser evaluados, la forma más adecuada son los modelos de calidad de aguas.

Los modelos de calidad de aguas, permiten simular condiciones actuales y futuras, de tal manera, que es posible simular escenarios, que nos permiten anticipar las variaciones que sufrirán los diversos índices o parámetros de calidad de aguas, en el cuerpo acuático en estudio.

2.1.2 Concepto de calidad del agua

Es importante en este trabajo de tesis, definir el concepto que atañe a este trabajo y que esta envuelto en términos " calidad de agua ", ya que cualquier modelación, en este aspecto que se haga, estará siempre ligado a condiciones esperadas o

deseadas para los diversos usos que el hombre les quiera dar; en general, estas condiciones están establecidas por el uso del agua a través de las normas de utilización, que establecen cantidades mínimas o máximas según sea el caso, de sustancias o parámetros que aseguran el buen uso del recurso hídrico.

De la bibliografía leída referente al tema, se puede definir que la “calidad de agua” comienza por el concepto de “agua natural”, aquella porción de gotas que genera un caudal de escorrentía superficial y donde el proceso del ciclo del agua inicia. Se puede entender entonces que "agua natural" en el caso de aguas continentales, pertenece a una hoya hidrográfica, y su calidad depende de su geomorfología; más precisamente de las características de los suelos que la componen, de tal manera que pueden existir, y de hecho existen, por ejemplo, cuencas con aguas muy ricas en ciertos metales como por ejemplo arsénico en condición natural, de la cual erradamente se puede calificar como "agua contaminada", siendo que dicha característica de concentración esta dada por las condiciones geomorfológicas del lugar en la que se genera y en donde podemos decir que es una agua cruda en existencia, y que partiendo de este principio, sus características iniciales cambian en su recorrido. Es posible afirmar que en este punto del ciclo hidrológico que es la precipitación y escorrentía, el agua disuelve y arrastra sales como también partículas, e incorpora organismos vivos y materia orgánica, estos procesos pueden explicarse a través de las leyes de termodinámica: la primera referente a la conservación de la materia y la energía y la segunda, también llamada la ley de la entropía.

Por otro lado, de acuerdo al GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution), la definición de contaminación es: "Introducción por el hombre en el ambiente acuático de sustancias o energía que puedan causar o causen, efectos dañinos o tóxicos que perjudiquen los recursos vivos, constituyan un peligro para la salud humana, obstaculicen las actividades marítimas, comprendida la pesca, menoscaben la calidad del agua y disminuyan los valores estéticos o de recreación", de tal forma, que lo que pueda causar es contaminación y lo que cause es polución, introduciendo el concepto de "capacidad asimilativa", que no es mas sino la absorción de los contenidos de polución dentro del medio acuático, que da como inicio al proceso contaminante. Esta influencia humana comenzó a ser sensible al organizarse las ciudades. La preocupación inicial del hombre urbano era por su salud en relación con los residuos orgánicos, expresada con baños alejados del resto de las casas, en canales abiertos, en las calles, y finalmente en drenajes. El sistema de drenaje que conducía el agua servida a letrinas, fue posteriormente reemplazado por vertidos hacia ríos importantes o hacia el mar. Esta situación se agravó por el desarrollo industrial y el uso de las masas de agua como depositarias de tales residuos. Recién a comienzos del siglo XX comenzó la preocupación por el tratamiento en pozos sépticos que ha ido evolucionando a sistemas más avanzados de depuración de aguas negras.

Para concluir se puede aseverar que la calidad de agua esta dada en su calidad, al inicio de su formación como recurso, y puede medirse a través de sus características fisico-químicas y biológicas, cada una de ellas puede a su vez ser caracterizado por distintos parámetros que muestran detalladamente los componentes reales del agua.

2.1.3 La problemática de calidad del agua

De acuerdo a la Figura 2.1, sobre la contaminación de aguas fluviales pueden tener efecto las siguientes actividades o procesos:

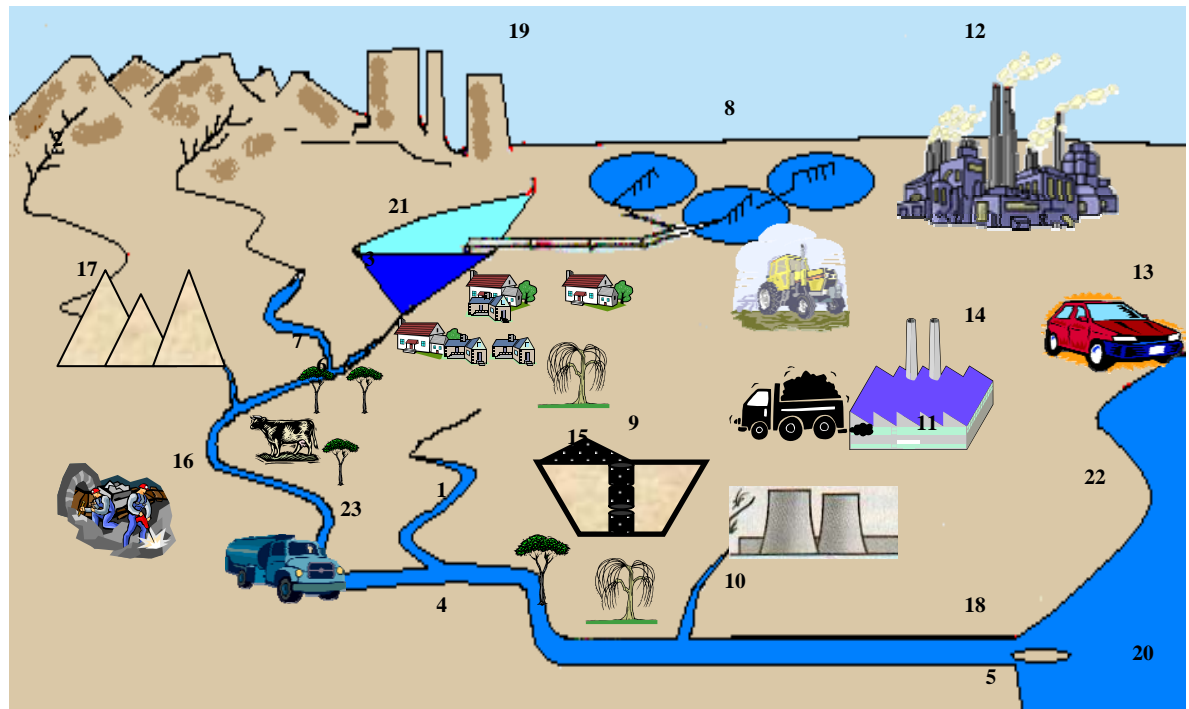
- 1) Efecto de deforestación.
- 2) Erosión antrópica.
- 3) Construcción de embalses.
- 4) La canalización de ríos.
- 5) El relleno de zonas húmedas.
- 6) La agricultura tradicional.
- 7) El tratamiento individual de aguas servidas.
- 8) La agricultura industrializada.
- 9) El riego masivo.
- 10) Las aguas residuales industriales con o sin tratamiento.
- 11) Contaminación atmosférica debido a la actividad industrial.
- 12) Contaminación atmosférica debido a la actividad urbana.
- 13) Contaminación atmosférica debido a vehículos de combustión interna.
- 14) Las aguas residuales urbanas con o sin tratamiento.
- 15) La contaminación de aguas subterráneas por actividad urbana e industrial.
- 16) Las aguas residuales de actividades mineras con o sin tratamiento.
- 17) La contaminación de aguas subterráneas por actividad minera.
- 18) Las aguas residuales de centrales energéticas.
- 19) La contaminación atmosférica por precipitación.
- 20) Eutrofización de lagos y embalses.
- 21) Eutrofización ¹ de ríos.

¹Eutrofización: La presencia de fuertes concentraciones de nitrógenos y especies de fósforos corrientes, permite

22) Aguas pluviales de las ciudades.

23) Accidentes en transporte de productos peligrosos.

Figura 2.1 Esquema de la contaminación de aguas fluviales. - Usg-Epa 2004



Si bien la lista anterior es extensa puede ser no lo suficientemente exhaustiva; Indudablemente los efectos de algunas actividades comparativamente con otras pueden cambiar en varios órdenes de magnitud, y en cuanto al tiempo causa-efecto, también existen variaciones importantes.

que estas presenten grandes incrementos en la producción de biomasa, en forma concreta el crecimiento excesivo de plantas, formando un fenómeno de sobre-fertilización.

2.1.4 Metales pesados

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones bajas. Los ejemplos de metales pesados incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd) el arsénico (As), el cromo (Cr), el talio (Tl), y el plomo (Pb); los metales pesados son componentes naturales de la corteza de terrestre, no pueden ser degradados o ser destruidos, en un grado pequeño se incorporan a nuestros cuerpos los alimentos, en el agua potable, suelo, y aire en ciclo como se muestra en el esquema, *figura 2.2.* como elementos, algunos metales pesados (cobre, selenio, cinc) son esenciales en el metabolismo del cuerpo humano, sin embargo, en concentraciones más altas pueden conducir al envenenamiento. El envenenamiento por metal pesado podría resultar, por ejemplo, de la contaminación del agua potable en tuberías, las altas concentraciones en el aire cerca de fuentes de la emisión, o producto alimenticios que contaminados ingresan en la cadena alimenticia.

Los metales pesados son peligrosos porque tienden a bioacumularse. La bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico, en un organismo biológico en un cierto tiempo.

Los metales pesados pueden entrar en un abastecimiento de agua por medio de residuos industriales depositándose en corrientes lagos y ríos. Los riesgos ambientales y de salud son de consideración, a continuación se describir los efectos de los metales pesados en el ambiente, los tres contaminantes mas importantes son Plomo, Cadmio y Mercurio.

2.1.4.1 Los efectos del cromo en el Ambiente

El Cromo se utiliza en el cemento, aleaciones del metal y los pigmentos para las pinturas, el papel, el caucho, y otros materiales. La exposición baja puede irritar la piel y causar la ulceración. La exposición a largo plazo puede causar daño del riñón, en el hígado, la exposición prolongado puede ocasionar problemas en el sistema circulatorio y el tejido fino nervioso. El cromo se acumula a menudo en la vida acuática, agregando el peligro de comer los pescados que pudieron haber sido expuestos a los altos niveles del Cromo.

2.1.4.2 Los efectos del cobre en el ambiente

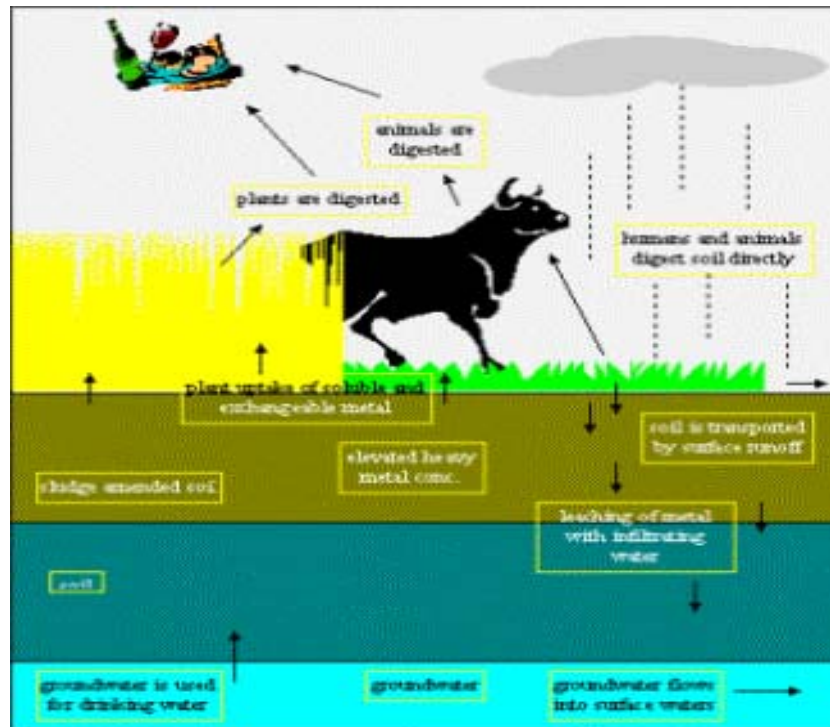
El cobre es una sustancia esencial en la vida humana, pero en altas dosis puede causar anemia, daño del hígado, riñón, e irritación en el estómago e intestino. La gente con la enfermedad de Wilson¹ tiene mayor riesgo para los efectos en su salud por la sobre exposición al cobre; El cobre aparece normalmente en agua potable de las tuberías de cobre,

¹ La Enfermedad de Wilson: enfermedad hereditaria autosómica recesiva. Su hecho principal es la acumulación de cobre en los tejidos.

2.1.4.3 Los efectos del plomo en el ambiente

En la exposición de los seres humanos al plomo pueden dar lugar a una amplia gama de efectos biológicos dependiendo el nivel y duración de la exposición. Los diferentes efectos ocurren sobre una amplia gama de dosis, con el feto que se convierte e infante que es más sensible que el adulto. Los altos niveles de la exposición pueden dar lugar a efectos bioquímicos tóxicos en los seres humanos que alternadamente causan problemas en la síntesis de la hemoglobina, de efectos sobre los riñones, del aparato gastrointestinal, del sistema reproductivo, y daños agudos o crónicos al sistema nervioso. (Ver figura 2.2)

Figura 2.2 Procesos de absorción de metales pesados
Lenntech – Aguas Residuales



2.1.5 Modelo de trazas de metales: balance de masa y distribución de cargas residuales en ríos.

Antes de poder llevar a cabo el modelación de trazas de metales en ríos es importante recordar que los ríos son canales abiertos que tienen velocidades de flujo, los canales pueden variar con respecto al tiempo y la distancia longitudinal. De igual forma, los ríos poseen áreas transversales que pueden variar con la distancia longitudinal. La ecuación de St. Venant¹ es un modelo longitudinal para el flujo de canales abiertos en estado no estable, la cual se emplea para determinar hacia donde se está moviendo el agua:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{b} q_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \left(\frac{Q^2 b}{A^2} - gA \right) - \frac{\partial Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} - gAS_f \quad (2)$$

Donde:

Q = Distancia, L³/T.

t = Tiempo, t.

Z = Elevación absoluta del agua sobre el nivel del mar, L.

A = Área total de la sección transversal, L².

¹ Ecuación St Venant: desarrollo de ecuaciones bidimensionales, de energía y fricción en termodinámica y flujos compresible

b = Amplitud del nivel del agua, L.

g = Aceleración gravitacional, L/T².

X = Distancia longitudinal, L.

qi = Entrada de flujo lateral por unidad de longitud del río, L²/T.

Sf = Pendiente de fricción.

La ecuación que representa la pendiente de fricción está dada por:

$$S_f = \frac{f P Q^2}{8g A A^2} \quad (3)$$

Donde:

P = Perímetro de Humedad, L.

f = Factor de fricción Darcy-Weesbach.¹

Con el objeto de simplificar las ecuaciones (1) y (2) convirtiendo el sistema en un sistema de estado constante, se consideran las siguientes suposiciones:

- 1) La entrada de flujo lateral, qi, es minimizada y tomada en cuenta en el inicio, cada segmento de corriente.

¹ La ecuación de Darcy: es muy importante en la hidráulica, Permite el cálculo de la pérdida de carga debido a la fricción dentro una tubería. Ver Glosario

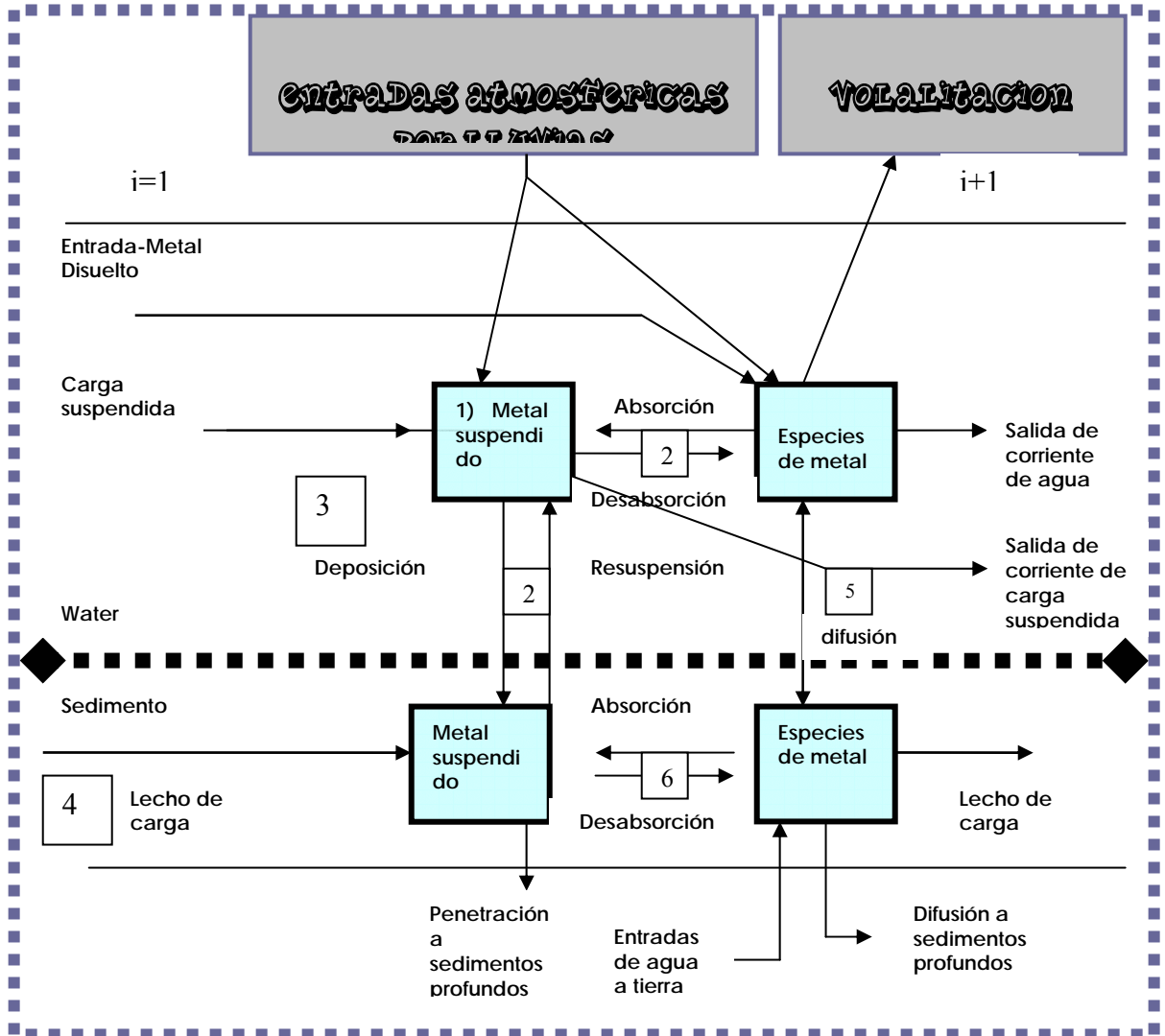
2) El río puede ser segmentado, de tal forma que $Q(x)$ es aproximadamente constante dentro de cada segmento.

3) El río puede ser segmentado de tal forma que $A(x)$ es aproximadamente constante dentro de cada segmento.

Sí Q y A son aproximadamente constantes tanto en X como en t , entonces la velocidad se torna constante y el problema se convierte en uno de flujo constante.

La representación esquemática del transporte de metales en un río se puede observar en la *Figura 2.3, "Proceso de Absorción de Metales Pesados"*.

Figura 2.3 : Proceso de Absorción de Metales - Edwar Thomas - Absorción de Metales



Notas Explicatorias a la Figura 2.3 “ Proceso de Absorción de Metales Pesados”:

- 1) Metales en la fase adsorbida particulada o en la fase disuelta del sedimento.

- 2) Intercambio entre iones de metales sorbidos e iones de metales acuosos por medio de mecanismos de adsorción y desorción.
- 3) Dentro de la fase disuelta, los metales pueden presentar formas complejas con un número de ligando diferentes en aguas naturales.
- 4) Iones metálicos que forman complejos superficiales en el número de sitios diferentes de la materia particulada. (Materiales que se observan por movimiento de H₂O del río y corrientes lluvia).
- 4) El lecho sedimentable puede ser erosionado, permitiendo la entrada de la columna

de agua de tal forma que los sólidos suspendidos, pueden sedimentar y quedar depositados en el lecho.
- 6) Los iones metálicos del agua capilar del sedimento puede difundirse en la carga superior de la columna del agua o viceversa.

El enfoque del modelo consiste en acoplar un modelo de equilibrio químico de la ecuación de balance de masa para determinar la concentración total del metal en la columna de agua.

De esta forma no se requiere escribir una ecuación de balance de masa para cada especie química.

A diferencia en la modelación de sustancias orgánicas, se considera que estas se degradan; y en el modelación de trazas de metales, se asume que estos sufren reacciones químicas o transformaciones, medidas por reacciones biológicas, Sin embargo los totales de la masa del metal permanecen invariables. Cuando la existencia del equilibrio químico no aplica, entonces cada especie química debe ser simulada utilizando su propia ecuación de balance de masa.

El caso más básico de la distribución de la carga residual es un cálculo sencillo de dilatación asumiendo agitación completa de la descarga residual con respecto a la concentración de los metales corriente arriba. Se asume como condición de caso extremo que la totalidad de la concentración de los metales (concentración adsorbida disuelta y particulada) son biodisponible para la biota. El metal particulado puede más tarde biodisponerse en los organismos acuáticos o pueden hacerse biodisponible en los organismos bénticos después de que el metal se ha depositado en el sedimento.

2.1.6 Procesos Físicos del Transporte

Una gran variedad de procesos afectan el destino y el transporte de solutos. Se define soluto como cualquier sustancia o entidad que se transporta aguas abajo por medio del flujo de agua. (Bencala y Walters, 1996). Bajo esta definición, los solutos pueden ser contaminantes, tales como pesticidas, hidrocarburos o sustancias naturales como por ejemplo los gases disueltos o nutrientes.

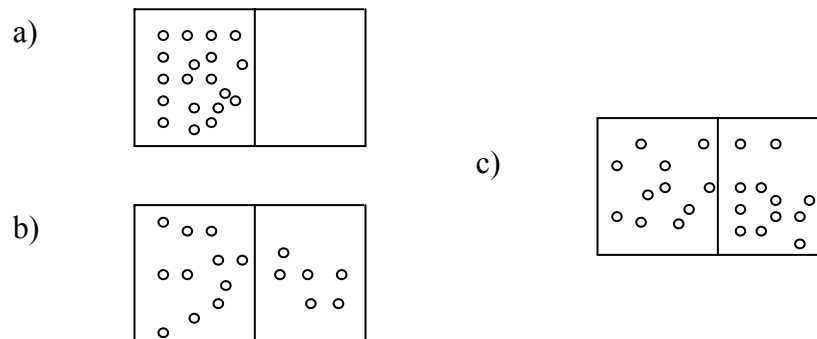
Los procesos físicos juegan un papel importante en la determinación del destino de los solutos en los ambientes del agua superficial. Un ejemplo sería la liberación de tinta o una sustancia conservativa en el centro de una corriente de agua que fluye libremente. La tinta forma una nube que se mueve aguas abajo con el flujo de agua, este proceso se conoce con el nombre de **Advección**, describe el transporte de solutos a la velocidad del flujo con la velocidad media. La nube se mueve hacia aguas abajo, y los procesos de mezcla a escala pequeña incrementa el volumen en contacto con la tinta y por lo tanto disminuye la concentración. A este proceso se le ha denominado **Dispersión**, la cual se atribuye a dos fenómenos físicos: La difusión molecular y las fluctuaciones de velocidad causadas por los esfuerzos cortantes.

La difusión molecular ocurre debido al movimiento aleatorio de partículas tal como se explica en la *figura 2.4*: (a) Tiempo inicial t_0 , una membrana impermeable que divide el tanque. En la parte izquierda, tiene una sustancia soluble; en la parte derecha contiene agua destilada. (b) Después, se retira la membrana

impermeable, ocasionando un movimiento aleatorio que permite que las moléculas de la sustancia vayan a la parte derecha del tanque. (c) Finalmente luego de un largo período de tiempo, se logra una distribución uniforme de moléculas a través del tanque. La difusión molecular se debe a procesos de mezclado en aguas con baja velocidad de flujo, como en lagos en reposo o aguas subterráneas.

El papel de la difusión molecular en ríos y corrientes no es tan importante, sin embargo, la variación en la velocidad llega a ser el mecanismo predominante en el mezclado.

Figura 2.4 Tanque que representa la difusión molecular - Díaz y Díaz Uniandes 2002



El mezclado aumenta debido a los efectos de fricción o esfuerzos cortantes sobre el perfil de velocidad, en la *figura 2.5*, se exhibe un perfil vertical de velocidad de una corriente típica. Debido a la naturaleza rugosa del lecho del río, la velocidad longitudinal tiene su mínimo cerca al lecho. Generalmente la velocidad aumenta con la distancia desde el lecho, pero disminuye cerca de la superficie por el efecto de la velocidad del viento. La velocidad en un río también varía en sentido horizontal, esta tiene su máximo valor en el centro de la línea del canal; disminuye

a medida que se acerca a la orilla del río. Estas variaciones en la velocidad ocasionan una considerable mezcla en la columna de agua.

Figura 2.5 Perfiles de velocidad de advección y dispersión en un canal - Díaz y Díaz Uniandes 2002

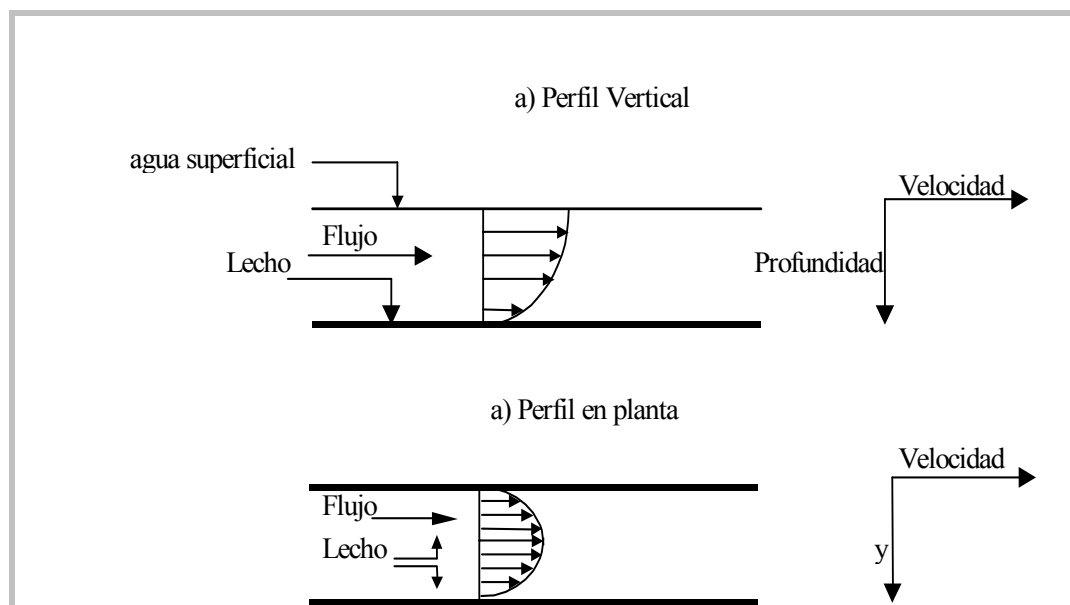
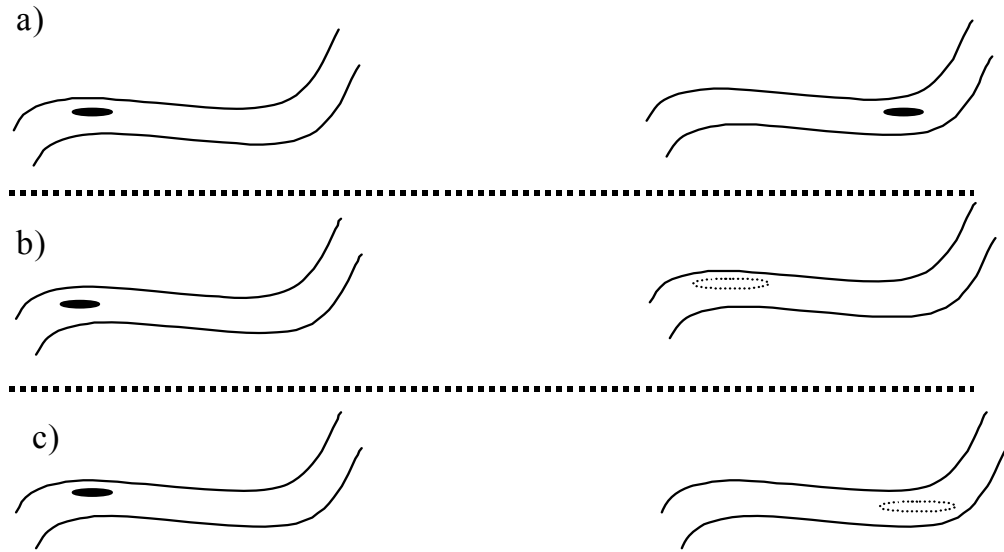


Figura 2.6 Efectos de Advección y Dispersión en una nube de tinta. - Díaz y Díaz Uniandes
2002



En la *figura 2.6* se observan los dos efectos combinados de advección y dispersión los escenarios de la nube de tinta viajando a) por efecto de solamente la dispersión b) por efecto de solamente la advección y c) ambos efectos.

2.1.7 Ley De Conservación de Masa:

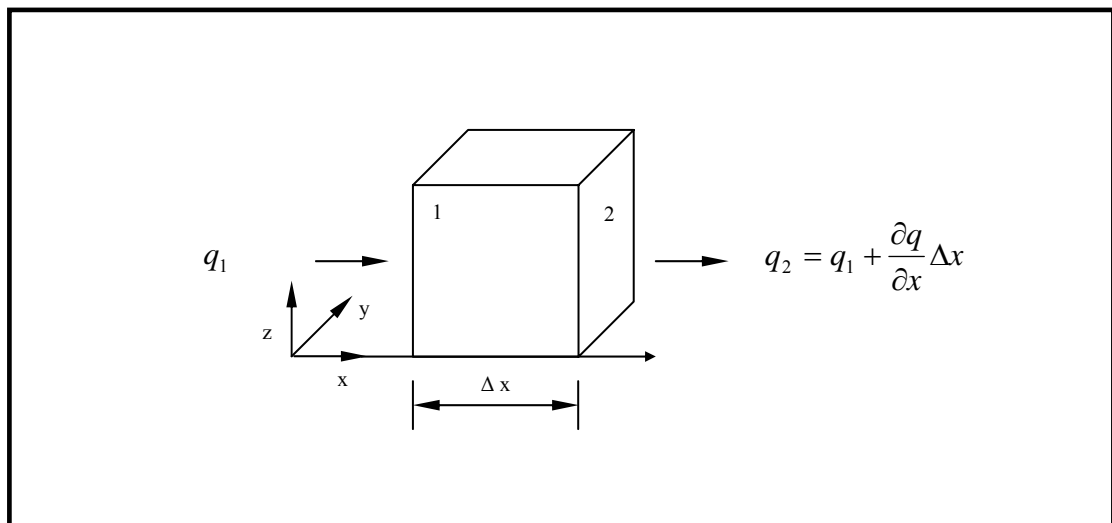
Una ecuación que describe los efectos temporales y espaciales de la advección y dispersión sobre la concentración de soluto se exhibe usando un concepto fundamental, la conservación de la masa. Esta de simplemente establece que la acumulación de masa en una unidad de volumen dentro de un cuerpo de agua es

igual a la diferencia entre la masa que entra y la masa que sale por ese volumen de agua

$$\text{Masa que entra} - \text{Masa que sale} = \text{Acumulación} \quad (1)$$

Cada termino de la ecuación esta expresado en unidades de masa por tiempo [M/T], además el volumen unitario del agua (volumen de control) es empleado para desarrollar la misma ecuación de conservación de masa.

Figura 2.7 Volumen unitario de agua (volumen de control) Steven C. Chapra.



Este es empleado para desarrollar la ecuación de conservación de masa. Una ecuación de balance de masa se desarrolla mediante la consideración de fluxes que atraviesan el volumen a través de la superficie 1 y los fluxes que salen a través de la superficie 2. No se consideran los fluxes en las direcciones y ó z

Para mayor simplicidad asumimos que la corriente es espacialmente uniforme, o sea que el flujo por unidad de área es constante y que las propiedades de mezcla no varían en el espacio, además, se asume flujo estable, quiere decir que la velocidad y volumen no cambia con respecto al tiempo. Finalmente, consideramos solamente flujos entrantes en la dirección x , despreciando el flujo por unidad de área (flux)¹ tanto en el plano Y como en el plano Z . Asumiendo implícitamente que las concentraciones de soluto varían en dirección aguas abajo. Obviamente esto ocurre rara vez en la naturaleza, dicha aproximación es válida cuando existe una dimensión predominante es decir en corriente de poca profundidad y anchura, pero gran longitud, como es el caso de un tramo del río.

Los términos de la ecuación [1] escritos en forma diferencial para la acumulación serán:

$$\text{Acumulación} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\partial m}{\partial t} \quad [2]$$

Donde m es la masa y t es el tiempo. Note que la masa es igual al producto de la concentración por el volumen, como el volumen es constante entonces la ecuación anterior es:

$$\text{Acumulación} = V \frac{\partial C}{\partial t} \quad [3]$$

Donde V es el volumen [L^3] y C es la concentración del soluto [ML^{-3}]. El lado derecho de la ecuación [1] se desarrolla considerando el flux de soluto (masa a través de las superficies 1 y 2 de la figura 2.7), el flux que entra al volumen de

¹ Flux: Flujo por unidad de área

control q_1 , y el flux que sale q_2 , observe el flux que entra es igual al que sale del volumen de control, además el flux a través de todo el volumen de control:

$$q_2 = q_1 + \frac{\partial q}{\partial x} \Delta x \quad [4]$$

donde Δx es la longitud del volumen de control [L]

Ahora consideramos los fluxes individuales debido a la advección y a la dispersión, el flux advectivo dentro de la superficie de control (a través de la superficie 1) es igual al producto de la velocidad advectiva U [L/T], e igual a la concentración en la superficie¹ C_1 .

$$Flux_{ind} = q_{1adv} = UC_1 \quad [5]$$

empleando la ecuación [4], el flux advectivo hacia fuera del volumen de control (a través de la superficie 2) esta dada por:

$$Flux_{ind} = q_{2adv} = UC_2 = UC_1 + U \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x \quad [6]$$

Donde C_2 es la concentración de soluto en la superficie 2.

Los fluxes debidos a la dispersión se desarrollan considerando ley fundamental que gobierna la transferencia de masa, la difusión. La ley de Fick¹ de la difusión, establece que el flux de masa debido a la difusión molecular es proporcional al

¹ Ley de fick: forma y características de difusión y distribución especial molecular.

gradiente de concentración $\partial C/\partial x$, análogamente, esta ley puede usarse para describir el flux de masa dispersiva. Este flux de masa esta dado por :

$$q_{disp} = -D_L \frac{\partial C}{\partial x} \quad [7]$$

Donde D_L es una constante de proporcionalidad conocida como el coeficiente de dispersión longitudinal [L^2T^{-1}]. El balance en términos del flux para el volumen de control es:

$$FluxIn_{disp} = q_{1disp} = -D_L \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_1 \quad [8]$$

$$Fluxsalida_{disp} = q_{2disp} = -D_L \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_2 = - \left[D_L \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_1 + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \Delta x \right] \quad [9]$$

aquí la ecuación [1] se ensambla en usando la acumulación y los términos de flux desarrollados arriba las ecuaciones [3], [5], [6], [8] y [9] se combinan para dar:

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = \left[AUC_1 - AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \left[AUC_1 + AU \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x - AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_1 - AD_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \Delta x \right] \quad [10]$$

Donde A es la sección transversal de la corriente [L^2] Porque el flux esta especificado, sobre una base de por unidad de área, cada flux se multiplica por A para obtener las unidades usadas en la ecuación [1] [MT^{-1}].

2.1.8 Conductividad

La conducción específica, también es conocida como conductividad, es la medición de la habilidad que posee el agua para transportar corriente eléctrica. Esta transmisión de corriente, depende en gran medida de la cantidad de materia sólida disuelta en el agua como las sales. En el agua pura, como es la destilada, puede tener muy poca conductividad y en contraste, el agua de mar tendrá una conductividad mayor por la concentración salina que posee. El agua lluvia, frecuentemente disuelve los gases y el polvo que se encuentran en el aire y por lo tanto, tiene una conductividad mayor que el agua destilada. La conductividad específica es una medida importante de la calidad del agua, ya que indica la cantidad de materia disuelta en la misma. Su medida es de Micro Siemens sobre Centímetro ($\mu\text{s} / \text{Cm}$).

2.1.9 Ensayo de trazadores

Los experimentos de trazadores proveen la mejor información disponible para calibrar y evaluar la aplicación de modelos hidráulicos, empleados en la modelación de la calidad del agua. La información obtenida por los estudios de trazadores puede ser utilizada para describir los efectos advectivos y dispersivos del transporte de solutos, en la aplicación de los modelos de calidad. Siendo valioso en estudios de calidad del agua incluyendo los siguientes fines:

- Determinar tiempo de viaje en los cuerpos de Agua
- Determinar coeficientes de dispersión y patrones de mezcla en agua debajo de las descargas de agua y tributarios
- Determinar la dilución en mediciones de re-dirección.
- Estudiar patrones de circulación y problemas de estratificación
- Determinar caudales en corriente
- Estudiar movimientos de agua subterránea
- Estudiar balances de masa
- Investigar fuentes de agua y procedencia

2.1.9.1 Características de un trazador

Para que un trazador sea efectivo debe ser:

- a. Soluble en Agua
- b. Detectable a bajas concentraciones por los equipos de medición.
- c. Tener baja interferencia con la concentración base o de fondo
- d. No ser nocivo para la salud.
- e. No ser costoso
- f. Estable o conservativo

2.1.9.2 Trazadores importantes

Los trazadores más importantes o más utilizados son:

- a. Rodamina WT (Etileno glycil)
- b. Rodamina base acida
- c. Sal de mesa NaCl
- d. Litio
- e. Bromo
- f. Aminoácido
- g. Materiales radioactivo Pyramnina

El tipo de trazador usado puede variar según la aplicación. **Ejemplo:** Sal de cocina (mesa) es utilizado para estimar patrones de mezcla en estuarios, temperatura, aunque presenta propiedades no conservativas (transferencia de calor en la superficie). Es muy utilizada en la estimación de la mezcla vertical en lagos y embalses.

La mayoría de trazadores comerciales son altamente fluorescentes en soluciones rebajadas lo que permite una fácil detección a bajas concentraciones que no son detectable por el ojo humano.

2.1.9.3 Tipos de estudio de trazadores

Los estudios de trazadores se pueden dividir a partir de 2 tipos de inyección, la **inyección instantánea** y la **inyección continua**, la instantánea se utiliza principalmente para estimar tiempos de viaje y dispersión, mientras que la inyección continua presenta ventajas para estimar diluciones en condiciones de estado estable.

2.1.9.4 Inyección Instantánea

Consiste en inyectar una masa conocida de trazador en un tiempo relativamente corto dentro de un sistema para luego monitorear el movimiento de la nube del trazador. El movimiento del centroide de la nube del trazador define el tiempo de viaje, el cambio en la distribución de la nube del trazador define la dispersión, estos estudios son muy útiles para calibrar y evaluar modelos hidráulicos de flujo al igual que para prescindir tiempo de arribo a una determinada localización y picos de concentración para obtener resultados precisos.

Con el método de inyección instantánea se debe:

- medir el trazador en dos o mas puntos aguas abajo.
- Medir el trazador independiente, el caudal, el tiempo de pasaje del trazador en cada estación de medición.

- Medir completamente la distribución de la nube del trazador (usualmente la cola es bastante larga)
- Medir en lo posible en mas de un punto de la sección transversal para evaluar la distribución de la masa del trazador y estimar la dispersión lateral para la inyección instantánea bajo condiciones de flujo permanente y en presencia del trazador conservativo se tiene que:

$$M = Q \int C \, dt \quad (1)$$

Donde M es la masa inyectada de trazador aguas arriba, Q es el caudal y C es la concentración medida aguas abajo, a partir de la ecuación es posible hallar el valor del caudal, conociendo la masa del trazador inyectada y calculando el área bajo la curva de la distribución de concentración del trazador en los diferentes puntos de medición, la cual representa la integral anterior, por lo tanto si existe una medición de caudal independiente (mediante aforos) se puede chequear la validez del experimento con trazadores, conservación de masa y mezcla completa.

Si se miden dos distribuciones aguas abajo se pueden chequear las ganancias del estado estable, lo cual debe estar muy cercana en el caso del trazador conservativo y se calcula mediante la expresión:

$$SSG = \frac{\int_0^{t_2} C_2 dt}{\int_0^{t_1} C_1 dt} \quad (2)$$

2.1.9.5 Inyección Continua

Consiste en la inyección de una masa de trazado dentro de un lapso de tiempo conocido, el trazador es monitoreado a través del tiempo en los diferentes puntos de medición este monitoreo puede ser continuo o se puede concentrar en el periodo inicial de dilución y luego seguir con mediciones sucesivas periódicas de tal manera que se pueda obtener resultados apreciables.

2.1.10 Conceptos de modelación

Los modelos de calidad de aguas tienen por finalidad determinar las nuevas concentraciones de contaminantes del cuerpo de agua en cada punto y a lo largo de zonas de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidas.

De acuerdo a lo anterior, podemos establecer que un modelo de simulación es la herramienta adecuada para la predicción del comportamiento de la calidad del agua en un río u otro cuerpo de agua, Correspondiendo a un set de expresiones matemáticas definir los procesos físicos, biológicos y químicos a que tienen lugar en este medio. Estas ecuaciones están basadas fundamentalmente en la conservación de la masa y/o energía, de tal forma que existen fenómenos como: a) ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema

b) transporte y las reacciones en el cuerpo de agua (Loucks . 1982). El transporte puede ser por advección y/o dispersión, por lo tanto dependerá de las características hidrodinámicas e hidrológicas del cuerpo de agua.

Para que un modelo de calidad de aguas pueda ser aplicado confiablemente, para la predicción de las condiciones de los diversos parámetros, tiene que cumplir, obviamente, con la condición básica de reproducir aceptablemente las condiciones actuales.

El problema, en sí, es fundamentalmente tridimensional (Somlyódy L. 1978) lo que lo hace difícil de abordar. Esta condición hace que el desarrollo de modelos de calidad de aguas sea una ciencia y un arte (Loucks . 1982).

Los procesos fundamentales que rigen la calidad de agua de un cuerpo acuático, ya sean fluviales o lacustres, son los hidrológicos, térmicos y bioquímicos. Los procesos hidrológicos deben entenderse, como aquellos exclusivamente relativos a la hidrología del cuerpo de agua, como aquellos referidos al comportamiento hidrodinámico.

El objetivo primario del desarrollo de cualquier modelo de calidad de agua, es producir una herramienta que tenga la capacidad de simular el comportamiento de los componentes hidrológicos y de calidad de un cuerpo de agua. El desarrollo de esta herramienta para simular el comportamiento del prototipo, se hace aplicando un modelo matemático, producto de tres fases generales:

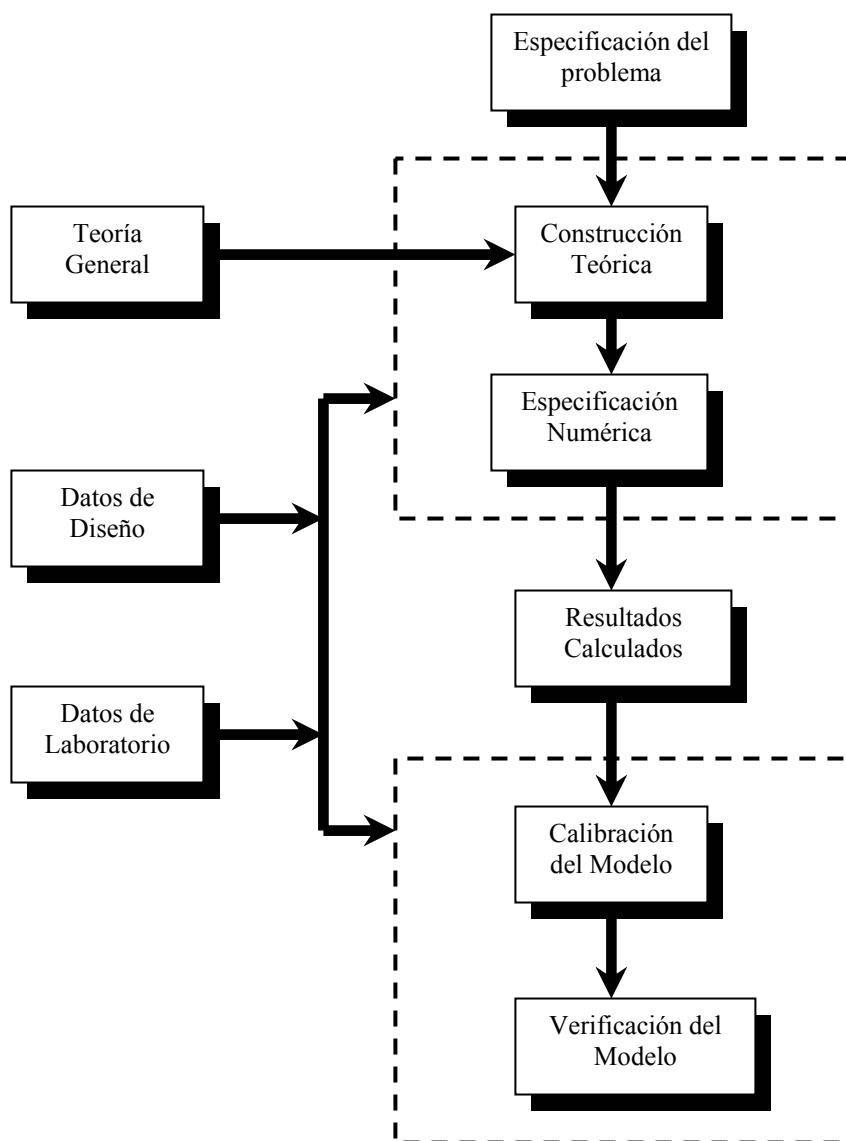
1. Representación conceptual.
2. Representación funcional.
3. Representación computacional.

El desarrollo de un modelo de calidad de aguas, así como de cualquier otro, debe seguir las etapas que se muestran en la *figura 2.8*.

La representación conceptual comprende una idealización gráfica del prototipo, considera la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas y la identificación de las condiciones de borde e interrelación entre las partes del prototipo. Normalmente, este proceso impone divisiones del prototipo en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos que el modelo debe servir, estos elementos se definen de acuerdo a algunas simples reglas geométricas, y se diseña el modo por el cual serán conectados tanto física como funcionalmente para ser parte integrante de un todo.

Una parte de esta estructuración es la designación de aquellas condiciones de borde a ser consideradas en la simulación. *figura 2.8*

FIGURA 2.8: Etapas de un modelo de calidad de agua. Modificado de Thomam y Mueller (1987)



La representación funcional vincula las características físicas, procesos, y condiciones de borde en sets de ecuaciones matemáticas. Esto implica la definición

precisa de cada variable y sus relaciones con todos los otros parámetros que caracterizan el modelo o sus relaciones entrada-salida.

La representación computacional es el proceso por el cual, el modelo funcional es traducido a formulas matemáticas y procedimientos computacionales requeridos para la solución del problema.

2.1.11 MODELO DE ZONA MUERTA AGREGADA (ADZ)

Durante el desarrollo de la investigación para lograr obtener la forma adecuada que logrará demostrar las cualidades de comportamiento que sufren los contaminantes en un cuerpo de agua, reunimos las consideraciones necesarias en cuanto a la formulación e implementación práctica de varios modelos de calidad de agua, uno de estos modelos es el Modelo ADE (Advección Dispersión Equation) desarrollado por Taylor en 1954. Este modelo viene siendo evaluado en las dos ultimas décadas para su utilización práctica en redes de distribución de agua potable y flujo en ríos, en donde tiene su mejor desempeño, sin embargo se ha reconocido que la justificación teórica para la utilización del modelo ADE es limitada debido a las consideraciones y a las restricciones que dieron lugar a su nacimiento (Fonnegra 2002), Pero cabe anotar que dicho modelo tiene consideraciones importantes para este trabajo de investigación, referente al transporte, la advección y dispersión, definidos en este documentos en el literal 2.1.6 Procesos Físicos del Transporte. Así mismo da la entrada al manejo del modelo ADZ (Agregated Dead. Zone - Beer y Young 1983), que se define como la

Zona muerta agregada y que dentro de la variedad de modelos describen el transporte de solutos bajo condiciones de estado estable; Las zonas muertas son en esencia, las principales responsables de la dispersión que experimenta una nube de soluto en el agua. El modelo ADZ simplifica el fenómeno dispersivo en una zona de almacenamiento simple con un volumen definido y con un tiempo de residencia asociado.

Los principales parámetros de formulación del modelo son los siguientes:

- Tiempo de residencia (T_r): representa el componente del tiempo de viaje global asociado con la dispersión.
- Retraso advectivo (τ): representa el componente del tiempo de viaje global asociado con la advección.
- Tiempo de viaje del soluto (t): define el tiempo total que el soluto permanece el tramo siendo sometido a Advección y dispersión (ver *Figura 2.9*).

$$T = T_r + t \quad (1)$$

La fracción dispersiva (DF) es una proporción que representa que tanto volumen total de un tramo se encuentra completamente mezclado.

$$DF = \frac{T_r}{T} = 1 - \frac{\tau}{t} \quad (2)$$

Entonces el modelo ADZ puede describirse de forma discreta (Young y Beven, 1993)

$$(S_k) = a_1 s(k - 1) + b_o s_U (k - \delta) \quad (3)$$

Donde los coeficientes :

$S(k)$ = Concentración aguas arriba

S_U = Concentración aguas abajo

k = Constantes de Destino

δ = Retrazo advectivo en múltiplos de Δt

$$\delta = \frac{\tau}{\Delta t} \quad (4)$$

$$a_1 = -\exp\left(\frac{\Delta t}{T_r}\right) \quad (5)$$

$$b_0 = 1 + a_1 \quad (6)$$

$$T_r = \frac{\Delta t}{\log_e(-a_1)} \quad (7)$$

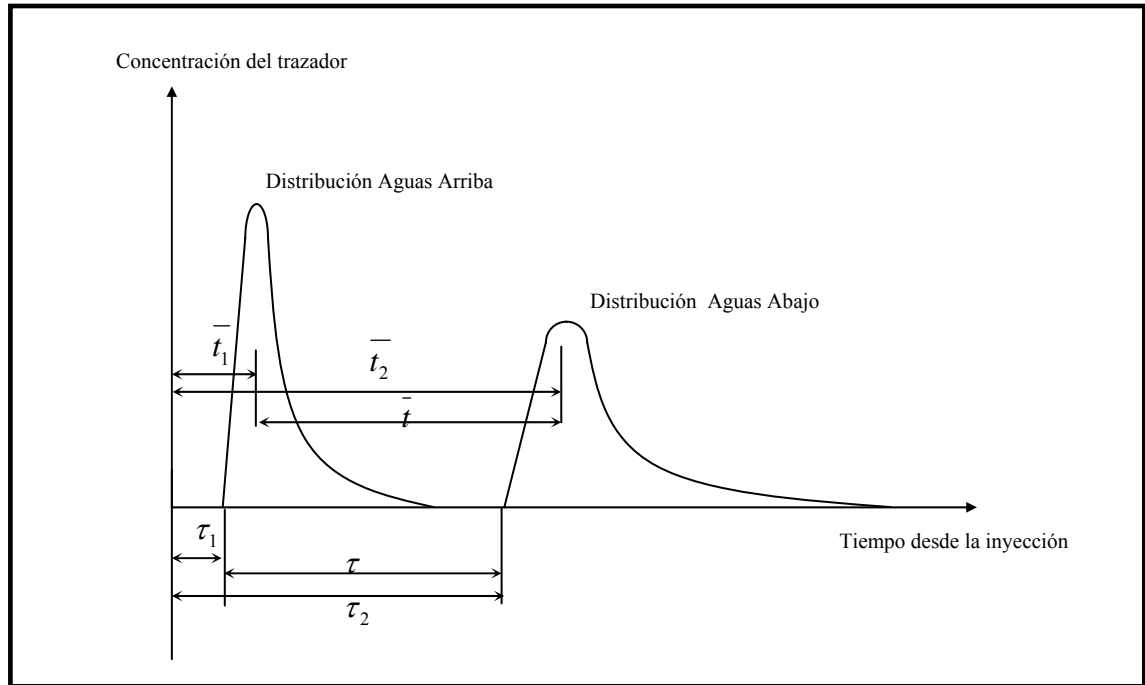
$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i t_i + c_{i+1} t_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i + c_{i+1})(t_{i+1} - t_i)} \quad (8)$$

$$\bar{c} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(c_{i+1} + c_i)(t_{i+1} - t_i)}{2(t_n - t_0)} \quad (9)$$

$$Q = \frac{M}{\int_0^t c dt} = \frac{M}{\bar{c}(t_n - t_0)} \quad (10)$$

$$s_t^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i t_i^2 + c_{i+1} t_{i+1}^2)(t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=1}^{n-1} (c_i + c_{i+1})(t_{i+1} - t_i)} - (\bar{t})^2 \quad (11)$$

Figura 2.9 Diagrama que representa Tiempo de Viaje



2.1.12 ECUACIÓN DE ADVECCIÓN-DISPERSIÓN (ADE)

Con base en la ley de conservación de masa, empleando la relación $V = Ax$ definida en el *Capítulo II*, para la ecuación esta última simplificada dará:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Esta es la **Ecuación de Advección Dispersión (ADE)** con coeficientes constantes (U y D_L son constantes en espacio y tiempo). La Ecuación de Advección Dispersión,

describe la variación temporal y espacial en la concentración de soluto, C , sometido a las suposiciones dadas previamente.

Aunque la advección y la dispersión son procesos físicos que afecten solutos en muchas aguas superficiales, otros procesos físicos pueden ser de importancia para un cuerpo de agua dado.

Por ejemplo muchos cuerpos de agua ganan cantidades significativas de caudal con corrientes laterales que entran, como resultado de esto el caudal hacia aguas abajo se incrementa, estas corrientes laterales también aportan cantidades importantes de solutos, a la ecuación de advección dispersión se le puede añadir estos términos de corrientes entrantes.

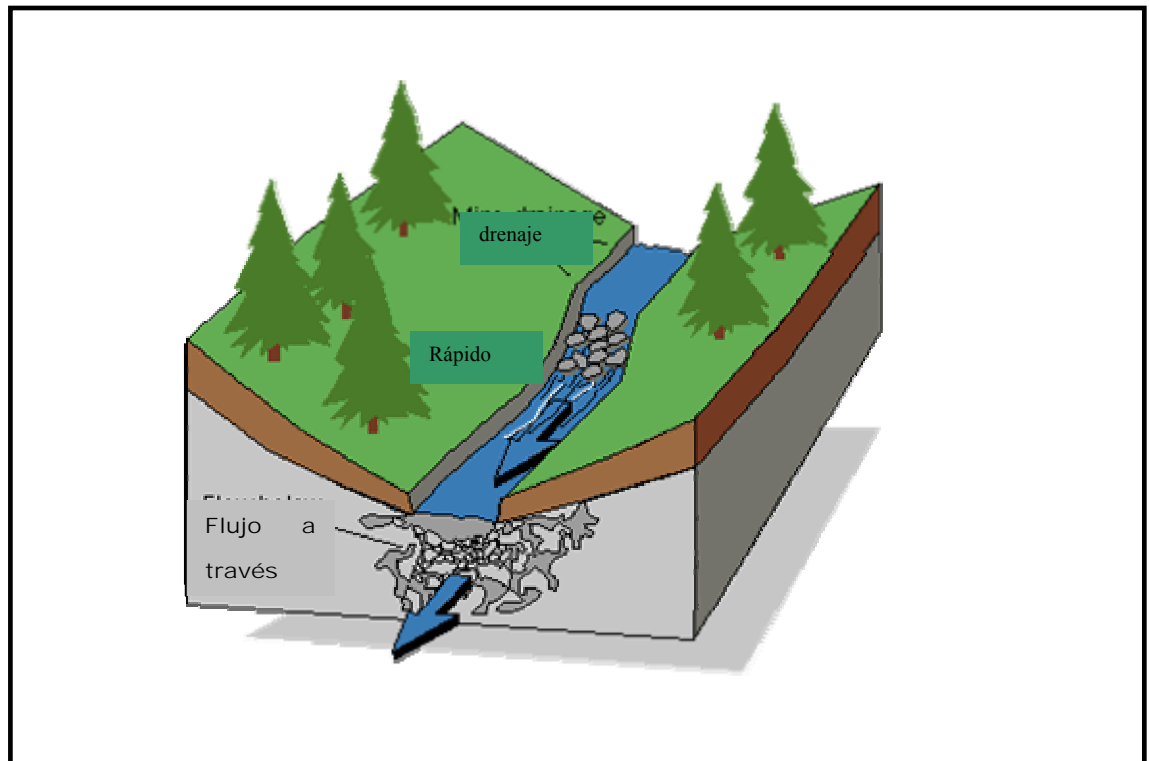
2.1.13 ALMACENAMIENTO TEMPORAL (TS)

El almacenamiento temporal TS (Bengala y Walters, 1983) se ha identificado en muchas corrientes pequeñas, donde los solutos pueden ser detenidos en pequeños *eddies* (remolinos) temporalmente y en zonas estancadas de agua que son estacionarias relativas al rápido movimiento de las corrientes de agua cercanas al centro del canal, además, porciones significantes del flujo pueden moverse a través de la gruesa grava del lecho y sobre las áreas porosas dentro de

la orilla; estos bolsillos de agua y áreas porosas del lecho son las dos áreas que contribuyen al almacenamiento temporal, tal como se muestra en la *Figura 2.10*.

En un experimento de trazadores como el que se realizó en este trabajo, se inyecta un trazador conservativo (inerte químicamente) en la corriente y las muestras se toman en varios puntos aguas abajo.

Figura 2.10: Almacenamiento temporal ocurre cuando los solutos entran en pequeños bolsillos de agua que se mueve lentamente y cuando los solutos entran a través del medio poroso que ocasiona que se incremente el banco y el lecho de un canal.



Un tiempo después las concentraciones de soluto inyectado, aumentan en los puntos de muestreo. Si la inyección es continua, el trazador alcanza una meseta que se mantiene hasta que se interrumpe la inyección. Después que ha cesado la inyección, la concentración del trazador disminuye hasta que alcanza el valor previo a la inyección.

Los análisis de trazadores empleados para la ecuación de advección dispersión, se consideran para algunas de las mezclas observadas, a través de la especificación del coeficiente de dispersión; no se puede describir la forma del perfil de concentración solamente mediante este análisis, sin embargo un mezclado adicional debido al almacenamiento temporal se deben tener en cuenta. Dos periodos característicos de tiempo del perfil son de interés. El primer periodo relaciona el arribo del pulso. El tiempo de arribo del trazador es retrasado para la corriente real, sin embargo, como se indico por el incremento gradual en la concentración del trazador. Este retraso en el arribo es debido a la dispersión y al movimiento de la masa del trazador dentro de las áreas de almacenamiento.

Durante este tiempo inicial, las zonas de almacenamiento temporal actúan para reducir la masa dentro del canal principal, durante este periodo inicial el trazador hace como esta vía en el lecho del río y el movimiento lento dentro de los bolsillos del agua.

Un segundo periodo de tiempo de interés corresponde al cese de la inyección de trazador. Dado un sistema puramente advectivo, la concentración de trazador

cae instantáneamente desde la concentración de la meseta hasta la concentración previa. Durante este periodo de tiempo, la agrupación de tiempo en la zona de almacenamiento generalmente excede la que esta en el canal principal y la masa del trazador vierte de la zona de almacenamiento produciendo la cola observada. En resumen, la zona de almacenamiento temporal funciona como un sumidero durante las etapas iniciales de la inyección del trazador y como fuente de trazador durante las etapas siguientes. La ecuación de advección dispersión (ADE) no tiene en cuenta los efectos de corrientes laterales y zonas de almacenamiento.

Sin embargo las corrientes reales no son espacialmente uniformes, como las áreas seccionales varían sobre distancias cortas y figuras estructurales como pedregones y árboles influyen en el de mezclado; además las corrientes, el caudal varían en el tiempo debido a efectos de los aguaceros, deshielo evapotranspiración y apropiación del agua. Existe una ecuación que tiene en cuenta las restricciones mencionadas anteriormente, dicha ecuación es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_L}{A} (C_L - C) + \alpha (C_s - C) \quad (1)$$

donde α es un coeficiente de transferencia de masa de primer orden, que controla la tasa de intercambio entre el canal principal y la zona de almacenamiento $[T^{-1}]$. Observe que la ecuación [1] también introduce C_s que es la concentración promedio del soluto en la zona de almacenamiento $[ML^{-3}]$. Suponiendo que la zona

de almacenamiento permanece inmóvil respecto al agua en el canal principal, la ecuación que describe C_s es:

$$\frac{dC_s}{dt} = \alpha \frac{A}{A_s} (C - C_s) \quad (2)$$

Donde A_s es la zona de almacenamiento.

2.1.14 Análisis de Incertidumbre.

Los modelos ambientales suelen contener errores de diferentes tipos puesto que son aproximaciones simplificados de la realidad, basados en el modelo mismo en los datos de campo. El análisis de dichos errores es importante puesto que son propagados a través de los modelos y causan incertidumbre en el resultado final.

Los siguientes tipos de errores pueden ser considerados:

- a.** Error del modelo.
- b.** Error en las variables de entrada (variables dependientes y
- c.** condiciones iniciales.
- c.** Error en los datos de entrada usados para correr el modelo.

- d.** Errores de parámetros (constantes de velocidad, coeficientes y variables independientes).

2.1.15 Error del Modelo.

Formulación incorrecta del modelo, es decir, la diferencia entre el medio ambiente real y las ecuaciones diferenciales en el modelo.

2.1.15.1 Causas.

El error del modelo puede ser causado por:

- a.** Procesos incluidos u omitidos impropriamente.
- b.** Requiere de unas variables de estado para describir el ecosistema.
- c.** Una reacción imprevista se hace importante en diversas partes del espacio a modelar.

2.1.15.2 Indicador de error

- a. Los datos de campo no consideran las predicciones del modelo.

La solución entonces para esta poca predicción por falta de datos, es usar diferentes modelos para la misma aplicación y estimar el error del modelo por medio de la diferencia en predicción entre los modelos, bajo circunstancias diferentes y así determinar la causa del error del modelo.

2.2 MARCO GEOGRÁFICO

2.2.1. Descripción y Ubicación Geográfica

2.2.1.1 Descripción

El río Tunjuelo recorre un Total de 53 km hasta su confluencia con el río Bogotá, drena un área de 390 km² Es originado por la laguna los tunjos y los ríos Chisacá, Mugroso.

A lo largo de su cauce pueden distinguirse tres secciones bien definidas en cuanto a su topografía y drenaje así:

La **primera** está comprendida entre el nacimiento del río y el Embalse de La Regadera. Presenta una pendiente muy pronunciada propia de los ríos de montaña que oscila entre el 15% y el 3%, y hasta este sitio tiene una extensión del orden de 161 km². El drenaje de este sector es rápido en razón de las altas pendientes y los alineamientos relativamente rectos.

El **segundo** sector esta comprendido entre el embalse de La Regadera y el sitio de explotación de canteras previsto para un posible embalse, denominado Cantarrana (5 km aguas debajo de Usme). La pendiente promedio en este sector es del orden de 3%, que aunque menor que la anterior, es aún suficiente para garantizar un buen drenaje. El área de la cuenca hasta el sitio de Cantarrana es de 267 km².

El **tercer** sector, o sector inferior del río, es el comprendido entre el sitio de Cantarrana y el Río Bogotá. Esta constituido por dos zonas: una alta (sector Cantarrana -La Fiscala) donde el Río aún presenta pendientes superiores al 1% y capacidad adecuada para evacuar grandes crecientes, y una zona baja con pendientes del orden del 0.05% y por consiguiente con un drenaje deficiente. Este último es el sector La Fiscala- LaTolosa-Bosa- Río Bogotá.

2.2.2 Ubicación Geográfica

2.2.2.1 Localización.

La localidad Tunjuelito limita con el río Tunjuelo hacia el occidente, la Autopista Sur hacia el norte, hacia el oriente con la Avenida Caracas y el límite occidental de los barrios Claret, Santa Lucía . Esta rodeada hacia el norte con las localidades de Puente Aranda y Kennedy, hacia el sur con la localidad de Usme, hacia el oriente con la localidad de Rafael Uribe y hacia el occidente con la localidad de Ciudad Bolívar. La localidad abarca una extensión de 1.061 Ha. A principios del siglo pasado el sector de Tunjuelo fue una hacienda, la cual fue parcelada a partir de 1.947. La cuenca hidrográfica del río Tunjuelo esta ubicada al sur oriente de la Sabana de Bogotá, limitada con la vertiente septentrional del Macizo de Sumapaz, donde se presenta una división de aguas entre el macizo y la hoya del río Bogotá, a la cual pertenece el Tunjuelo.

El Río Tunjuelo en su origen se encuentra formado por los ríos Chisaca y Lechos o Mugros, los cuales forman la Represa de Chisacá, a 3.100 mts sobre el nivel de mar, la cual tiene una capacidad para almacenar 5.000.000 m³, construida en los primeros años de la década del 50.

Después de la Represa de Chisaca, el río continua con el nombre de Chisacá, haciendo un recorrido transversal de aproximadamente 3km, recibiendo la afluencia del río Curubital y forma la Represa de la Regadera, construida entre

1935 y 1938, con una capacidad de 4.000.000 de m³. A partir de este sitio hasta su desembocadura recibe el nombre de río Tunjuelo.¹ El área de la hoya hidrográfica del río Tunjuelo tiene límites geográficos muy definidos, los cuales permite una visión completa del espacio ocupado por dicho río. Estos límites son: Al sur, un conjunto de lagunas: Chisacá, Negra, Larga, La Garza; la depresión de Bocagrande, la cordillera La Garza, la depresión de Bocagrande, La cordillera La Garza, y el páramo Biojoacales. Al oriente, la laguna Larga, El Alar, Bocagran y Seca, La cuchilla La Garza, Río Tabaco, la depresión de Hoya Grande, Páramo Los Salitres, los Altos del Cacique, Calderitas y Piedras de la Bala. Al occidente, la cuchilla de los Andes y El Cerro Doña Juana.

2.2.3 Aspectos generales

La cuenca del Río Tunjuelo presenta características que la diferencian significativamente de las demás cuencas urbanas. Tiene hasta su desembocadura un área de 390 km², mucho mayor que la de las otras cuencas de drenaje de la ciudad, debido a la magnitud de crecientes y con el fin controlar inundaciones, la EAAB construyó tres embalses en serie en la parte media y ha hecho mejoras al cauce inferior, entre el tercer embalse y la desembocadura al Río Bogotá.

La cuenca del Tunjuelo comprende áreas residenciales y mixtas. La explotación de los materiales aluviales a lo largo del Río Tunjuelo y las descargas directas de

¹ Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, Historia del Agua en Bogotá, 1974

aguas negras domésticas e industriales causan una alta contaminación de sus aguas.

Debido al gran problemática ambiental presente en la zona y además el registro de inundaciones severas que han perjudicado notablemente la zona el acueducto de Bogotá esta implementando en la fecha proyectos de infraestructura que van a mitigar en parte los problemas de esta zona del río Tunjuelo, otro punto importante son las Grandes áreas de la cuenca alta del Tunjuelo que están todavía sin urbanizar, y que con el avance poblacional en mediano plazo tendrá influencia directa, aumentando aun más el Antropismo actual.

En el cuadro 2.1 se presenta con fines comparativos, un listado de las principales cuencas de drenaje de la ciudad.

Cuadro No 2.1 principales cuencas de drenaje de la ciudad – estudio de sobre la problemática de inundaciones Estudio Y Asesorías- EAAB

Cuenca	Área Total (Ha)	Área de drenaje urbano (Ha)
1. Salitre	13.964	9.026
2.Fucha	16.390	10.350
3.Tunjuelo	39.000	4.237
4.Torca	6.592	964
5. Conejera	2.646	173
6. Jaboque	1.112	328
7.El Tintal	3.831	414
8. Soacha	711	711
Total	94.246	26.203

2.2.4 Población

La localidad de Tunjuelo en su totalidad, según el censo de 1993, tenía una población de 204.367 habitantes de los cuales 48% aproximadamente pertenece al sexo masculino; la mitad de la población tiene menos de 24 años, los grupos de población más representativos son los menores de cuatro años y aquellos que tiene entre 25 y 29 años. Según el estudio del CEI, se proyectaba para el año 2.000 una población de 205.719 habitantes. Esta es una de las localidades más consolidadas de la ciudad, por lo cual es una de las de menor crecimiento en la actualidad.

Más de la mitad de los pobladores de Tunjuelo habitan en vivienda arrendada y apenas una tercera parte posee vivienda propia totalmente.

En la localidad se ubican entre otros los siguientes barrios: Tunjuelo, San Benito San Carlos, Ciudad Tunal, Abraham Lincoln, De estos barrios, los que se han visto más afectados por las inundaciones son San Benito y Tunjuelo. La principal vía de acceso es la Avenida Boyacá y la zona recreativa más importante es el parque Distrital El Tunal.

2.2.5. Barrio San Benito

La construcción del barrio San Benito puede dividirse históricamente en dos períodos: el primero corresponde a la etapa formativa, que se inició con la ubicación de unas pocas curtiembres en la orilla norte del Río Tunjuelo. Esta etapa se inició entre los años 1951 y 1952. La segunda etapa corresponde a la consolidación como barrio y como sector urbano de la ciudad, ese momento se puede fechar en 1978.

Para 1951, el terreno se encontraba ocupado por parcelas cultivadas con maíz, hortalizas y otros productos agrícolas. Existía como ruta de acceso la vía que hoy corresponde a la Calle 57 sur.

Al inicio de los años sesenta se encontraba localizados aproximadamente unos cincuenta y seis curtidores. La mayoría de ellos instalados con la familia. Esta situación propició la consolidación del barrio con uso mixto. La combinación vivienda-industria generó características urbano-ambientales complejas.

En los años 60 se empezó la parcelación del barrio. Los fundadores del barrio don Froilán Ladino, Adelina Ladino, Marco Tulio Montenegro, Gregorio Rubiano, Ansermo Castañeda y Hortensio Barrera quienes migraron de Villapinzón, donde había iniciado la práctica de las curtiembres. Estos se ubicaron en diferentes sectores del sector sur de Bogotá.

Finalmente se reunieron en 1951, en la ribera del Río Tunjuelo como comunidad de trabajadores del cuero. Desde la conformación de los primeros elementos del barrio se inició una labor de apoyo comunitario, la primitiva infraestructura de servicios, la bomba para extraer agua del río y conducirla hasta los tambores de curtido, las primeras calles, fueron parte de un proceso de construcción y afianzamiento de una comunidad peculiar.¹

2.2.5.1 Aspectos Geográficos del Barrio

a. Limite

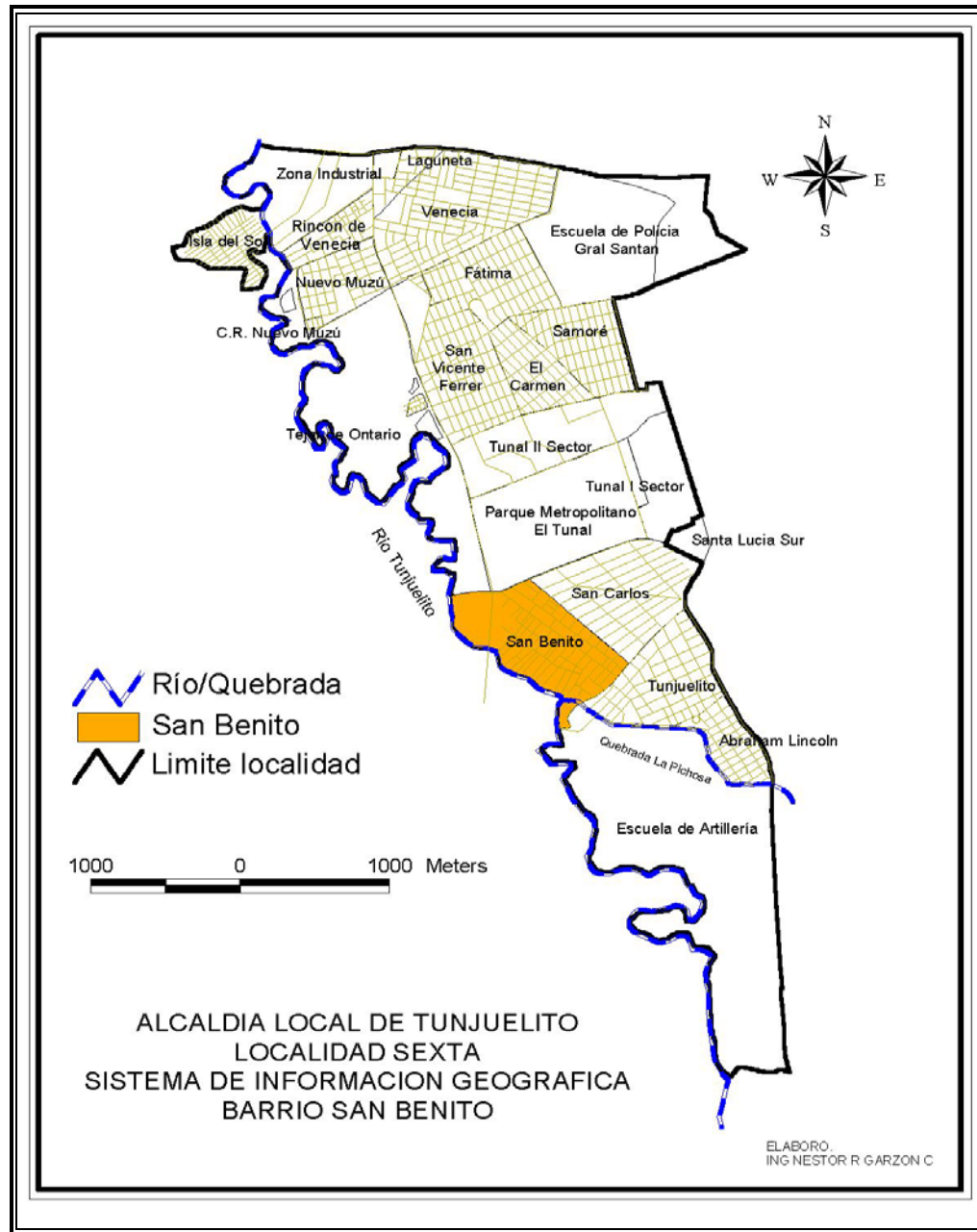
El barrio se encuentra ubicado en el extremo sur-occidental de la Localidad de Tunjuelo y está limitado por el sur con el Barrio Tunjuelo; por el oriente limita con el barrio San Benito; por el occidente con la Localidad de Ciudad Bolívar, sirviendo como límite el Río Tunjuelo; y por el Norte con el Parque Metropolitano El Tunal.

b. Ubicación

Inicia en la intersección del Río Tunjuelo con la Avenida Tunjuelo en sentido norte por el eje del Río Tunjuelo hasta la intersección del mismo, con la Avenida Villavicencio; por oriente hasta la altura del recodo que se forma entre los barrios San Benito y Meissen, y en sentido sur hasta encontrar la Estación de Servicio Terpel, a la altura de la Avenida Tunjuelo.

¹ Fragmentos "Mejoramiento del Barrio San Benito". Premio Corona Pro Arquitectura 1994, Ana Marí Rojas Eraso

Figura 2.11 Ubicación Barrio San Benito-Alcaldía de Tunjuelito



CAPITULO III : ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ZONA

3.1 LINEA BASE AMBIENTAL DE LA ZONA DE INFLUENCIA

3.1.1 Calidad del agua del río Tunjuelo

En su recorrido por la ciudad el río Tunjuelo es un cauce natural abierto, en gran parte deteriorado por la actividad de las gravilleras. Su cuenca urbana de drenaje es la más pobre en infraestructura sanitaria, por lo cual su cauce recibe las aguas negras de la totalidad de los barrios ubicados en su vertiente sur, entre Usme y Bosa, y de la mayor parte de los barrios de las localidades de San Cristobal, Usme y Ciudad Bolívar, ya sea por vertimiento directo o a través de las quebradas o zanjales que drenan a través de tales barrios, como son: Yomasa, Santa Librada, Chiguaza, Quiba y Limas, entre otras. También recibe los lixiviados del Relleno Sanitario de Doña Juana. Recientemente la EAAB terminó de construir una parte del interceptor Medio del Tunjuelo, que sirve el área de Ciudad Bolívar.

La contaminación de las aguas del Tunjuelo se hace progresivamente más fuerte en la medida en que recibe nuevos volúmenes de aguas negras, desde Usme hasta su desembocadura. En la actualidad, la DBO media de los muestreos en su desembocadura es de 115 mg/L, en condiciones prácticamente Anóxicas (0.08 mg/L-OD promedio).

3.1.2 Fuentes de Contaminación

Las fuentes de contaminación hídrica se pueden reducir a tres: las descargas de aguas domésticas, los vertimientos industriales y los arrastres de la escorrentía superficial.

3.1.3 Aguas Negras Domésticas

las aguas residuales domésticas son responsables de la mitad de la contaminación orgánica en la cuenca. De la carga orgánica total que genera la cuenca (467,35 Toneladas de oxígeno disuelto por día), estas aportan el equivalente a 254,7 Toneladas de oxígeno disuelto por día, es decir el 54%. Esta carga orgánica esta constituida como se muestra en la *tabla 3.1* (ESSERE/95).

Tabla No 3.1 Carga orgánica de las aguas residuales, (EAAB - Essere/95)

Año	Caudal (m ³ /seg)	Carga domestica Ton-O ₂ /día	Carga industrial Ton-O ₂ /día	Total Ton-O ₂ /día
1991	14,60	254,7	212,6	467,3
2000	17,60	315,7	234,6	550,4
2010	20,86	382,6	255,7	638,2
2020	23,92	448,1	269,8	717,9

).

En el caso de Bogotá, la mayor contaminación es aportada por la cuenca del Río Fucha (42.3%), seguida por la del salitre (28.2%) y el Tunjuelo (22.2%). Las aguas domesticas son las principales responsables de la contaminación por detergentes.

3.1.4 Aguas Residuales Industriales

Esta agua genera una demanda de 212.6 toneladas de Oxigeno por día, equivalente al 46% de la carga orgánica total que produce la cuenca.

En el caso del Bogotá, la mayor fuente de contaminación por aguas industriales es aportada por la cuenca del Fucha (78.4%), seguidas muy de lejos por las cuencas del Salitre (10.6%) y del Tunjuelo (7.8%) (EAAB - Estudios y Asesorías 1998)

Las aguas residuales industriales son responsables, en su casi totalidad de la contaminación por metales tóxicos y por ciertos productos químicos orgánicos, como fenoles, aceites y grasas. Se observa que en el caso del cromo, el principal aporte es el río Tunjuelo, seguido por el Fucha; esto se explica por la presencia en la cuenca de numerosas curtiembres y de industrias químicas. Otros datos de años anteriores (EAAB 1.982-87, EPAM 1.993) muestran que el río Tunjuelo también es el más contaminado con cadmio, plomo, mercurio, cobre y níquel. Los resultados promedio de la caracterización del río en su desembocadura se indican en la *tabla 3.2*

Tabla No 3.2
Resumen de la calidad Química del río Tunjuelo en su desembocadura
(valores medios-año 1.991) (EAAB - Essere/95)

Parámetro	valores
Caudal medio (m ³ /seg)	7.38
DBO5 (mg/L)	114.67
OD (mg/L)	0.08
Detergentes (mg/L)	4.37
Sólidos Totales (mg/L)	966.83
Sólidos Suspendidos (mg/L)	567.91
Cromo Total (mg/L)	0.24
Coliformes totales (NMP/100 mL)	47 x 10 ⁵
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	7.9 x 10 ⁵

3.1.5 Aguas de escorrentía superficial

Los drenajes de patios de canteras, ladrilleras y chircales, los bombeados de las gravilleras, los provenientes de lavaderos de arena y los que escurren libremente sobre el suelo, son los principales responsables de los aportes materiales sólidos insolubles a la red hidrográfica. No obstante, estos materiales también son aportados en proporciones significativas por las aguas residuales domesticas e industriales.

El río Tunjuelo es el principal aportante de materiales sólidos (362 Toneladas de por día de sólidos suspendidos), lo que coincide con el hecho de que su cuenca es la que presenta el mayor nivel de degradación por la acción de numerosas industrias de chircales, gravilleras, areneras y receberas, además de presentar zonas altamente erosionadas y urbanizaciones subnormales en terrenos pendientes y desprotegidos.

3.1.6 Contaminación Química

En el río Tunjuelo la contaminación química del agua es generada por los vertimientos de las industrias, aunque una parte importante resulta también de las aguas domésticas. Se distinguen dos tipos de contaminantes: las sustancias químicas minerales, como metales pesados y sales vertidas directamente o resultantes de los procesos de descomposición de la materia orgánica contenida en el agua; y las sustancias químicas orgánicas como los detergentes, aceites y grasas, fenoles y otros similares.

Una fuente importante de contaminación química del río Tunjuelo es la conformada por el vertimiento de los lixiviados de Relleno Sanitario Doña Juana. Sin embargo, el relleno cuenta con su propia planta de tratamiento para sus lixiviados; contiene una alta carga de DBO_5 y DQO. Los contaminantes químicos inorgánicos resultan generalmente de los procesos de fabricación, transporte y uso de diversos productos industriales. Existe poca información acerca del tipo variedad y cantidad de contaminantes tóxicos vertidos al río, aunque los más

importantes son el mercurio (Hg), el cadmio (Cr), el níquel (Ni), el cobre (Cu), el plomo (Pb), el hierro (Fe), los cloruros y los sulfatos.

Los contaminantes químicos orgánicos son generados igualmente en la actividad industrial, como es el caso de los aceites y grasas; es importante también anotar para este trabajo de tesis, la concentración metales pesados en lodos contenidos el fondo del río Tunjuelo, presentan concentraciones como lo indicada la *tabla 3.3*. Nótese que no se reportaron concentraciones de mercurio y cadmio, lo que debe considerarse un vacío de información a ser tenido en cuenta en el futuros estudios.

Tabla No 3.3

Resumen de concentración de de metales pesados en los lodos contenidos en el fondo del río Tunjuelo. (EAAB - Essere/95)

Lodos	Valores (mg/kg)
Hierro	1.4040
Cromo	118.5
Plomo	16.02
Níquel	8.40
Cobre	5.71
zinc	58.28

3.1.7 Contaminación Física

La contaminación física de las aguas del río Tunjuelo se debe a los materiales sólidos insolubles en el agua, tales como arcillas, gravillas y otros, los cuales provienen generalmente de la erosión de las vertientes y lechos fluviales, de la explotación de las canteras, gravilleras e industrias ladrilleras de la construcción y

mantenimiento de las vías, de la basura depositada en las calles y plazas, de las actividades domesticas y de la industria.

Las fuentes son entonces muy numerosas pero los efectos son los mismos: turbidez de las aguas, sedimentación de cauces naturales y redes de alcantarillado, colmatación de lagunas y embalses, entre otros.

Como en el caso de la contaminación química, existe un aporte de contaminación física de color, especialmente por los lixiviados provenientes del relleno de Doña Juana, en una magnitud no establecida actualmente.

3.1.7.1 Contaminación Bacteriológica

La contaminación por aguas residuales domesticas genera una fuerte concentración bacteriológica y una reducción del oxígeno disuelto, por lo cual constituye una amenaza para la salud pública, disminuye o elimina la vida acuática, especialmente peces y crustáceos, constriñe o elimina otros usos posibles del agua (navegación, riego de cultivos y pastos, recreación) y deteriora seriamente los paisajes.

En el río Tunjuelo se han encontrado valores muy altos de contaminación bacteriológica, con valores de 47 y 48 millones de coliformes totales y fecales en promedio, por 100 mL, con picos de 350 y 46 millones, respectivamente.

Se conoce en la actualidad la calidad bacteriológica de los lixiviados del Relleno Sanitario de Doña Juana, pero es fácil presumir que presente cargas en coliformes fecales y totales, así como otros organismos potencialmente patógenos.

3.1.8 Parte alta de la cuenca

Esta presenta una mayor actividad específica, en lo que se refiere al cultivo de papa, por encima de los 3000 msnm. Estos cultivos tienen la peculiaridad de que los surcos se hacen perpendiculares a las curvas de nivel, con los subsiguientes riesgos de erosión.

En algunas áreas más resguardadas y menos accesibles al hombre, se presenta el bosque alto andino muy intervenido. Las especies dominantes son Chaque (*Vallea stipularis*), Tibar (*Escallonia acuminata*), Tuno (*Miconia squamulosa*) y Chilco (*Baccharis latifolia*).

En esta zona, se presenta la vegetación propia de los páramos, con abundantes especies de hábito de crecimiento arborescente. Allí se presenta como especie típica el Frailejón de hojas gruesas cubiertas por una densa pubescencia. Existen en esta zona al menos dos especies de frailejón: La *Espeletia argentea* o frailejón plateado y la *Espeletia grandiflora* de vistosa flores amarillas.

Una de las especies dominantes que se presentan es la Paja de Páramo (*Calamagrostis effusa*), una gramínea que cubre amplias extensiones, especialmente en la parte baja del páramo, ya que a mayor altura, dominan los frailejones.

Otra gramínea, no muy común, que crece, en forma arrosetada, con hojas muy largas y espigas muy vistosa es *Neurolepsis sp.*

Una de las especies que define la transición entre el subparamo y el páramo es la digital (*Digitalis sp.*), con propiedades medicinales. Otra especie muy característica es el pinito de páramo, con apariencia de árbol enano (*Hypericum sp.*).

Las bromeliáceas, de la misma familia botánica de la piña, también se encuentran en esta zona de páramo, específicamente la *Puya sp.* Algunas especies de este genero pueden presentar inflorescencias de varios metros de altura y después de florecer mueren.

Una de las plantas de mayor importancia en el páramo, por el papel que juega en la economía hídrica de la cuenca al retener muchas veces su peso en agua, funcionando como una esponja, es el Musgo Esfagno (*Sphagnum spp.*), que en la épocas de sequía va liberando el agua almacenada poco a poco, manteniendo cierta estabilidad en los caudales de los ríos.

Sobre las rocas aparecen los líquenes, cuya presencia y abundancia suele estar relacionada como bioindicadora de buena calidad atmosférica. Estos líquenes son el resultado de una asociación simbiótica de un hongo con un alga y degradan muy lentamente las rocas, siendo pioneros en la formación del suelo.

3.1.9 Fauna

La fauna silvestre en la cuenca de río Tunjuelito es muy escasa como consecuencia de la desaparición de muchos hábitat y de la presión antrópica desde hace ya varios años. Inicialmente por la sobre caza y posteriormente por la introducción de sustancias contaminantes.

En caso de la cuenca baja es muy claro, encontrándose que solo existen tres especies de vertebrados que son abundante: el Copetón (*Zonotrichia capensis*). La paloma orejuda (*Zenaida auriculata*) y la Mirta Negra (*Turdus fuscater*).

Con relación a peces solo se reporta el Capitán Enano (*Pygidium bogotense*), especie pequeña no comestible, la cual fue común en el área andina de Cundinamarca y Boyacá, pero con la introducción de la trucha prácticamente a desaparecido de la región.

Otra especie que es posible encontrar, de manera eventual en el sistema hídrico regional, es la Trucha Arco Iris, denominada antiguamente Salmo Gairdneri.

3.2 DESCRIPCION DE LA ZONA A SER MODELADA

El río Tunjuelo cruza la avenida Boyacá o la llamada avenida Villavicencio en todo su recorrido en 2 puntos. La primera en el puente ubicado a la altura de la entrada del relleno sanitario de Dona Juana y donde se ubica el inicio de la zona a modelar. Sus coordenadas geográficas corresponden a 993.600 m. Norte y 991.315 m. Este. (*Plano Anexo 5.*)

El segundo sector de cruce del río, es el puente de la avenida Boyacá que limita el barrio San Benito y el Tunal sobre la avenida Tunjuelo, siendo este el punto final de la zona a modelar, Sus coordenadas geográficas corresponden a 995 .690 m. Norte y 990.625 m Este. (*Plano Anexo: 5*)

Para definir los puntos de muestreo se busco las características de facilidad en la toma muestras, un flujo continuo de caudal y además, aportes de tributarios representados en vertimientos industriales como la zona de curtiembres en San Benito , y domésticos como los barrios aledaños como son el Meíssen, Tunjuelito entre otros.

La identificación de los puntos de donde se tomaron las muestras se les denomino de la siguiente forma:

Punto 1: Puente Doña Juana, Ubicado en la entrada al relleno sanitario de Doña Juana; autopista Bogotá-Villavicencio, Coordenadas Geográficas 993.600 m. Norte y 991.315 m. Este. (*Ubicación Geográfica, Plano Anexo: 5, Figura 3.1 pag 79, foto 3.1 pag 80*).

Punto 2: Puente Meissen Junto a los límites del batallón de Artillería del ejército Nacional e inicio del barrio Meissen. Coordenadas Geográficas 995.450 m Norte y 990.955 m Este. (*Ubicación Geográfica, Plano Anexo 5, Figura 3.1 pag 79, foto 3.2 pag 80*).

Punto 3: Puente Quebrada la Yomasa. Ubicado en un recorrido a 600 m hacia el nor-occidente del punto 2, siendo la quebrada Yomasa afluente del río Tunjuelo. Coordenadas Geográficas 995.525 m Norte y 990.856 m Este. (*Ubicación Geográfica, Plano Anexo: 5, Figura 3.1 pag 79, foto 3.3 pag 81*).

Punto 4: Puente Avenida Boyacá. Tiene como referencia, la estación de bombeo de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. EAAB, ubicada sobre un costado del río Tunjuelo en el cruce de la avenida el Tunal y la avenida Boyacá, sus Coordenadas Geográficas corresponden a 995.690 m. Norte y 690.625 m Este. (*Ubicación Geográfica, Plano Anexo: 5, Figura 3.1 pag 79, foto 3.4 pag 82*).

Las Zonas anteriores corresponde a áreas de la cuenca baja del río Tunjuelo. según referencia de los levantamientos topográficos e historia de proyectos realizados para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. EAAB según problemática de inundaciones, específicamente en el sector de la Fiscála, barrio Tunjuelo y san Benito.

El Punto uno, fue escogido por ser el mas critico ya que allí confluyen los vertimientos de la zona rural y urbana de Usme como también los del relleno sanitario de Doña Juana.

La situación entre los puntos 2 y 3 es en un 70 % espacios libres en terreno que corresponden a zonas de explotación y producción de material de agregado para concretara CEMEX, luego su carga puede estar representada en sólidos; el 30 % restante son espacios urbanos que aportan carga orgánica específicamente.

En el punto tres (Quebrada Yomasa) se tomo con el fin de considerar otros sectores aportantes. La quebrada entrega como afluente cargas domesticas e industriales fuera de san Benito y Tunjuelo. Así mismo en el punto cuatro cruzan los vertimientos procedentes de la zonas anteriormente descritas pero con una entrega de carga industrial acumulada en el barrio San Benito donde se encuentran las industrias de curtiembres; además de otras industrias menores que aportan contaminación al río.

Figura 3.1. Puntos de Muestreo y zona modelada – El autor 2007

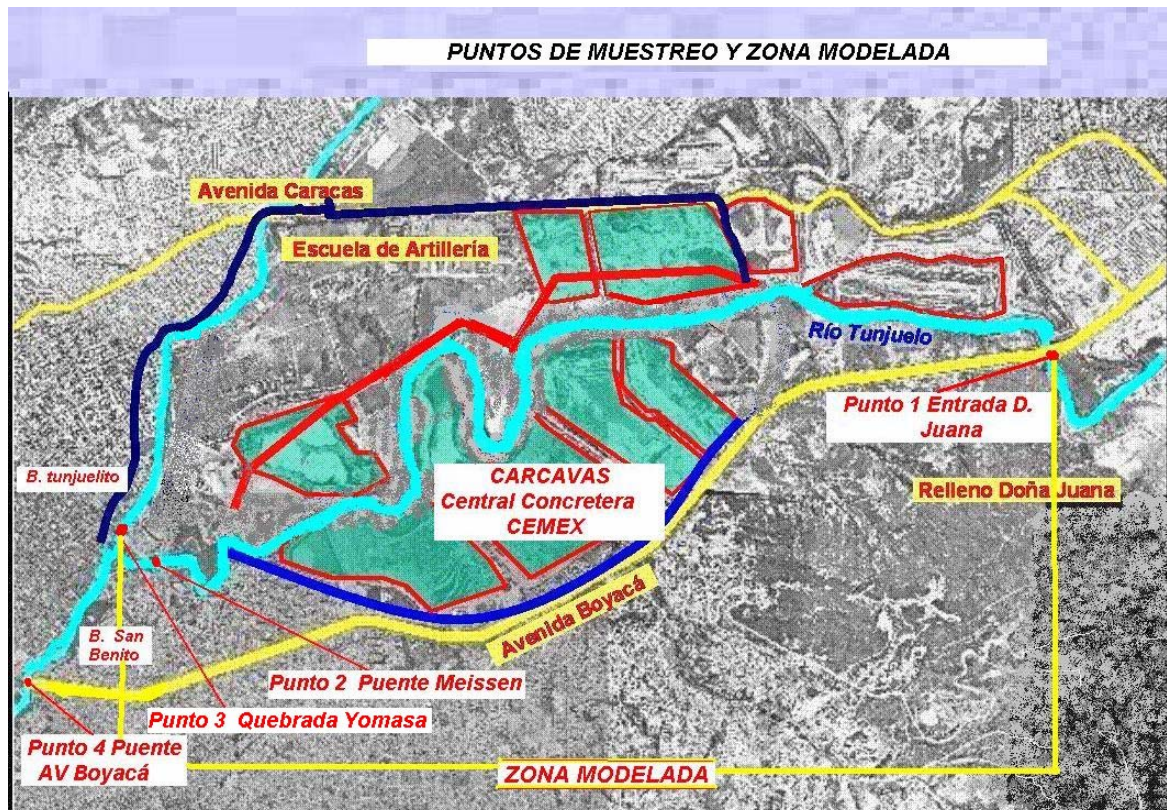


Foto 3.1. **Punto 1:** Puente Doña Juana
Frente al Relleno Sanitario de Doña Juana - El autor 2007.



Foto 3.2. **Punto 2:** Puente Meissen – Batallón de Artillería - El autor 2007

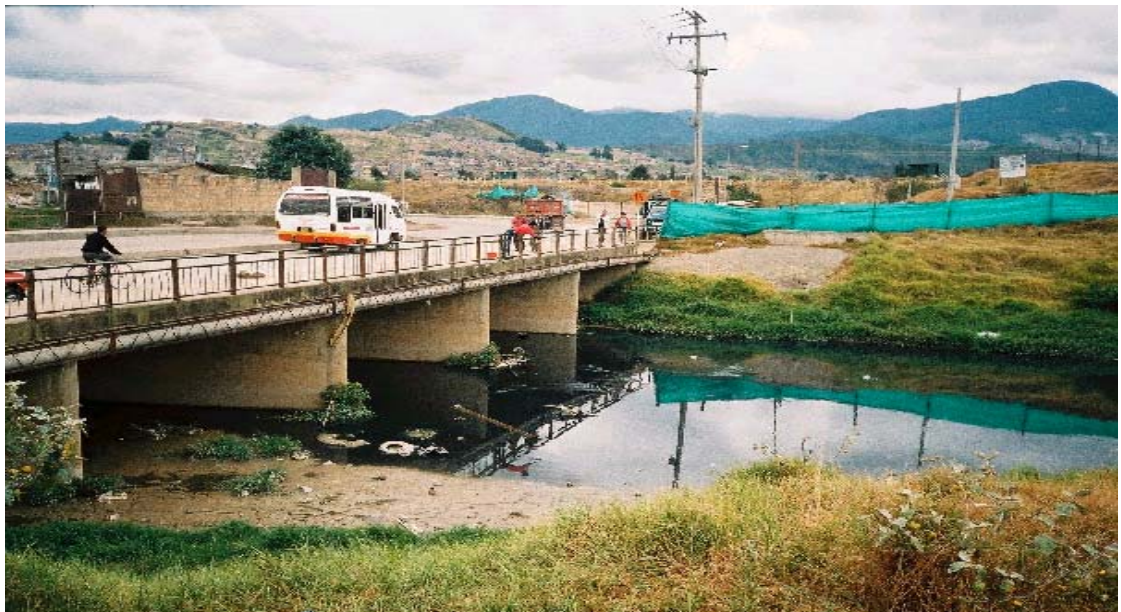


Foto 3.3. **Punto 3:** Puente Quebrada la Yomasa - El autor 2007



Foto 3.4. **Punto 4:** Puente Avenida Boyacá – Estación de Bombeo - El autor 2007



CAPITULO IV: METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1 Metodológica general.

El Proceso de desarrollo de la fase inicial, se conformo mediante la recolección de información de fuentes basadas principalmente en la investigación de los diferentes modelos matemáticos, los cuales se han desarrollado para diferentes aplicaciones, como el área de la hidráulica, con el desarrollo del Qual2K, Hec-ras efectuados por entidades Norte Americanas como la EPA (Environmental Protection Agency) y el cuerpo de ingenieros militares de los Estados Unidos; así mismo aborda otros campos como Economía, Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental.

Se planeó entonces, un cronograma de actividades en tres fases principales, que conformaban la ejecución del trabajo de investigación desde la preparación de la información preliminar, trabajo de campo, pruebas de laboratorio, montaje del modelo, análisis y resultados.

Fase I La información preliminar consistió en la documentación general sobre el tema ambiental de la zona, los tipos de modelos desarrollados en investigaciones anteriores, su campo de aplicación, cantidad de campañas a realizar, logística y protocolo de toma de muestras.

Fase II. En el laboratorio de la Universidad de la Salle, se efectuó la digestión de los cuatro metales escogidos por que se contaba con los instrumentos necesarios para lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica, en donde se hallaría la concentraciones del cromo, plomo, cobre, mercurio.

También se halló la conductividad del agua, o ensayo de trazadores donde se obtiene con estos resultados, una grafica llamada curva de calibración que relaciona la conductividad presente en el agua, versus la concentración del trazador o Sal (NaCl).

El Protocolo para la toma de las muestras en campo, su conservación, preparación y digestión de las muestras, partieron del manual para análisis de aguas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, que a su vez, sigue los parámetros del Standard Method for the Examination of Water.

Fase III. En una Hoja de calculo *Excel*, se digitan los datos necesarios para la ejecución del Modelo de Transporte de Calidad de Agua en Estado Estable¹, los datos de concentración del modelo de transporte de solutos y el desarrollo de la formula del modelo ADZ (Advección Dead Zone) definido en el Literal 2.1.11.

El desarrollo anterior muestra la correlación existente entre los valores gráficos, exponiendo el comportamiento advectivo y/o dispersivo de los contaminantes, respecto a la masa de agua del río Tunjuelo.

¹ Modelo en estado estable: define las variables sobre el efecto y el comportamiento de equilibrio del modelo, como la concentración y su derivada no cambia con respecto al tiempo.

Una vez reunida la información necesaria, se procede a ejecutar, calibrar y verificar los resultados obtenidos con el modelo.

4.2 Fases ejecutadas para la obtención del Modelo de Simulación ADZ

A continuación se describe cronológicamente la metodología de las actividades realizadas en el trabajo investigación.

4.2.1 FASE I

4.2.1.1 Ubicación de puntos de muestreo.

Como se anotó en la descripción de la zona a modelar, cada uno de los lugares donde se tomaron las muestras, ofrecían las características adecuadas por la calidad del vertimiento, brindando una confluencia de cargas domésticas e industriales. Proporcionando además facilidad en el proceso, ya que cada unos de los lugares contaban con puentes vehiculares, de donde se realizó el trabajo de recolección de muestras.

4.2.1.2 Toma de muestras para metales pesados.

La preparación de los elementos para recolección de muestras de laboratorio se basó en el Manual del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales (IDEAM); los recipientes escogidos para la toma de muestras fueron en material de vidrio, tipo refresco, el cual por su dureza silicatada, cumple con las condiciones. Su lavado se realizó con jabón detergente no iónico y el enjuague con agua de llave, remojado con ácido Nítrico HNO_3 , y este ultimo fue retirado con agua desmineralizada.

Para la preservación de la muestra se acidificó con 2 ml de ácido nítrico para el cromo, cobre y ácido sulfúrico para el plomo y mercurio. Ver Foto 4.1

Foto 4.1 Recipientes para tomas de muestras - El autor 2007



4.2.1.3 Trabajo de Campo - Campañas para Toma de Muestras

La toma de las muestras de agua, se ejecutó desde los puentes vehiculares en todos los puntos 1 a 4, los elementos utilizados para realizar dichas tomas, fue un balde aforado de 12 litros. Ver Foto 4.2

De la misma forma se dividió la sección transversal del río en tres o cuatro secciones según su ancho, con el objeto de realizar una muestra compuesta homogénea . Ver *Foto 4.3 - Pg 88*

Las tres primeras campañas de toma de muestra en agua, fueron efectuadas por el investigador, desarrollando el análisis de laboratorio en la Universidad de la Salle durante el 2004. Con intención de corroborar los resultados obtenidos, se llevo a cabo una toma final, por el laboratorio ANTEK, durante enero del 2005.

Las fechas específicas se relacionan a continuación:

- Campaña 1: Abril 24 de 2004, *Foto 4.4*
- Campaña 2: Abril 31 de 2004, *Foto 4.5*
- Campaña 3: Junio 16 de 2004, *Foto 4.6*
- Antek : Febrero 5 de 2005, Ver *Tabla de Resultados de Laboratorio*.
Ver Anexos: 1.

Así mismo, se tomo una caracterización de la concentración de los metales pesados Cr, Pb, Cu, Hg en lodos para determinar la presencia de los mismos en la fase sólida del río Tunjuelo.

Los lugares donde se tomaron las muestras de lodos punto 1. (Puente relleno sanitario de Doña Juana) y en el punto 2 (Puente Avenida Boyacá - Estación de Bombeo). Los resultados obtenidos por el laboratorio Antek S.A. se entregaron el día 13 de julio de 2006. Ver *Tabla de Resultados de Laboratorio Lodos Ver Anexos: 1.*

Foto 4.2 Recipientes para tomas de muestra - El autor 2007



Foto 4.3 Toma compuesta de muestras. Campaña 1 - El autor 2007



Foto 4.4 Toma de muestras - Campaña 1 - El autor 2007



Foto 4.5 Toma de muestras - Campaña 2 - El autor 2007



MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

Foto 4.6 Toma de muestras - Campaña 3 - El autor 2007



4.2.1.4 Ensayo de Trazadores.

Para el ensayo de trazadores se inyectó, Sal (NaCl) a las aguas de río Tunjuelo, en concentraciones adecuadas, (dosis empírica), relacionando la posible concentración de la Sal y el caudal presente. Lo anterior define, que no existe un registro de fórmulas establecidas que determinen, la cantidad a adicionar, de soluto en proporción al caudal del río donde se desea hacer el ensayo.

Para lograr la lectura de la conductancia se adicionó 30 kilos de sal (NaCl), disuelta en agua del mismo río para formar una solución en un balde de 12 Lt .

Foto 4.7 – 4.8. Luego esta solución, es introducida al río de forma manual. *Foto 4.9.* Para ello se dispuso de tres puntos a saber.

El punto de Inyección se ubicó debajo del puente vehicular, a la entrada del Relleno Sanitario Doña Juana (*Foto 4.10*) y dos de lectura denominados punto de lectura **A** y punto de lectura **B** (*Foto 4.11*), ubicados aproximadamente a 90 metros uno del otro.

Las muestras se recogieron cada 20 segundos, en recipientes plásticos esterilizados con capacidad de albergar 80 cc. El número de muestras tomadas por punto fue de 100, para un total de 200 unidades, con los que se conformaron, una tabla de lectura de 200 datos experimentales. (Ver Anexo2)

Foto 4.7 Mezcla de Sal – Ensayo de Trazadores - El autor 2007



Foto 4.8 Mezcla de Sal – Ensayo de Trazadores - El autor 2007



Foto 4.9 Inyección de Sal (NaCl) – Ensayo de Trazadores - El autor 2007



Foto 4.10 Adición de Sal (NaCl) – Ensayo de Trazadores - El autor 2007



Foto 4.11 Sentido del Flujo - Inyección Sal (NaCl) y Punto de lectura **A** Y **B**
El autor 2007



4.2.2 FASE II

4.2.2.1 Análisis de laboratorio.

4.2.2.1.1 Laboratorio de Trazadores

El desarrollo del laboratorio consistió en la lectura de la conductividad de las 200 muestras de agua recolectadas en los punto de lectura **A Y B** del río Tunjuelo, como se describió en el procedimiento en el numeral 4.2.1.4. . Según el protocolo, las lecturas de conductividad se pueden realizar en un tiempo máximo de 24 horas. (Ver Anexo 2)

El propósito del ensayo de trazadores es obtener las lecturas de conductancia presentes en el agua y formar una tabla de datos que con las concentraciones de sal de las soluciones tipo, preparadas en el laboratorio, las cuales relacionan las lecturas de conductancia en ($\mu\text{s/cm}$) (Ver tabla 4.1), ubicados en el eje **X** y la concentración en (mg/L), ubicados en el eje **Y**, para formar la grafica “curva de calibración”. (Ver Grafica 4.1).

Estos datos anteriores que conforman la curva de calibración, arrojaran las lecturas que proporcionan las concentraciones reales del soluto.

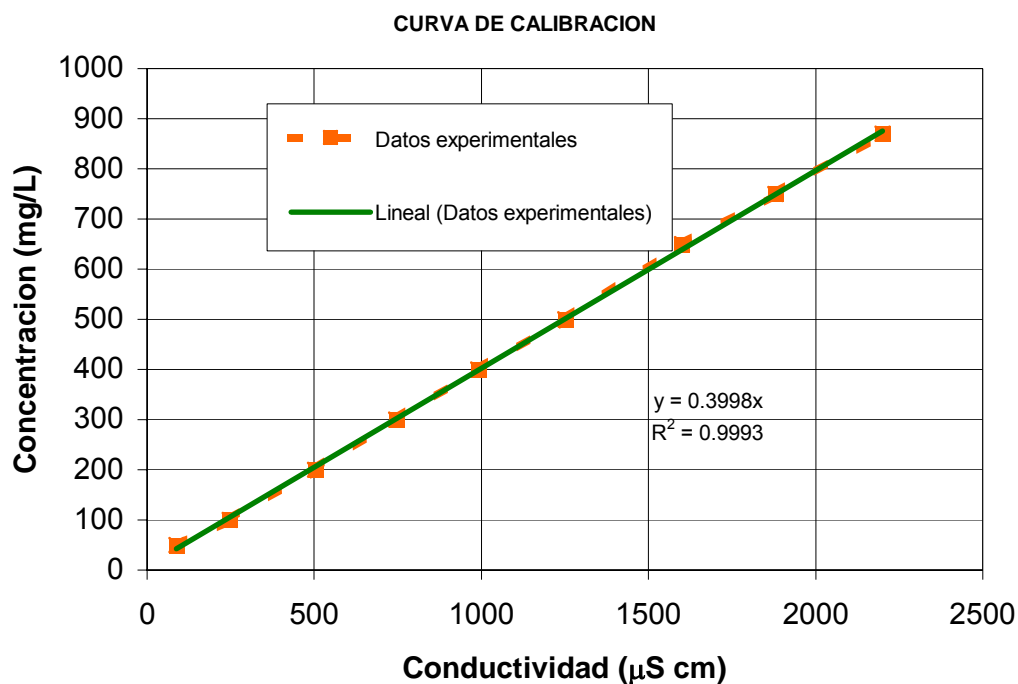
La necesidad de realizar el ensayo de trazadores es lograr evaluar la aplicación del modelo de calidad de agua, desde el punto de vista hidráulico, observando las características de transporte del soluto y la Advección y Dispersión de la Sal

inyectada al río Tunjuelo, simulando el comportamiento de los contaminantes que puedan estar presentes en el agua.

Tabla 4.1 Lecturas de Conductancia para soluciones tipo, ensayo de trazadores
Laboratorio UniSalle

CONCENTRACIONES (mg/L)	CONDUCTIVIDAD (μ s/cm)
50	88
100	248
200	502
300	745
400	990
500	1250
650	1600
750	1880
870	2200

Tabla 6.1 Resultado Modelo *ADZ* de transporte de solutos.



4.2.2.1.2. Digestión de muestras y lectura en el espectrofotómetro de Absorción Atómica

4.2.2.2 Lectura de muestras.

El Protocolo de preparación de las muestras para su lectura en el espectrofotómetro, partieron del manual para análisis de aguas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y del Standard Method for the Examination of Water. Se cumplió con los parámetros de dilución de

muestras, acidificación, filtración y digestión de la misma. De igual forma se dió especial cuidado a los porcentajes de elementos químicos adicionados como el ácido Nítrico (HNO_3), y el lavado adecuado de los instrumentos. Todo esto con el propósito de no incurrir en lecturas erróneas por mal procedimiento o contaminación de muestras.

Así mismo, las lecturas de concentración de los metales pesados se realizó en el espectrofotómetro de la Universidad de la Salle con colaboración del personal del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

Los resultados de concentración de metales pesados cobre, plomo cromo y mercurio, se resumen a continuación en las *Tablas 4.2 a 4.5*.

Tabla 4.2 Resultados de concentración metales Pesados. Campaña 1

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA						
Toma : Aguas Superficiales						
Lugar : Río Tunjuelo						
Fecha de Toma : Abril 24 de 2004						
Campaña 1						
RESULTADOS DE LABORATORIO						
24/04/2004						
	unidades	1	2	3	4	
Mercurio	mg/L	0,047	0,051	0,069	0,094	
Cobre	mg/L	0,17	0,032	0,028	0,016	
Plomo	mg/L	0,0237	0,042	0,038	0,054	
Cromo	mg/L	0,026	0,031	0,023	0,037	
1	puente relleno sanitario Doña Juana					
2	Puente Meissen Batallon de Artilleria					
3	Puente Quebrada la Yomasa					
4	Puente Avenida Boyaca San Benito					

Tabla 4.3 Resultados de concentración de metales Pesados. Campaña 2

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA						
Toma : Aguas Superficiales						
Lugar : Río Tunjuelo						
Fecha de Toma : Abril 31 de 2004						
Campaña 2						
RESULTADOS DE LABORATORIO						
31/04/04						
	unidades	1	2	3	4	
Mercurio	mg/L	0,005	0,0047	0,0062	0,0078	
Cobre	mg/L	0,2	0,24	0,19	0,018	
Plomo	mg/L	0,031	0,05	0,031	0,052	
Cromo	mg/L	0,022	0,0035	0,002	0,0044	
1	puente relleno sanitario Doña Juana					
2	Puente Meissen Batallon de Artilleria					
3	Puente Quebrada la Yomasa					
4	Puente Avenida Boyaca San Benito					

Tabla 4.4 Valores de concentración metales Pesados. Campaña 3

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA						
Toma : Aguas Superficiales						
Lugar : Río Tunjuelo						
Fecha de Toma : Junio 16 de 2004						
Campaña 3						
RESULTADOS DE LABORATORIO						
31/04/04						
	unidades	1	2	3	4	
Mercurio	mg/L	0,015	0,0098	0,023	0,03	
Cobre	mg/L	0,23	0,033	0,035	0,018	
Plomo	mg/L	0,02	0,0051	0,046	0,055	
Cromo	mg/L	0,022	0,03	0,033	0,043	
1	puente relleno sanitario Doña Juana					
2	Puente Meissen Batallon de Artilleria					
3	Puente Quebrada la Yomasa					
4	Puente Avenida Boyaca San Benito					

Tabla 4.5 Valores de concentración metales Pesados. Lab. ANTEK.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA						
Toma : Aguas Superficiales						
Lugar : Río Tunjuelo						
Fecha de Toma : Febrero 05 de 2005						
Campaña 4						
RESULTADOS DE LABORATORIO						
02/05/2005						
	unidades	1	2	3	4	
Mercurio	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	
Cobre	mg/L	0,021	0,0057	0,017	0,019	
Plomo	mg/L	0,041	0,0050	0,010	0,022	
Cromo	mg/L	0,035	0,0010	0,0010	0,030	
1	puente relleno sanitario Doña Juana					
2	Puente Meissen Batallon de Artilleria					
3	Puente Quebrada la Yomasa					
4	Puente Avenida Boyaca San Benito					

4.2.3 FASE III : DESARROLLO Y CONFORMACION DEL "MODELO ADZ"

4.2.3.1 Desarrollo y Conformación del Modelo ADZ (Advección Dead Zone) Al Sistema Computacional de Modelación para Metales pesados en la Cuenca Baja del Río Tunjuelo.

El montaje de la información necesaria para el programa computacional (Excel) para realizar el modelo , esta basado en los siguientes datos:

- a.** Concentraciones de metales pesados en la fracción acuósa: mercurio cobre, plomo y cromo *Tablas 4.2 a 4.5.*
- b.** Ensayo de Trazadores para trasporte de solutos (Concentración de Sal NaCl - Curva de Calibración). *Grafica 4.1 Pg 96..*
- c.** Distancias lugares de muestreo entre los puntos 1 a 2 a 3 a 4 ; lectura realizada en plano, Ver Anexo 5 : Escala 1:10.000 ,Instituto Agustín Codazzi Plancha 246-II-B4 - Sub Dirección Cartográfica 1989. (Ver *Tabla 4.6 pag 103*).
- d.** Constantes de decaimiento: sedimentación y adsorción en la fracción sólida (lodos).

Tabla 4.6 Distancias entre puntos de Monitoreo – (Plano Agustín Codazzi 1989)

	<i>Punto</i>	<i>Localización</i>	<i>Distancia m</i>
1.	Puente Relleno Sanitario Doña Juana a Puente Meíssen Batallón de artillería	P1 - P2	6450
2.	Puente Meíssen Batallón de Artillería a Puente Quebrada Yomasa	P2 - P3	710
3.	Puente Quebrada la Yomasa a Avenida Boyacá San Benito	P3– P4	740

4.2.3.2 Formulación para Hallar las Variables de la Ecuación del Modelo de Metales.

Con la información definida en el numeral 4.3.2.1, se procede a montar el modelo de transporte y calidad del agua para metales (Steve C Chapra), basándose en la Ecuación de Zona Muerta Agregada (ADZ), tal como se expone

en el capítulo de modelos de transporte, numeral 2.1.11 y que se relaciona a continuación.

Para el montaje del modelo de transporte de soluto, y de metales en la hoja electrónica Excel, se debe despejar cada una de las variables de la ecuación (1), y luego remplazarla en la ecuación del modelo para metales (10).

$$(S_k) = a_1 S(k - 1) + b_o S_U (k - \delta) \quad (1) \quad \text{Modelo transporte de solutos}$$

:

Donde los coeficientes :

$S(k)$ = Concentración aguas arriba

S_U = Concentración aguas abajo

k = Instante de tiempo

δ = Retrazo Advectivo en múltiplos de Δt

$$\delta = \frac{\tau}{\Delta t} \quad (2)$$

$$a_1 = -\exp\left(\frac{\Delta t}{T_r}\right) \quad (3)$$

$$b_0 = 1 + a_1 \quad (4)$$

$$T_r = \frac{\Delta t}{\log_e(-a_1)} \quad (5)$$

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i t_i + c_{i+1} t_{i+1}) (t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i + c_{i+1}) (t_{i+1} - t_i)} \quad (6)$$

$$\bar{c} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(c_{i+1} + c_i) (t_{i+1} - t_i)}{2(t_n - t_0)} \quad (7)$$

$$Q = \frac{M}{\int_0^t c dt} = \frac{M}{\bar{c}(t_n - t_0)} \quad (8)$$

$$s_i^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i t_i^2 + c_{i+1} t_{i+1}^2) (t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=1}^{n-1} (c_i + c_{i+1}) (t_{i+1} - t_i)} - (\bar{t})^2 \quad (9)$$

a continuación se muestra la conceptualización de las variables a remplazar en el modelo para metales:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{1}{Tr} \left(e^{-k \cdot \tau} \cdot U(t - \tau) - M(t) \right) - k \cdot M(t) \quad (10) \quad \text{Modelo de metales}$$

Donde :

$M(t)$ = concentración de metal, mg/L

$U(t)$ = concentración del metal aguas arriba, mg/L

k = constante de destino del metal día⁻¹ – (constante de decaimiento) tabla 4.7

Tr = tiempo de residencia de la fracción dispersiva del tramo, días

Resolviendo esta ecuación diferencial, podemos llegar a una solución que depende del tiempo, como queremos elaborar un modelo que represente las condiciones de estado estable, fijamos el tiempo en el límite al infinito, esto equivale al anular el término de la izquierda en la ecuación (10) es decir el diferencial del tiempo, una vez se resuelve esta ecuación en estado estable, como aparece en la ecuación (11) de este capítulo, se procede a implementar el modelo en una hoja de cálculo. Pero antes de seguir con la elaboración del modelo es necesario hacer algunas precisiones sobre la anterior ecuación en que este se basa.

Tabla 4.7 Constante de destino del metal. (Decaimiento). (1/día)

Constante k	Unidades	Valor (10^{-4})
Mercurio	1/día	5.606
Cobre	1/día	5.605
Plomo	1/día	7.3684
cromo	1/día	5.606

4.2.3.3 Modelo para Metales

a. Es necesario tener en cuenta que los metales son conservativos, es decir no sufren decaimiento químico como las demás variables de calidad del agua como son la DBO, los nitratos, los nitritos, el fósforo reactivo soluble, etc.

b. Dado que los metales se asocian con material particulado mediante la adsorción, se sabe que estos, se ligan con compuestos orgánicos, uniéndose a la superficie de estos compuestos orgánicos (sorción), otros procesos físicos de importancia son (a) adsorción física a las superficies sólidas, (b) sorción química, mediante enlaces, e (c) intercambio iónico.

c. Especiación química¹. Diferente de la sorción, los metales pueden luego especiarse en formas químicas diferentes.

¹ Expectación Química: Es la que denota la toxicidad de la especie química,

c. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, dado que se tendría que tener en cuenta las concentraciones de los metales no solo en la fase acuosa sino también en los sedimentos (material particulado y disuelto), se ha decidido emplear un coeficiente que tenga en cuenta el coeficiente de reparto entre las fases. Este coeficiente tendría las dimensiones de una tasa de decaimiento de primer orden, que serviría para involucrar procesos como: sedimentación, fracción adsorbida en la columna de agua, fracción disuelta química en la columna de agua.

El modelo así planteado, es un modelo simplificado de calidad del agua para metales. Empleando la base de datos anterior se procedió a llevar a cabo la modelación usando para ello una sencilla hoja electrónica de calculo (*EXCEL*), inicialmente las constantes o parámetros de destino de los metales (k) se les busca un valor tal que correlacione los datos hallados experimentalmente con las respuestas arrojadas por el modelo, pero primero se les da un valor para cada uno de los parámetros de destino de cada metal y enseguida se puede aprovechar las herramientas de la hoja de cálculo, como lo es la función *solver*¹, esta función optimiza los parámetros a encontrar efectuando operaciones en las cuales se establecen una serie de desigualdades en forma de restricción.

$$M(t) = \frac{\left(\frac{1}{Tr}\right)(e^{-k \cdot \tau} \cdot U(t))}{\left(\frac{1}{Tr}\right) + k} \quad (11)$$

¹ Herramienta de Solver: esta basada en la programación lineal, o investigación de operaciones, donde se busca maximizar o minimizar las desigualdades. Herramientas de Excel, ambiente Windows

Estas restricciones implican que los valores de esas constantes de destino sean mayores o iguales a cero, la función objetivo sería por ejemplo:

a. El coeficiente de correlación entre los vectores columna (matrices de $n \times 1$), dicho coeficiente de correlación es una función de la hoja electrónica de cálculo, los valores a encontrar serían las constantes de destino para los metales. Se da el valor de 1 para el coeficiente de correlación como valor deseado.

b. La sumatoria de las diferencias al cuadrado entre los datos experimentales versus los resultados arrojados por el modelo, el valor deseado sería de cero para cada una de las sumatorias, se decidió escoger este último porque implica mayor grado de precisión.

4.2.3.4 CALIBRACION Y VERIFICACION DEL MODELO

Para calibrar el modelo se utilizó la herramienta Solver que se encuentra en programa Excel, la calibración se obtiene mediante la comparación de los datos experimentales de las concentraciones de metales pesados presentes en la fase acuosa - sólida y los resultados arrojados en el modelo buscando el ajuste de las constantes de destino,

El desarrollo detallado de la calibración del modelo se muestra en el literal 5.2
pg113

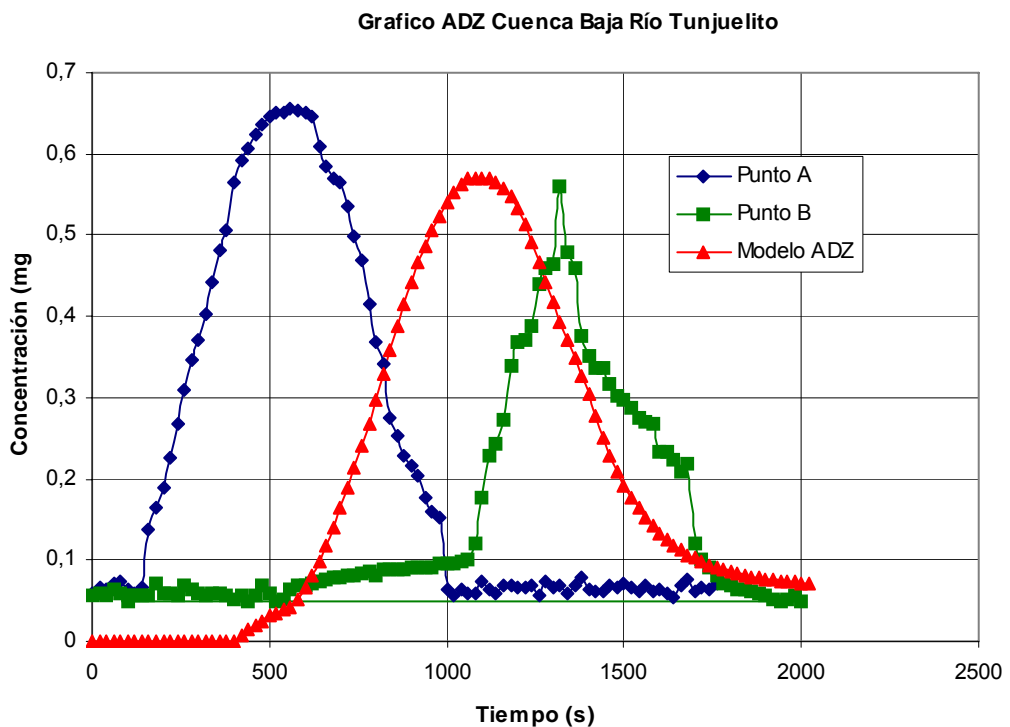
El Solver es una herramienta para resolver y optimizar ecuaciones mediante el uso de métodos numéricos. Solver se puede utilizar para optimizar funciones de una o más variables, con o sin restricciones, forma parte de una serie de comandos a veces denominados herramienta de análisis. Con Solver se puede buscar el valor o los valores óptimos para una celda denominada *celda objetivo*, en una hoja de cálculo. Solver trabaja con el grupo de celdas que estén relacionadas, directamente o indirectamente con la fórmula de la celda objetivo, esta ajusta los valores de la celda variable que se especifique, denominadas celda ajustable. Para obtener el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo, pueden aplicarse restricciones que limiten el problema tipo a celdas ajustables o de destino que estén directa o indirectamente relacionadas con las celdas de origen.

CAPITULO V : RESULTADOS DEL DESARROLLO DEL MODELO ADZ

En este capítulo se muestra los resultados de la modelación de concentración de metales y transporte de solutos en un tramo del río Tunjuelo. A continuación se expone la distribución del trazador; sus datos y cálculos, se muestran en la hoja electrónica (Excel). *Anexo 2.*

5.1. MODELO ADZ DE TRANSPORTE DE SOLUTOS

Grafica 5.1 Modelo ADZ de Transporte y distribución de concentraciones en los dos puntos de muestreo A Y B



Partiendo de la distribución de concentraciones se puede obtener el tiempo de viaje promedio, el tiempo de decaimiento τ , y los demás parámetros del modelo de transporte ADZ , esta tarea se desarrollo en una hoja electrónica de cálculo, en la tabla 5.1 se muestran los resultados que proporciona el ADZ. Los valores numéricos correspondientes a esta modelación se encuentran en el anexo 3.

Tabla 5.1. Resultados modelo ADZ transporte

Parámetro	Símbolo	Unidades	Punto de Lectura A	Punto de Lectura B
<i>tiempo de viaje</i>	t	<i>segundos</i> (s)	645.36	1205.1
<i>tiempo de arribo</i>	τ	<i>segundo</i> (s)	140.00	540.00
<i>distancia</i>	d	<i>metros (m)</i>	72.00	105.00
<i>concentración prom.</i>	c	<i>mg/L</i>		
	Símbolo	Unidades	Valor	
	$\bar{\delta}$		20	
	a_1		-0.8823	
	b_0		0.1176	
<i>Tiempo de Residencia</i>	Tr	<i>segundos</i> (s)	159.75	
<i>Fracción Dispersiva</i>	DF		0.2854	
<i>velocidad promedio (tramo)</i>	v	<i>m/s</i>	0.18	
<i>Coeficiente de correlación</i>	r^2		0.5235	

Se observa que la fracción dispersiva es menor que la unidad por lo tanto se puede decir que existe predominio de transporte advectivo en el tramo del río,

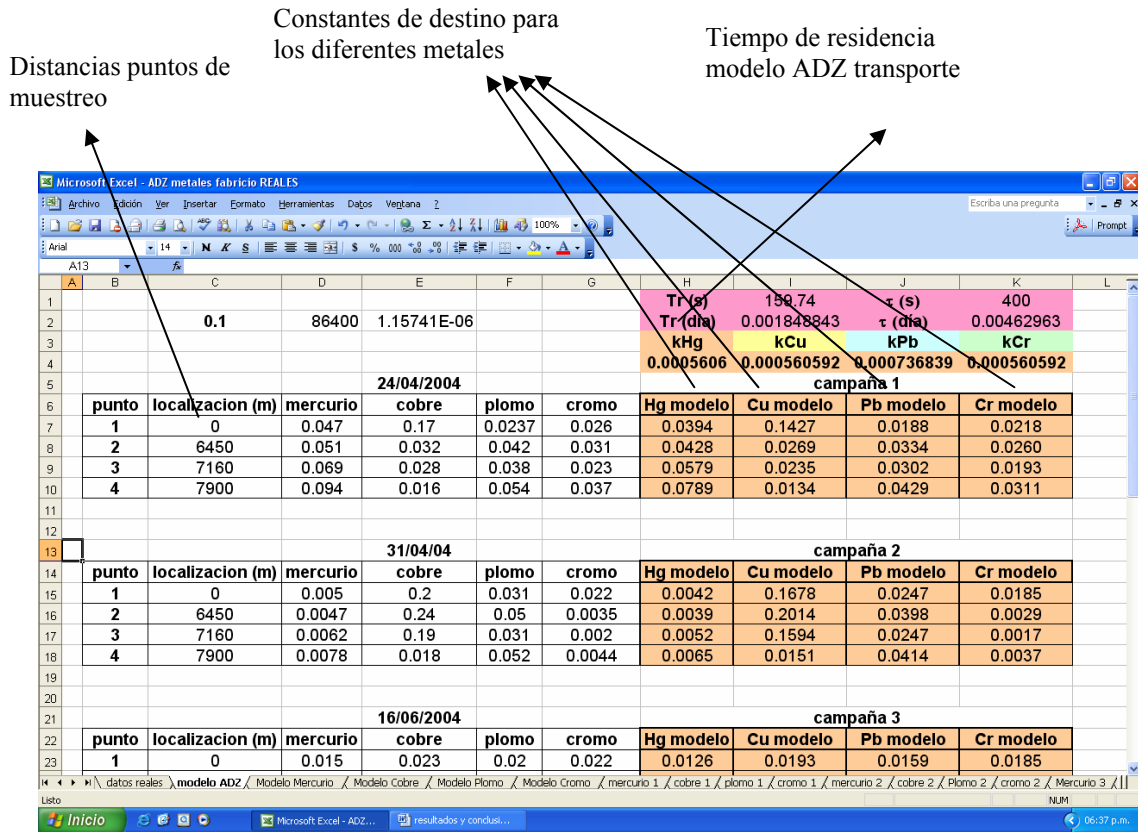
no tiene un comportamiento como el de un reactor completamente mezclado, más bien como el de un reactor de flujo pistón, la principal diferencia en estos dos tipos de reactores radica en que la concentración de las especies varía axialmente en el reactor de flujo pistón, mientras que en reactor de mezcla completa la composición es uniforme, todo esto si estamos haciendo el análisis en estado estable, el valor de la fracción dispersiva se incorpora en las ecuaciones del ADZ para metales, en la parte de decaimiento advectivo, este valor se relaciona con el tiempo de arribo con el tiempo total de viaje de la sustancia dentro del tramo estudiado, estos se muestran en la tabla 5.1.

5.2. MODELO ADZ DE CALIDAD DEL AGUA PARA METALES

Una vez desarrollado cada uno de los parámetros del modelo ADZ para metales, como se expuso en el Capítulo Cuatro, se emplea una hoja electrónica de cálculo Excel, para implementarlo como se muestra en el ejemplo figura 5.2, pag 114.

Nota: La Hoja electrónica con los cálculos reales en Excel se muestran en el Anexo 4.

Figura 5.2. Hoja de cálculo con el modelo de metales.



En la figura 5.2 se puede apreciar, los datos obtenidos experimentalmente, situados en las columnas de la izquierda (en color blanco) se tienen los datos experimentales por campaña, a la derecha se observa los datos modelados.

Para verificar la bondad del ajuste del modelo se emplea, el **coeficiente de regresión r^2** , este coeficiente debe tender a 1, esta función se encuentra incorporada en la biblioteca de funciones de Excel, los datos de entrada para esta función son los vectores columna de los datos experimentales versus los resultados modelados por el ADZ.

$$r^2 = \frac{n(\sum x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{(n\sum x^2 - (\sum x)^2) \cdot (n\sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (1)$$

Si bien no es la única herramienta para la calibración objetiva de parámetros, porque existen otras alternativas es la que se decidió emplear por su sencillez y facilidad de manejo.

En la calibración se hace lo siguiente, los resultados experimentales se comparan con los valores obtenidos por el modelo y se busca ajustar las constantes de destino empleando la herramienta *Solver* de *Excel*¹ de siguiente forma: se colocan unas constantes (1/día) (Tabla de tóxicos - Thomas y Muller) y los valores a comparar serán aquellos producidos por el modelo versus los datos experimentales, o sea el perfil de concentraciones para los metales, mediante el criterio del coeficiente de correlación que se hace tender al valor de 1, como se ve en la tabla 5.2, es decir esta sería la función objetivo, las celdas cambiantes serían las constantes de destino sometidas a restricciones (por ejemplo no puede ser menores o iguales a cero), ni tampoco valores muy altos.

Tabla 5.2 Datos a introducir en la herramienta *Solver* de Excel

Celda objetivo	Valor de la celda objetivo	Cambiando celdas	Sujeto a las restricciones
Coeficiente de correlación r^2	1.0	Constantes de destino	Constantes mayores o iguales a cero

¹ Ibid 1

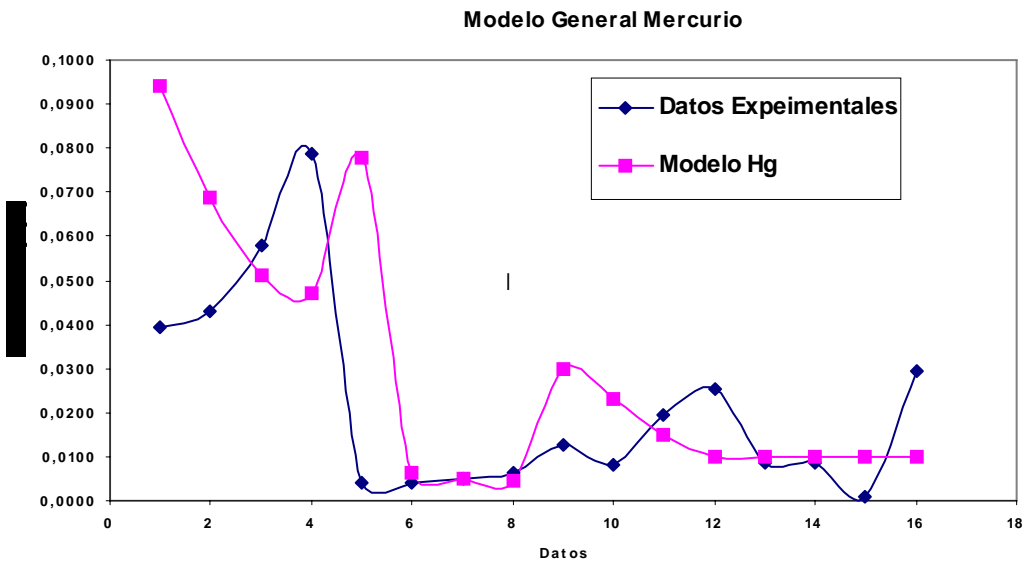
Los valores de las constantes obtenidas por este método se muestran a continuación.

Tabla 5.3 Datos a introducir en la herramienta *Solver* de Excel

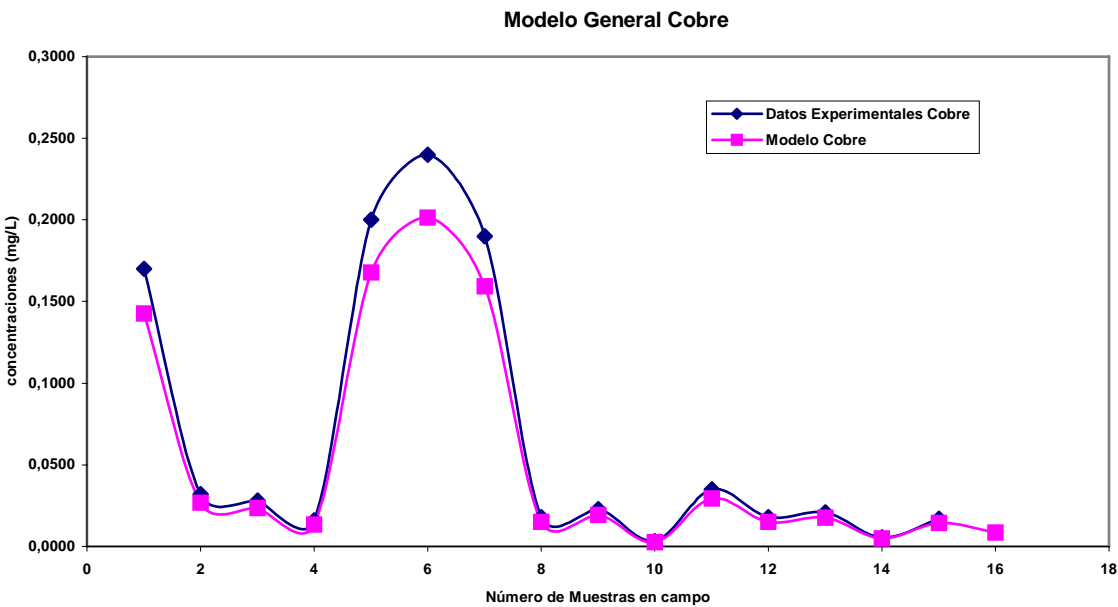
Constante k	Unidades	Valor (10^{-4})
Mercurio	1/día	5.606
Cobre	1/día	5.605
Plomo	1/día	7.3684
cromo	1/día	5.606

Con los valores de las constantes, del tiempo de viaje, se procede a hacer las gráficas de los modelos para cada modelo en forma general y para cada metal en cada campaña.

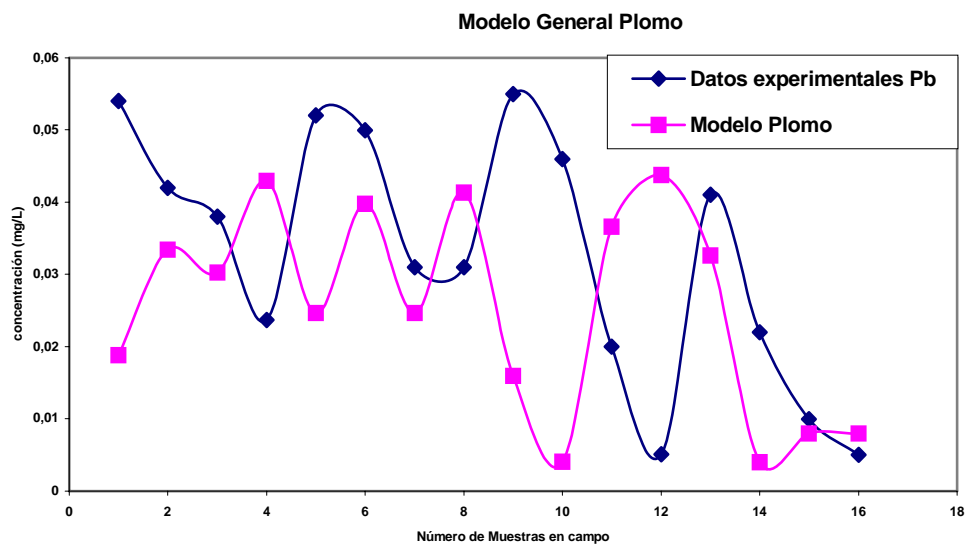
Grafica 5.2 Modelo General para el Mercurio en la cuenca baja del río Tunjuelo.



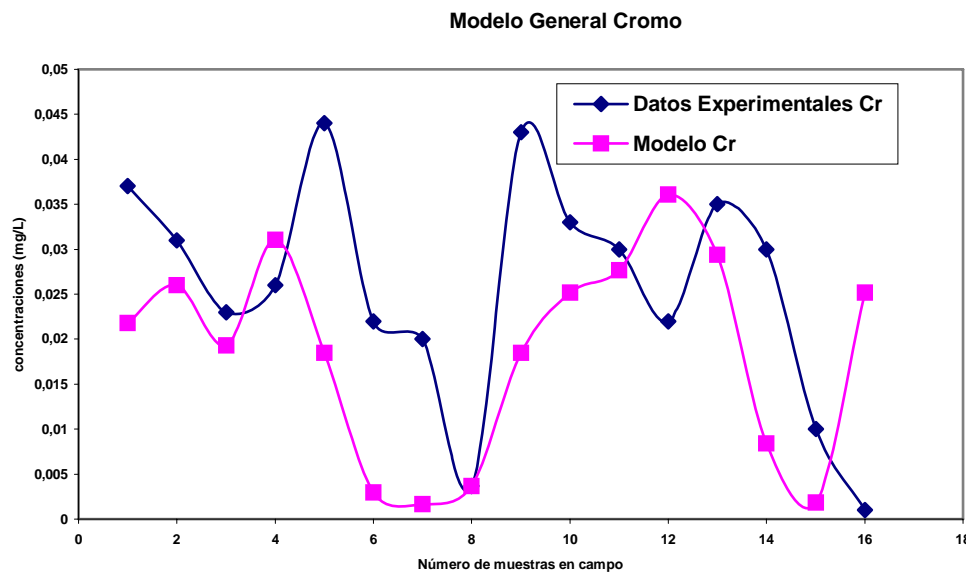
Grafica 5.3 Modelo General para el Cobre en la cuenca baja del río Tunjuelo.



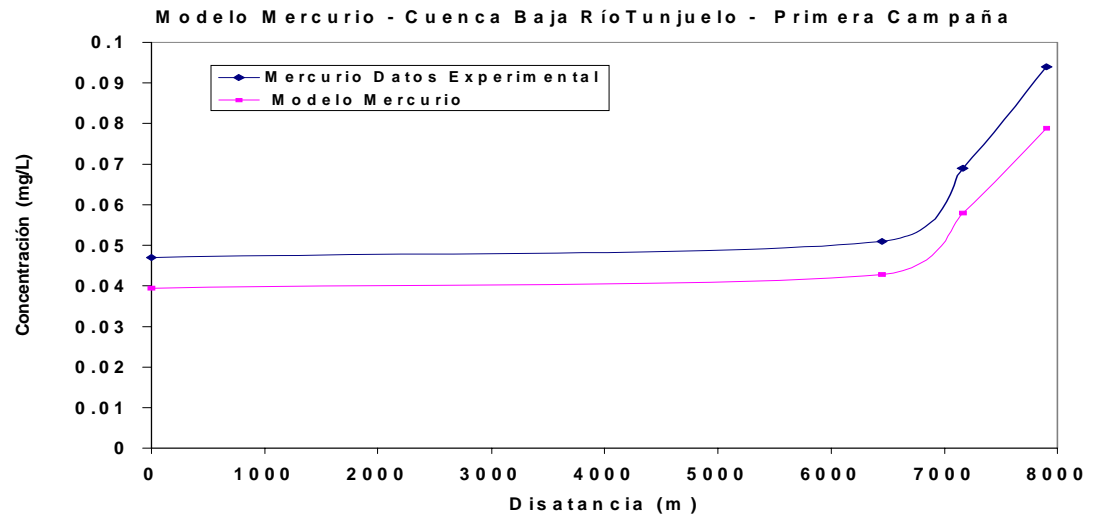
Grafica 5.4 Modelo General para el Plomo en la cuenca baja del río Tunjuelo.



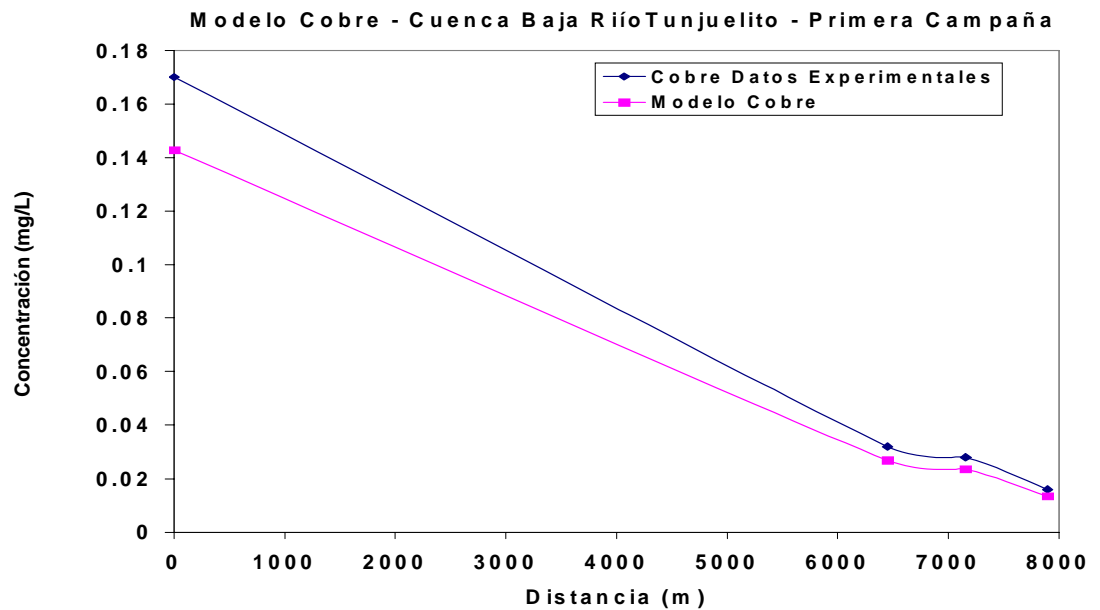
Grafica 5.5 Modelo General para el Cromo en la cuenca baja del río Tunjuelo.



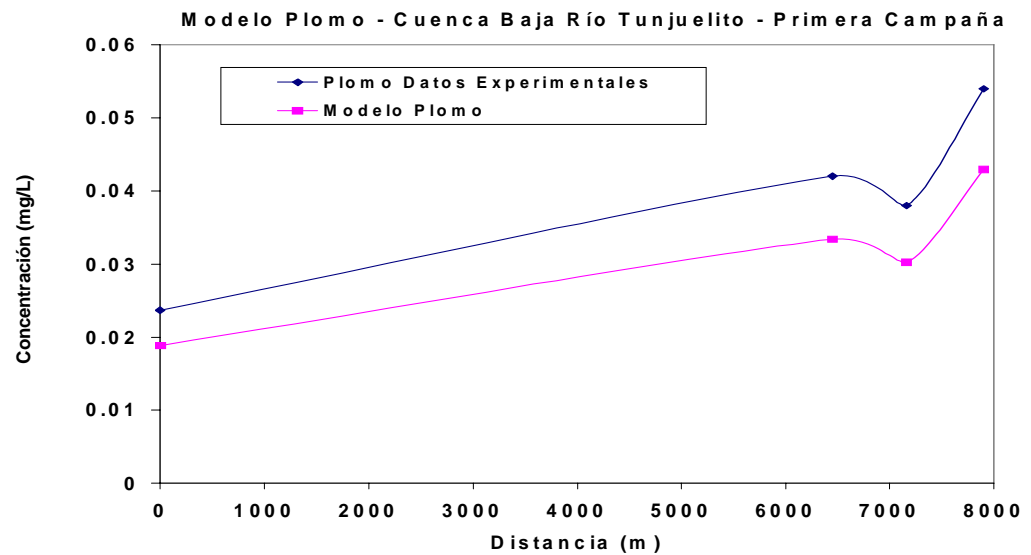
Grafica 5.6 Modelo para el Mercurio en la cuenca baja del río Tunjuelo primera campaña.



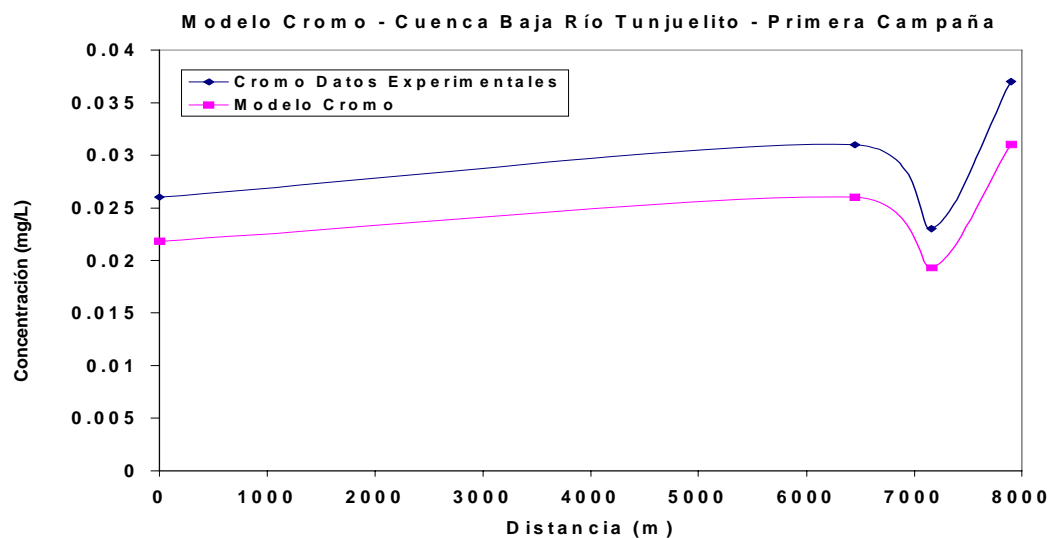
Grafica 5.7 Modelo para el Cobre en la cuenca baja del río Tunjuelo primera campaña.



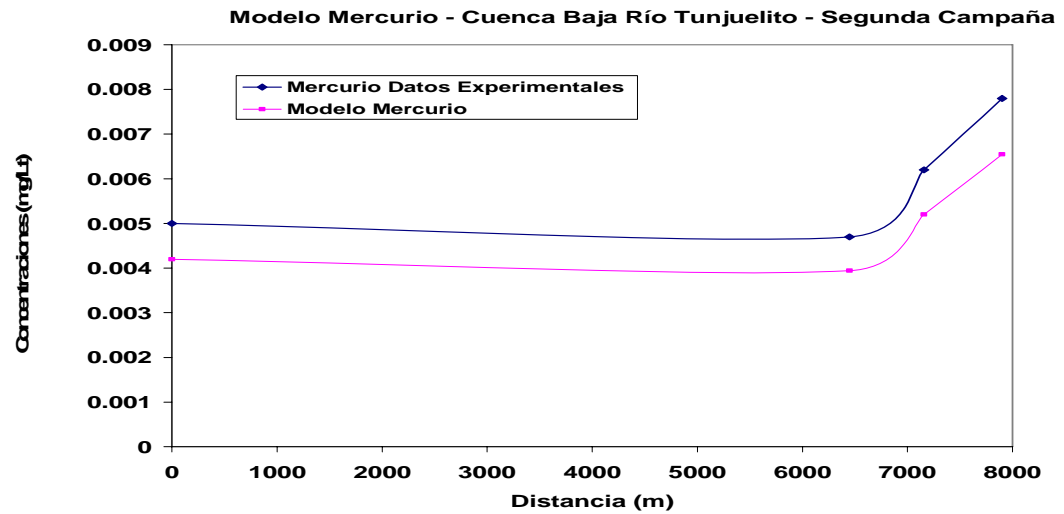
Grafica 5.8 Modelo para el Plomo en la cuenca baja del río Tunjuelo primera campaña.



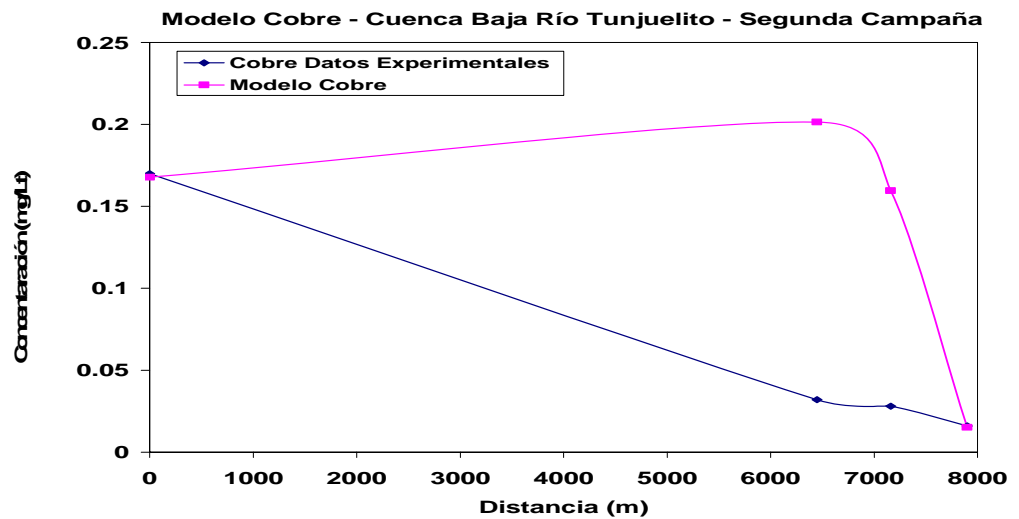
Grafica 5.9 Modelo para el Cromo en la cuenca baja del río Tunjuelo primera campaña.



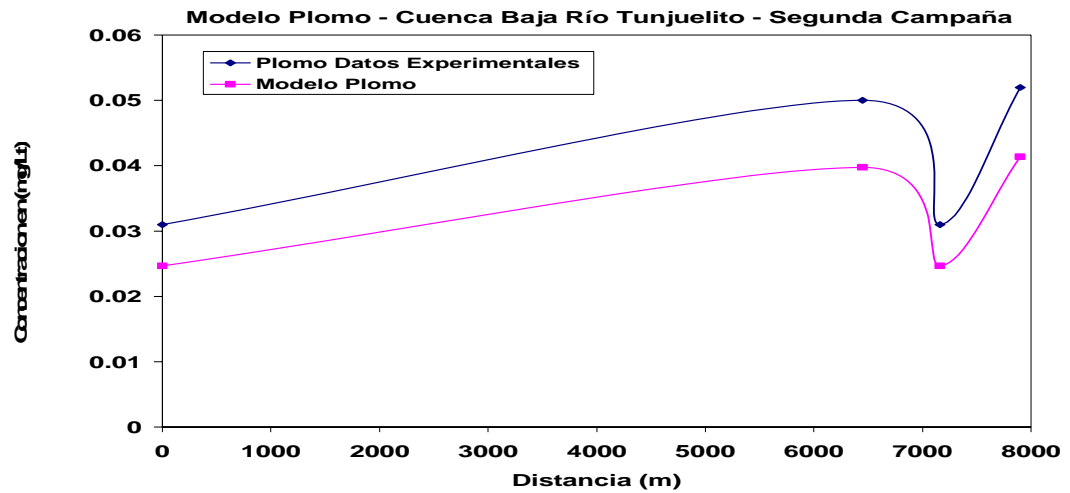
Grafica 5.10 Modelo para el Mercurio en la cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña.



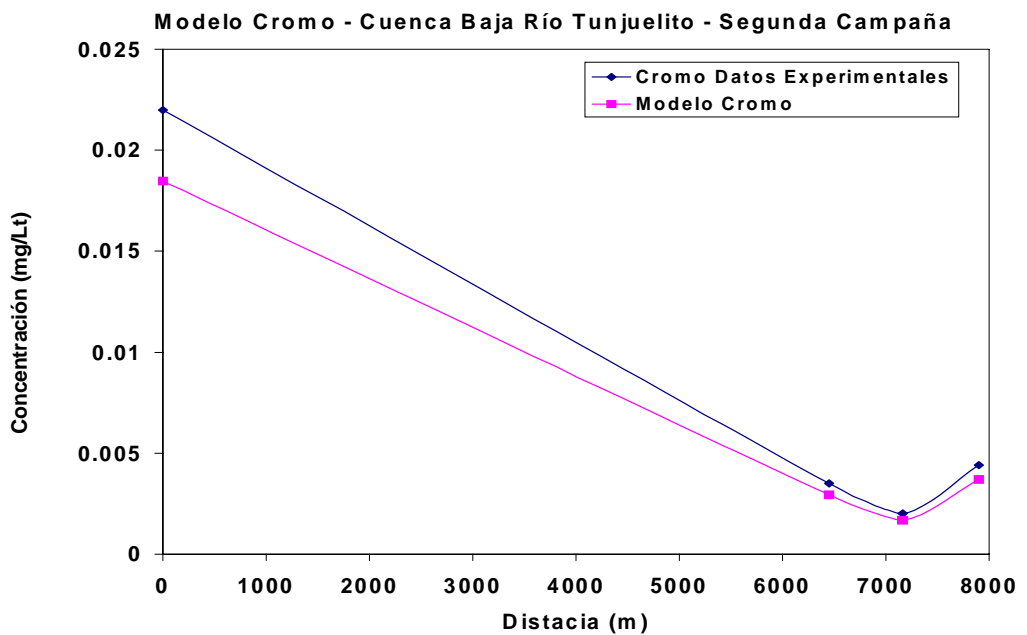
Grafica 5.11 Modelo para el Cobre en la cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña.



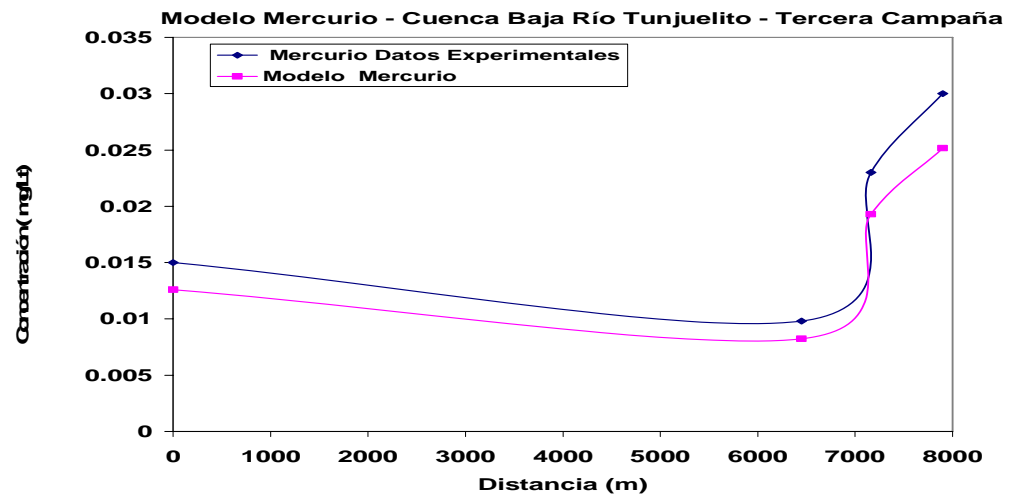
Grafica 5.12 Modelo para el Plomo en la cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña.



Grafica 5.13 Modelo para el Cromo en la cuenca baja del río Tunjuelo segunda campaña.



Grafica 5.14 Modelo para el Mercurio en la cuenca baja del río Tunjuelo tercera campaña.



Grafica 5.15 Modelo para el Cobre en la cuenca baja del río Tunjuelo tercera campaña.

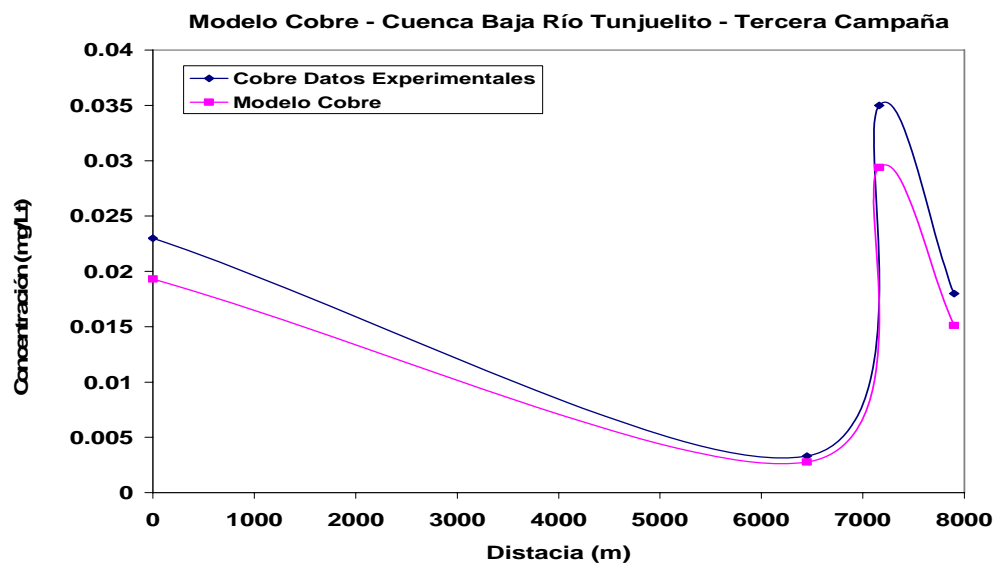
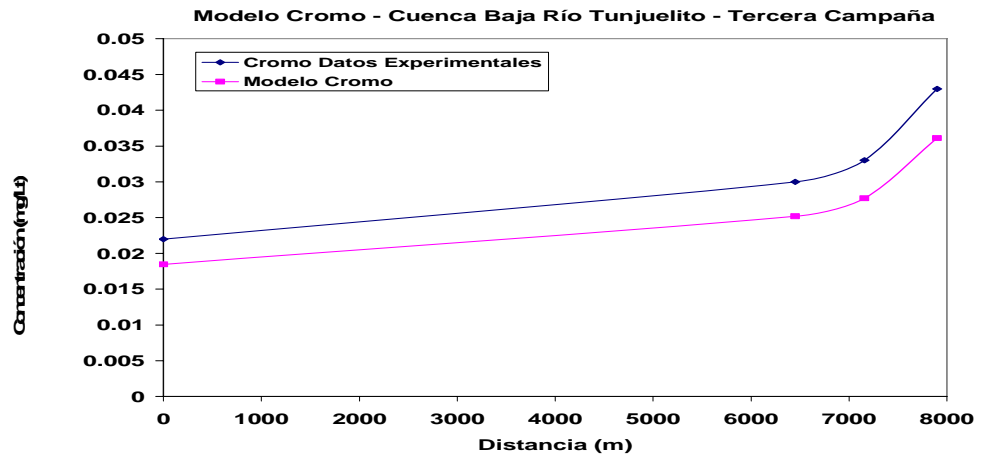
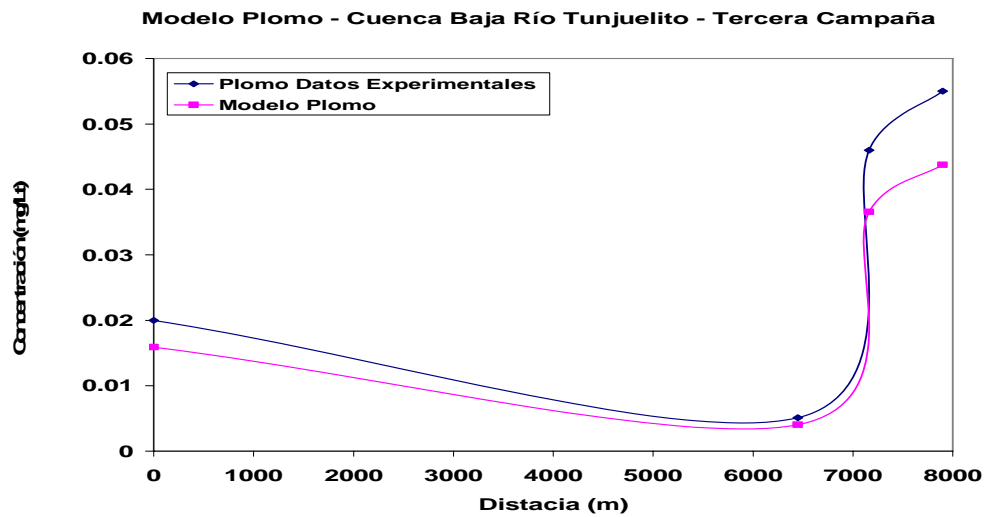


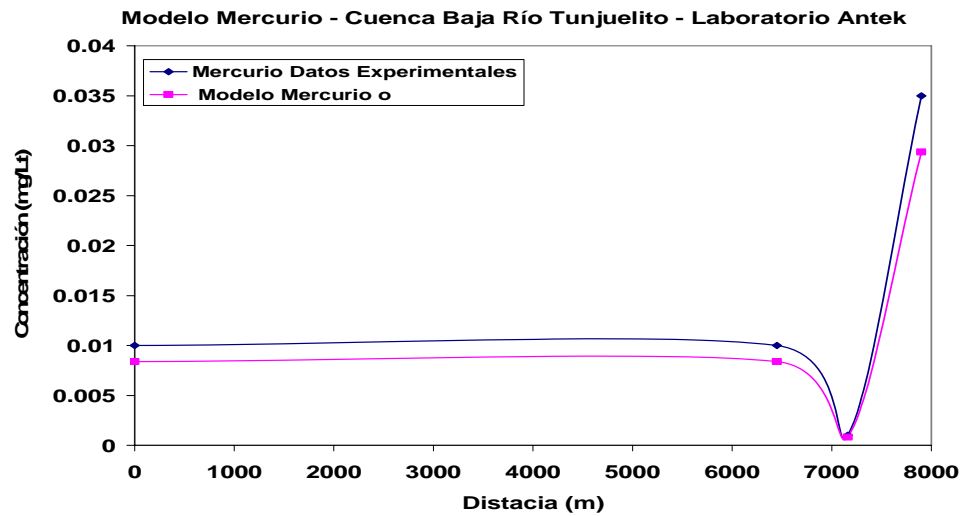
Figura 5.16 Modelo para el Cromo en la cuenca baja del río Tunjuelo tercera campaña.



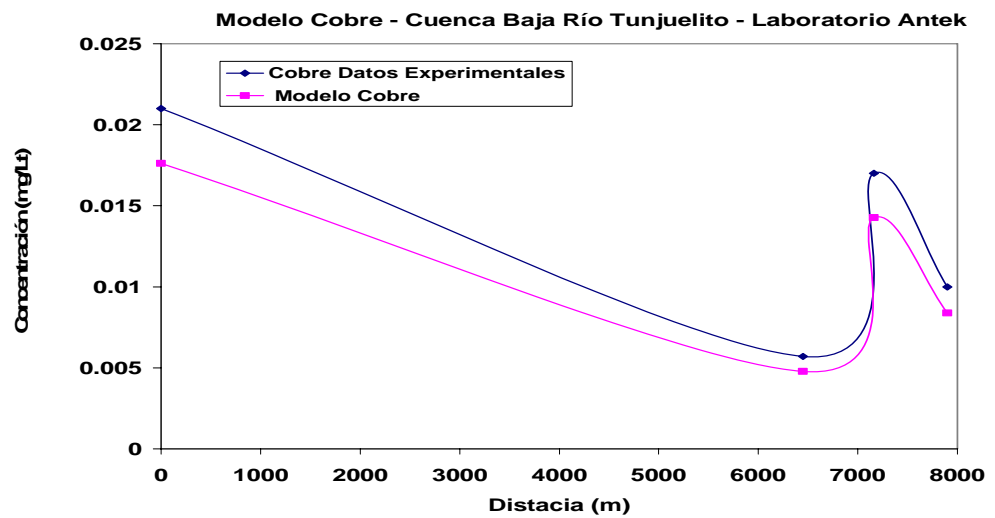
Grafica 5.17 Modelo para el Plomo en la cuenca baja del río Tunjuelo tercera campaña.



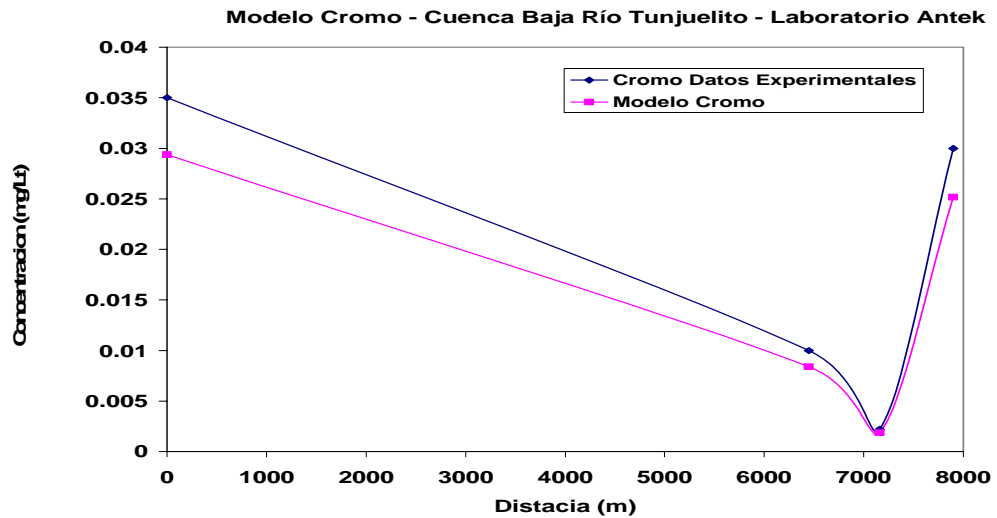
Grafica 5.18 Modelo para el Mercurio en la cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña.



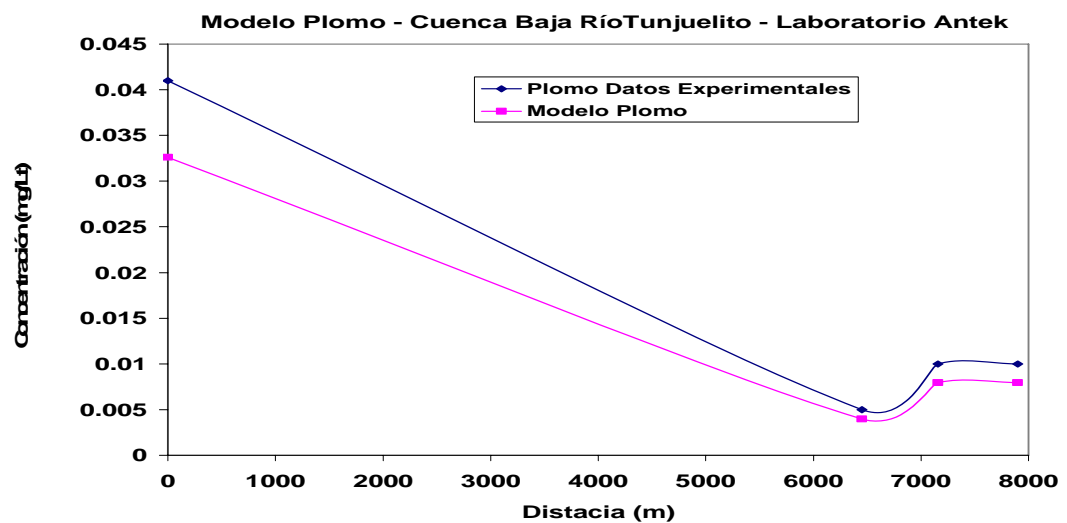
Grafica 5.19 Modelo para el Cobre en la cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña.



Grafica 5.20. Modelo para el Cromo en la cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña.



Grafica 5.21. Modelo para el Plomo en la cuenca baja del río Tunjuelo cuarta campaña.



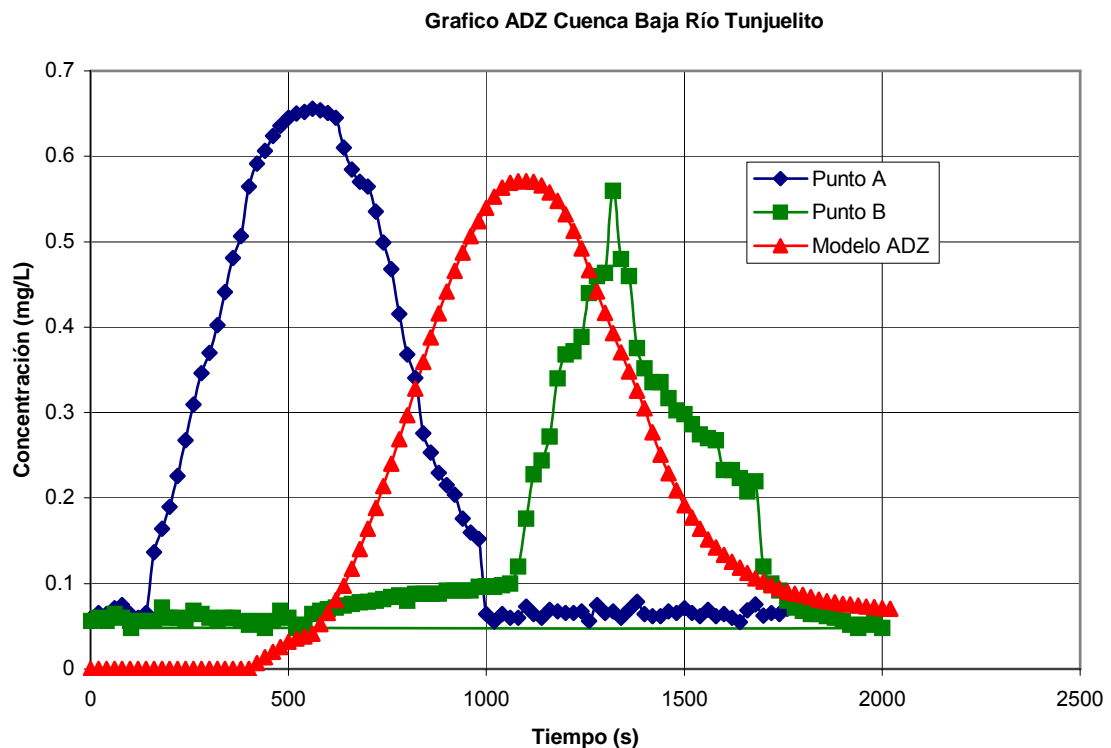
CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de Datos Actuales

- a. Se observó, que el avance o comportamiento de la gráfica general del modelo ADZ de transporte de solutos, comparado con los datos del ensayo de trazadores aguas abajo con datos experimentales, simula de manera cercana el comportamiento de las gráficas (roja y azul).generadas a partir de la concentración de sal en los punto A Y B, esto permite obtener los datos necesarios para el montaje del modelo general para metales.
Gráfica 6.1 Pg 138.
- b. Se puede analizar que el sentido hidráulico del río, tiende a ser Advectivo y no tanto Dispersivo; en la *Grafica 6.1pg 138*, se nota unas colas desprendidas al final de las campanas en los punto de inyección A – B y el modelo general ADZ; esto aduce que el comportamiento general del río tiende a ser Advectivo.
Cabe anotar que el área de las colas, es mucho menor que el área de las campanas confirmando así, el carácter advectivo del tramo del río *Graficas 6.1 pg 138*,
- c. En el avance de la grafica del modelo de trasporte ADZ se nota que el modelo inicia sobre el origen y no parte del punto en donde se originan las de lectura A y B, representada por las graficas del color azul – verde; esto indica, según la experiencias sobre modelos de trasporte que la distancia entre punto de lectura debe tener mayor amplitud.

- d. El cierre de las graficas o unión de las tres graficas entre el “Modelo ADZ simula de forma cercana el experimento realizado en campo según los puntos de lectura A y B

Grafica 6.1 Modelo *ADZ* trasporte de solutos



- d. En la Tabla 6.1 resultados del modelo *ADZ* de transporte de solutos, se detallan los tiempos de viaje (t), recorrido entre el lugar de inyección y el punto A que equivale a 645.36 seg. O 10.756 min y al punto B 1205.1 seg. O 20.085 min, dado que el tiempo de recorrido es un poco largo para la

distancia entre puntos de 100 m, se tendrá que considerar el tiempo de residencia, que llega a los 159.75 seg. Eso ajusta los tiempos teóricos hallados, ya que el soluto puede entrar dentro de corrientes pequeñas que aumentan el tiempo de trasporte.

- e. La velocidad del río en el sector de la entrada al relleno sanitario de Doña Juana es cercano a de 1.5 m/s¹. Y la velocidad obtenida en el modelo de transporte es 0.18 m/s *Tabla 6.1*, según el modelo ADZ de trasporte muestra una conductancia alta debido a la conductividad base *Anexo 2*, esto permite que halla perdida de masa al utilizar el ensayo de trazadores con Sal (NaC) y por ello no se ajuste al valor real de la velocidad del río.
- f. La fracción dispersiva (DF), arroja un valor de 0.2854, esto asegura que si su valor tiende a cero, su comportamiento hidráulico es Advectivo; y si tiende a uno, el comportamiento hidráulico es Dispersivo, lo que asegura, según el valor obtenido 0.2854 que la hidráulica del río, posee un comportamiento de distribución Advectivo.
- g. El modelo de metales *ADZ*, representados en las graficas 5.2 hasta la 5.21 conforma un avance de valores muy ajustado entre los datos experimentales y los valores del modelo general .
- h. Nótese que las direcciones del modelo de cada metal, graficas 5.7 pg a 5.21, simula el comportamiento direccional de la concentración de los diferentes metales, (experimental); esto señala, que hay una correcta formulación del modelo que demuestra el fenómeno dispersivo y advectivo

¹ Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá Departamento de Hidrología. 2005

de metales, y que de ninguna forma surgen puntos o picos de salida de la línea de trayectoria de las gráficas.

Tabla 6.1 Resultado Modelo ADZ de transporte de solutos.

parámetro	Símbolo	Unidades	Punto 1	Punto 2
<i>tiempo de viaje</i>	t	<i>segundos (s)</i>	645.36	1205.1
<i>tiempo de arribo</i>	τ	<i>segundo (s)</i>	140.00	540.00
<i>distancia</i>	d	<i>metros (m)</i>	72.00	105.00
<i>concentración promedio</i>	c	<i>mg/L</i>		
	Símbolo	Unidades	Valor	
	δ		20	
	a_1		-0.8823	
	b_0		0.1176	
<i>Tiempo de Residencia</i>	Tr	<i>segundos (s)</i>	159.75	
<i>Fracción Dispersiva</i>	DF		0.2854	
<i>velocidad promedio (tramo)</i>	v	<i>m/s</i>	0.18	
<i>Coeficiente de correlación</i>	r^2		0.5235	

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- a. El modelo ADZ constituye una herramienta experimental que aborda el conocimiento de los fenómenos de transporte de metales en estudios de calidad de agua, y aporta de manera significativa elementos para la ingeniería ambiental como el Almacenamiento Temporal, la Advección y Dispersión factores de comportamiento en el transporte de contaminantes en un cuerpo de agua.
- b. El modelo ADZ, integra modos de simulación de eventos aplicados a la Ingeniería Ambiental de forma experimental; este modelo por su carácter, es netamente investigativo y no posee certificación en el manejo regular de estados ambientales, como si lo tiene por parte de la EPA "Environmental Protection Agency" a través del Qual, Qual 2k, Hec-Ras entre otros.
- c. Se relaciona mediante el modelo, la entrada de cargas contaminantes y se determina el comportamiento Advectivo y Dispersivo que sufre los metales pesados de acuerdo a la hidráulica del río Tunjuelo.
- d. En un modelo de metales es necesario contar con las concentraciones no solo en la fracción acuosa sino en los sedimentos, toda vez que los metales como el mercurio o cromo se pueden encontrar en las dos fases, además es importante en otros estudios referente a este tema, entender el comportamiento del metal en su trayectoria y la concentración real

presente en los lodos que guíen en la predicción de posibles eventos que estén asociados al transporte tóxicos de en un cuerpo de agua.

- e. El comportamiento del los contaminantes tienden mas a un carácter advectivo que al dispersivo, según lo analizado en la grafica del ADZ de transporte de solutos. *Grafica 6.1 Pg 138.*
- f. Debido a la alta conductividad base del río Tunjuelo en casi todo su trayecto se sugiere emplear un tipo de trazador diferente a la sal común (NaCl), existen varios estudios en que se ha utilizado rodamina WT, con gran éxito ya que no es necesario grandes cantidades de trazador, el factor de error es mucho menor, y su lectura es mas simple. El costo de la rodamina es muy alto, además que no se cuenta con el equipo necesario para su medición; por lo que en este proyecto no se pudo utilizar.
- g. El ensayo con trazadores permite determinar una diferencia promedio de 1000 sg entre el punto de recolección A y el punto de recolección B , sin embargo el modelo presenta una señal que aunque se anticipa a los datos reales según la lectura como se mostró e la grafica 6.1 de transporte ADZ , le permite arribar al mismo tiempo final del paso de masa debido a la poca distancia entre los puntos de lectura.
- h. La diferencia de entrada entre los datos reales y el modelo se puede asociar a una distancia relativamente corta entre los dos puntos de recolección de muestras y una disminucion de la velocidad de flujo de río debida a la presencia de interferencia ocasionada por la presencia de rocas y obstáculos masivos que quedan descubiertos por el bajo nivel de río en el

momento en que se hizo el experimento sobre todo en el punto 1 donde se tomo las muestra para el ensayo de trazadores.

- i. Se pudo apreciar, que era importante tomar otro ensayo de trazadores al final del tramo de estudio de este proyecto (Punto 4 “Estacion de bombeo”), ya que este lugar conformaba un flujo de comportamiento laminar el cual hubiera aportado mejores datos al modelo de trasporte.
- j. El área bajo la curva del modelo se aprecia mayor que la presente en los datos reales, sin embargo esto se debe a las limitaciones que puede tener el modelo a representar en forma mas ajustada el área representada en el inicio de la toma de datos del punto dos (alrededor de 500 sg desde que comenzó la prueba)
- k. El resultado es satisfactorio, debido a que los niveles de ajuste logrados entre los parámetros de simulación y la concentración observada en cada experimento, fue bastante acertado; ya que en todos los casos el coeficiente de correlación r^2 en cada metal arrojo valores por debajo de la unidad.
- l. Los resultados del modelo de calidad permiten identificar el comportamiento general de las especies de metales en el tramo de río estudiado, pero son susceptibles de un mayor análisis de sensibilidad y de la realización de mas campañas para identificar parámetros mas generales de las condiciones de calidad del río en diferencias condiciones temporales.

- m. Es importante anotar, el fuerte impacto ambiental generado por actividad antropogénica tomando como punto de referencia, la situación que presenta el río tunjuelo en los primeros kilómetros frente a su biodiversidad de ecosistemas y que es impactado aguas abajo, en tan solo un recorrido de 53 Kilómetros.
- n. Este estudio no pretende ofrecer alternativas o recomendaciones para escenarios de soluciones ambientales, si no conformar el conocimiento para desarrollar alternativas viables de investigación para los elementos naturales afectados, debido a la problemática ambiental que como en este proyecto involucra un cuerpo de agua.

7.2 RECOMENDACIONES

- Es importante tener en cuenta para posibles estudio sobre trazadores, la forma más adecuada de ejecutar el experimento real en campo, esto permite al modelo ajustarse más a la simulación del evento real.
- Contar con mejores recursos humanos, económicos y de equipos, que involucre menores inconvenientes para el desarrollo de los proyectos.
- La utilización de equipo y tecnología como la que cuenta en la actualidad la Universidad de la Salle, que permite encaminarse a la practica y al ejercicio profesional.
- Continuar con estudios de modelación, que puedan ser aplicados a la Ingeniería Ambiental y mejoren significativamente la introducción del estudiantado en este tema.
- Introducir al pensum académico de la universidad una materia que introduzca al estudiante, en el ambiente de la modelación, ya que su utilización en la vida profesional actual, es de vital importancia.

7.2.1 A LAS INDUSTRIAS

- a. Producción mas limpia en las industrias en especial las Curtiembres; esto aportaría una disminución en las cargas contaminantes.
- b. Disminución en cantidad vertimientos entregados al río pretendiendo que cada industria cuente con sistemas de controles de vertimiento recirculación y aprovechamiento de aguas mediante plantas de tratamiento.
- c. Prohibir o restringir, los vertimientos a varias de empresas como CEMEX, o las recuperadoras de gravilla que aportan al río gran cantidad de sólidos que cambian el gradiente hidráulico del río generando mas sedimentos y conglomerados.

7.2.2 A LA COMUNIDAD

- a. Implementación de grupos de comunidades ribereñas por quienes viven en la zona y así velen por el cumplimiento de la ley y la preservación del río.
- b. Generar Planes de desarrollo sobre la recuperación total del río donde se logre a largo plazo la vida del río.

GLOSARIO

ADSORCIÓN: De adsorber, que consiste en atraer y retener sobre la superficie de un material, moléculas o iones, (en contraposición a absorber, en donde penetran en su interior.

ABSORCIÓN ATÓMICA: Es una técnica de determinación de sustancias que utiliza el principio de la espectroscopia de llama que se basa en el concepto de que la cantidad de energía absorbida por la muestra será proporcional al número de átomos de la muestra y a la capacidad de cada átomo de absorber energía. Se utiliza en el análisis cuantitativo.

ADVECCIÓN : .Proceso de transporte de un elemento en el sentido del flujo que transporta

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: determinación del efecto de pequeñas variaciones en los parámetros del modelo, sobre los resultados (variables de estado), ya sea mediante simulación numérica o por técnicas matemáticas.

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE: determinación de la incertidumbre (desviación estándar) del valor esperado de variable de estado (promedio) debido a la incertidumbre en los parámetros del modelo, datos de entrada, o estado inicial a través de técnicas de modelación estocástica.

ANTROPISMO: De Anthropos - en griego -, hombre. La forma fuerte del principio antrópico establece la posesión de hombre en su medio mundo universo

BIOACUMULACIÓN : acumulación de toxinas que no se transforman si no que se mantienen en los organismos vivos.

BIOMAGNIFICACIÓN: capacidad de los tóxicos en conformar un ciclo en la cadena alimenticia.

Bentos: conjunto de microorganismos vegetales.

CALIBRACIÓN: una comparación estadísticamente aceptable entre los resultados del modelo y las mediciones de campo; adjustment o “tuning” de los parámetros

del modelo es allowed dentro del intervalo de valores experimentalmente determinado, y reportados en la literatura.

CARGAS MÁSICAS : Producto entre la concentración de una sustancia y el flujo de un vertimiento, que da como resultado a su vez el gasto del mismo. Esta se denota como peso por unidad de tiempo.

CONDUCTIVIDAD: Es la medida de la capacidad que tiene las sustancias de conducir una corriente eléctrica, y se mide en siemens por metro.
USGS ciencias del agua - EPA

CONSTANTE DE DECAIMIENTO: Tasa de variación de la concentración por perdidas de metales en un cuerpo de agua.

COSTANTE DE SEDIMENTACIÓN: Tasa de variación de la concentración por perdidas de metales en un cuerpo de agua en razón a la sedimentación de los solutos.

CONSTANTE DE ADSORCIÓN: Tasa de variación de la concentración por perdidas de metales en un cuerpo de agua en razón a la presencia de superficies adsorbentes .

CONSTANTE DE VOLATILIZACIÓN: Tasa de variación de la concentración por perdidas de metales en un cuerpo de agua en razón a la evaporación.

CUENCA: sector montañoso que delimita un área cuyas aguas avenadas internas fluyen a través de la misma.
Hidrologia Basica para ingenieros - Escuela colombiana de Ingeniuria

DARCY-WEISBACH: La ecuación de Darcy-Weisbach es una importante ecuación ampliamente usada en hidráulica. Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería. La ecuación inicialmente fue una variante de la ecuación de Prony; esta variante fue desarrollada por el francés Henry Darcy, y más adelante fue refinada por Julies Weisbach de Sajonia en 1845 hasta la forma en que se conoce actualmente:

DIGESTION DE METALES: Solución fuertemente acida en la cual se disuelven las muestras para lograr acomplejar los metales presentes para lograr su precipitación.

DISPERSIÓN: acción física de dependiente de sus características efecto de dispersar o dispersarse en un medio.

ENFERMEDAD DE WILSON: La Enfermedad de Wilson es una enfermedad hereditaria autosómica recesiva, con una incidencia de de alrededor de 1/30.000. Su hecho principal es la acumulación de cobre en los tejidos, manifestada por síntomas neurológicos y enfermedad hepática. La enfermedad afecta por igual a hombre que a mujeres y se ha descrito en todas las razas. A menos que se establezca un tratamiento la enfermedad causa la muerte precozmente. ...

ENTRADAS DEL MODELO: funciones de forcing, o constantes requeridas para correr el modelo (por ejemplo: caudales de entrada, concentraciones de especies químicas que entran, temperatura, brillo solar.

ESTADO ESTABLE: El estado estable de un sistema físico se logra cuando este llega a un equilibrio con los demás agentes que lo afectan¹ Modelo en estado estable: define las variables sobre el efecto y el comportamiento de equilibrio del modelo, como la concentración y su derivada no cambia con respecto al tiempo,

ESPECIACIÓN QUÍMICA: es la que denota la toxicidad de la especie química, en este caso, del metal usualmente, los iones de metales en disolución acuosa son tóxicos para la biota acuática, mientras que los complejos de iones metálicos no lo son, también el grado de especiación química, afecta el grado relativo de de adsorción o enlaces entre partículas, en el agua lo cual afecta su destino (sedimentación, volatilización, precipitación) y toxicidad.

EUTROFIZACION (EUTROFICACIÓN): Proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas. Sus efectos pueden interferir de modo importante con los distintos usos que el hombre puede hacer de los recursos acuáticos (abastecimiento de agua potable, riego, recreación, etc.).

FLUJO CONTINUO: Se llega a un estado en flujo continuo, cuando en un sistema la cantidad de material que ingresa se encuentra en equilibrio con aquella que sale del mismo.

FLUX: define el paso de un fluidos de acuerdo al espacio de transporte, por su unidad de áreas que atraviesa.

HERRAMIENTA DE SOLVER: esta basada en la programación lineal, o investigación de operaciones, en donde las desigualdades son llamadas restricciones, y la función objetivo es la que se busca maximizar o minimizar según sea el propósito, por ejemplo minimizar costos o maximizar utilidades, variando un conjunto de parámetros, esta operación se hace de manera automática en un número de iteraciones preestablecidas por el

HIDROFÓBICO Incapacidad de sustancias de diluirse en agua.
“www.google.com/definicion”

HOJA DE CALCULO: Programa ordenado en forma cuadriculada, utilizado para desarrollar aplicaciones que implican la determinación de cálculos y operaciones sobre listas o series ordenadas de números.

ISOTÓNICO: El medio o solución **isotónico** es aquél en el cual la concentración de solute esta en igual equilibrio fuera y dentro de una célula. Ver también hipotónico e hipertónico.

LEY DE FICK: capacidad de un gas o elemento de difundirse en un medio. para que tenga lugar el fenómeno de la difusión, la distribución espacial de moléculas no debe ser homogénea, debe existir una diferencia, o gradiente de concentración entre dos puntos del medio.

METAL PESADO: metales del tipo rayo nucleicos que por su tamaño molecular no reaccionan si no se sedimentan.

MODELO MATEMÁTICO: simulación de eventos basado en teoría matemática

PARÁMETROS DEL MODELO: coeficientes en el modelo que se emplean para formular la ecuación del balance de masa (constantes de decaimiento, constantes de equilibrio, relaciones estequiométricas).

PORCIÓN: capacidad de los metales pesados para ligarse a la superficie de compuestos orgánicos.

PROTOCOLO PARA TOMA DE MUESTRAS DE LABORATORIO:

TRIBUTARIO: Corriente de un cuerpo principal de agua

SIMULACIÓN: uso del modelo con cualquier conjunto de datos de entrada (datos hipotéticos) y no requiere calibración ni verificación con los datos de campo.

SOLUTO: componente minoritario de una disolución.

TÓXICO: sustancia que ejerce una acción nociva para todo organismo.

VARIABLES DE ESTADO: la variable dependiente que esta siendo modelada (en este contexto la concentración de la especie química).

VERIFICACIÓN: es una comparación estadísticamente aceptable entre los resultados del modelo y un segundo (independiente) set de datos de campo para otro año o sitio alterno; los parámetros del modelo se fijan y no hay posterior ajuste esta allowed después del paso de calibración.

BIBLIOGRAFIA

STEVEN C. CHAPRA, Surface Water Quality Modeling - Mc Graw Hill.

HENRY SALAS, Criterio para Selección de Modelos Matemáticos CEPIS, 1984

LEES, M. J. L. A. CAMACHO AND P. WHITEHEAD, extension of de QUASAR water Quality model to incorporate dead zone-zone mixing hydrology and earth system science, 1998.

WAGNER B. J. HARVEY, J. W. Experimental design for stimating parameter de rate-limited mass transfer: analysis stream trace studies, Water resources research 33 (7), 1737 – 1741.

THOMAS AND MULLER, Principles of the surface water Quality modeling control, (2) 388 - 560.

BENCALA K.E. DM MCKINITH. G.W. ZELLEWEGWER. Chararacteriation of transport indice and metal – rich mountain stream based on alitium tracer injection and simulations of transient storage warer resource research 26/51/989-Mayo de 1990.

ROCING ISABEL, Implementación de un modelo matemático de calidad de agua – Quasar ADZ - -tesis de posgrado Uniandes – 2001.

HENRY SALAS, Criterios para la evaluación de los modelos matemáticos de calidad de agua Cepis– 1984.

R.O.R RODRÍGUEZ, Implementación de un software para modelación de transporte de solutos Uniandes – Bogota – 2000.

BETTY MARTIN UTERMIL Guía para la evaluación y presentación de trabajos de investigación - Quinta edición -2002.

DIAZ Y DIAZ, Trasporte y modelación de la calidad del agua en el río Bogotá Uniandes 2002.

FONNEGRA G, Modelo de transporte para redes de distribución de agua potable, Uniandes 2002

PROCESO ORDINARIO 0276 – 1998. Curtiembres El Tauro, Díaz Y Gacia, 2005

JOSÉ VARGAS BAECHLER Calidad del agua en espacios naturales: Impacto y Modelación Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Internet, <http://eias.entalca.cl/Seminario/Resumenes/Jvargas.doc>, oct 2004.

HISTORIA DEL AGUA RÍO -TUNJUELITO

Internet, <http://www.idea.unal.edu.co/proyectos/histam1/osorio-anexo.pdf>

DEFINICIONES PARA GLOSARIO. Google www.google.com/definicion.

DEFINICIONES PARA GLOSARIO. Astrocosmo www.astrocosmo.cl/glosario

ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA DE INUNDACIONES EN EL RÍO TUNJUELO, sector del barrio San Benito. Informe final - Estudio y asesorías – EAAB - 1998.

ANEXOS 1

LABORATORIO ANTEK S.A.

REPORTE DE RESULTADOS EN LODOS.

PUNTO : RELLENO SANITARIO DE DOÑA JUANA.

INFORME DE LABORATORIO No. S - 0149

SOLICITADO POR

JHON FABRICIO BEDOYA

DIRECCIÓN
TELEFAX

CALLE 28 B No 81A-65
2636134

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

PRODUCTO
LUGAR
NÚMERO DE MUESTRAS
FECHA DE RECIBIDO
FECHA DE ANÁLISIS
CONDICIONES AMBIENTALES LABORATORIO
FECHA DE REPORTE

LODOS
BOGOTÁ
2
2006-07-07
2006-07-07 AL 2006-07-13
22 °C, 44 % HUMEDAD
2006-07-13

REPORTE DE RESULTADOS

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	PUENTE RELLENO SANITARIO DE DOÑA JUANA
			ANTEK 8557
CROMO TOTAL	mg/Kg	E.A.A.	9,946
PLOMO	mg/Kg	E.A.A.	6,448
COBRE	mg/Kg	E.A.A.	3,649
MERCURIO	mg/Kg	E.A.A./V.F.	<0,050

N.E.: NO ESTABLECIDO

E.A.A.: ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

E.A.A./V.F.: ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON VAPOR FRÍO

NOTA: LOS RESULTADOS ESTÁN EXPRESADOS EN BASE SECA

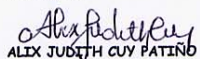
OBSERVACIONES:

PROTOCOLO DE MUESTREO: MUESTRA TOMADA POR EL CLIENTE

MÉTODO DE ANÁLISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 21st EDITION 2005, APHA, AWWA, WEF.

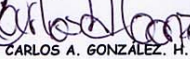
RESULTADOS VALIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA.
PROHIBIDA TODA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE
INFORME SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO

AUTORIZÓ


ALIX JUDITH CUY PATIÑO

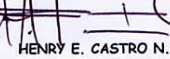
Dirección Técnica y de Laboratorio

APROBÓ



CARLOS A. GONZÁLEZ, H.

Dirección de Proyectos

REVISÓ


HENRY E. CASTRO N.

Dirección de Operaciones

 Antek s.a.
NIT 830.058.280-0

LABORATORIO ANTEK S.A.

REPORTE DE RESULTADOS EN LODOS.

PUNTO : AV. BOYACÁ – ESTACION DE BOMBEO.

INFORME DE LABORATORIO No. S - 0149

SOLICITADO POR

JHON FABRICIO BEDOYA

DIRECCIÓN
TELEFAX

CALLE 28 B No 81A-65
2636134

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

PRODUCTO
LUGAR
FECHA DE RECIBIDO
FECHA DE ANÁLISIS
CONDICIONES AMBIENTALES LABORATORIO
FECHA DE REPORTE

LOBOS
BOGOTÁ
2006-07-07
2006-07-07 AL 2006-07-13
22 °C, 44 % HUMEDAD
2006-07-13

REPORTE DE RESULTADOS

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	PUENTE AVENIDA BOYACÁ ESTACIÓN DE BOMBEO
			ANTEK 8558
CROMO TOTAL	mg/Kg	E.A.A.	25
PLOMO	mg/Kg	E.A.A.	16
COBRE	mg/Kg	E.A.A.	14
MERCURIO	mg/Kg	E.A.A./V.F.	<0,050

N.E.: NO ESTABLECIDO

E.A.A.: ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

E.A.A./V.F.: ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON VAPOR FRÍO

NOTA: LOS RESULTADOS ESTÁN EXPRESADOS EN BASE SECA

OBSERVACIONES:

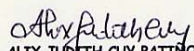
PROTOCOLO DE MUESTREO: MUESTRA TOMADA POR EL CLIENTE

MÉTODO DE ANÁLISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER & WASTEWATER 21 st EDITION 2005, APHA, AWWA, WEF.

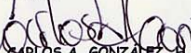
RESULTADOS VALIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA.
PROHIBIDA TODA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE
INFORME SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO

 **Antek s.a.**
NIT 830.058.286-0


AUTORIZÓ


ALIX JUDITH CUY PATIÑO
Dirección Técnica y de Laboratorio

APROBÓ


CARLOS A. GONZÁLEZ H.
Dirección de Proyectos

REVISÓ


HENRY E. CASTRO N.
Dirección de Operaciones

LABORATORIO ANTEK S.A.

REPORTE DE RESULTADOS EN LA FRACCIÓN DE AGUA.

PUNTO : RELLENO SANITARIO DE DOÑA JUANA.

MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

INFORME DE LABORATORIO No A - 0106

Bogotá D.C., Febrero 16 de 2005

SOLICITADO POR: FABRICIO BEDOYA
 DIRECCIÓN: CALLE 36 No 78A-65 / BOGOTÁ
 TELEFAX: 2636134

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

PRODUCTO: AGUAS SUPERFICIALES
 LUGAR: CUENCA RÍO TUNJUELITO
 NÚMERO DE MUESTRAS: 4
 FECHA DE RECIBIDO: 2005-02-05
 FECHA DE ANÁLISIS: 2005-02-05 AL 2005-02-16
 CONDICIONES AMBIENTALES LABORATORIO: 21°C, 59% HUMEDAD
 FECHA DE REPORTE: 2005-02-16

REPORTE DE RESULTADOS

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	ENTRADA RELLENO DOÑA JUANA PUENTE ANTEK 1894	PUENTE MEISSEN BATAILLON ARTILLERÍA ANTEK 1895	PUENTE QUEBRADA CHINGAZA RÍO TUNJUELITO ANTEK 1896	PUENTE AVEREDA BOYACA SAN BENITO E BOMBO ANTEK 1897
MERCURIO	mg/L	E.A.A./G.H.	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.0010
COBRE	mg/L	E.A.A.	0.021	0.0057	0.017	0.019
PLOMO	mg/L	E.A.A.	0.041	<0.0050	0.010	0.022
CROMO	mg/L	E.A.A.	0.035	<0.0010	<0.0010	0.030

E.A.A.: ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA
 E.A.A./G.H.: ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON GENERADOR DE HIDRÓGENO

OBSERVACIONES:
 PROTOCOLO DE MUESTREO: MUESTRAS TOMADAS POR EL CLIENTE
 MÉTODO DE ANÁLISIS UTILIZADO: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 20th EDITION 1998, APHA, AWWA, WEF.

RESULTADOS VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA.
 PROHIBIDA TODA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE
 INFORME SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO

AUTORIZÓ: 
 CARLOS A. GONZÁLEZ H.
 Dirección de Proyectos

APROBO: 
 HENRY E. CASTRO N.
 Dirección de Operaciones

REVISÓ: 
 Antek S.A.
 NIT: 830.058.286-0

INF-108 ANTEK 1894-97 (ABRIL/JUN 2005) (FEBRERO/JULIO 2005)
 INF-109 ANTEK 1894-97 (ABRIL/JUN 2005) (FEBRERO/JULIO 2005)

ANEXOS 2

ANEXO 2 LECTURAS DE CONDUCTIVIDAD

Punto de lectura A			Punto de lectura B		
No.	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO	No.	CONDUCTIVIDAD	TIEMPO
1	0.146	0	1	0.14	0
2	0.164	20	2	0.15	20
3	0.16	40	3	0.14	40
4	0.178	60	4	0.16	60
5	0.187	80	5	0.15	80
6	0.16	100	6	0.14	100
7	0.15	120	7	0.14	120
8	0.164	140	8	0.14	140
9	0.342	160	9	0.14	160
10	0.41	180	10	0.18	180
11	0.474	200	11	0.15	200
12	0.565	220	12	0.15	220
13	0.67	240	13	0.14	240
14	0.774	260	14	0.17	260
15	0.866	280	15	0.16	280
16	0.925	300	16	0.15	300
17	1.007	320	17	0.14	320
18	1.103	340	18	0.15	340
19	1.203	360	19	0.15	360
20	1.267	380	20	0.14	380
21	1.412	400	21	0.13	400
22	1.48	420	22	0.14	420
23	1.517	440	23	0.12	440
24	1.56	460	24	0.14	460
25	1.59	480	25	0.17	480
26	1.613	500	26	0.15	500
27	1.626	520	27	0.12	520
28	1.631	540	28	0.13	540
29	1.64	560	29	0.16	560
30	1.636	580	30	0.17	580
31	1.628	600	31	0.175	600
32	1.613	620	32	0.18	620
33	1.526	640	33	0.185	640
34	1.462	660	34	0.19	660
35	1.426	680	35	0.195	680
36	1.412	700	36	0.196	700
37	1.339	720	37	0.2	720
38	1.248	740	38	0.205	740
39	1.171	760	39	0.21	760
40	1.04	780	40	0.215	780
41	0.92	800	41	0.2	800

ANEXOS 3

Tabla Anexo 3
EXCEL - MODELO DE TRANSPORTE

TIEMPO(Seg)	Conc. (mg/L) A	Tiempo de viaje		TIEMPO(Seg)	Conc. (mg/L)B
		numerador	denominador		
0	0.0583708	26.22688	2.47876	0	0.055972
20	0.0655672	77.40128	2.590704	20	0.05997
40	0.063968	136.57168	2.702648	40	0.055972
60	0.0711644	205.01744	2.91854	60	0.063968
80	0.0747626	247.55616	2.774612	80	0.05997
100	0.063968	271.864	2.47876	100	0.055972
120	0.05997	327.51616	2.510744	120	0.055972
140	0.0655672	621.12928	4.045976	140	0.055972
160	0.1367316	1027.64592	6.012992	160	0.055972
180	0.163918	1348.1256	7.068464	180	0.071964
200	0.1895052	1751.9236	8.307844	200	0.05997
220	0.225887	2279.6596	9.87506	220	0.05997
240	0.267866	2894.87184	11.546224	240	0.055972
260	0.3094452	3547.98512	13.11344	260	0.067966
280	0.3462268	4157.76008	14.320836	280	0.063968
300	0.369815	4795.52104	15.448272	300	0.05997
320	0.4025986	5575.29096	16.87156	320	0.055972
340	0.4409794	6461.5676	18.438776	340	0.05997
360	0.4809594	7312.66184	19.75012	360	0.05997
380	0.5065466	8365.89496	21.421284	380	0.055972
400	0.5645176	9486.4544	23.124432	400	0.051974
420	0.591704	10307.48368	23.964012	420	0.05597

					2
440	0.6064966	11075.09968	24.603692	440	0.047976
460	0.623688	11840.4768	25.1874	460	0.055972
480	0.635682	12551.3212	25.611188	480	0.067966
500	0.6448774	13209.55192	25.899044	500	0.05997
520	0.6500748	13803.17496	26.042972	520	0.047976
540	0.6520738	14385.92344	26.154916	540	0.051974
560	0.655672	14930.77088	26.194896	560	0.063968
580	0.6540728	15397.73728	26.098944	580	0.067966
600	0.6508744	15806.97256	25.915036	600	0.069965
620	0.6448774	15805.6932	25.099444	620	0.071964
640	0.6100948	15524.71376	23.892048	640	0.073963

Continuación del cuadro anterior

Tabla Anexo 3 EXCEL - MODELO ADZ DE TRANSPORTE

660	0.5845076	15469.0616	23.092448	660	0.075962
680	0.5701148	15656.80768	22.692648	680	0.077961
700	0.5645176	15612.03008	21.996996	700	0.0783608
720	0.5353322	15093.2496	20.685652	720	0.07996
740	0.4989504	14500.58608	19.342324	740	0.081959
760	0.4681658	13602.47536	17.679156	760	0.083958
780	0.415792	12371.4112	15.67216	780	0.085957
800	0.367816	11471.38144	14.168912	800	0.07996
820	0.3406296	10220.80704	12.329832	820	0.087956
840	0.275862	8987.34408	10.578708	840	0.087956
860	0.2530734	8391.802	9.651172	860	0.087956
880	0.2294852	7910.60272	8.891552	880	0.087956
900	0.2150924	7623.3864	8.379808	900	0.091954
920	0.203898	7058.8688	7.5962	920	0.091954
940	0.175912	6377.6096	6.71664	940	0.091954

MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

960	0.15992	6048.1744	6.23688	960	0.091954
980	0.151924	4257.0704	4.31784	980	0.0963518
1000	0.063968	2413.03288	2.390804	1000	0.0967516
1020	0.0555722	2464.20728	2.390804	1020	0.095952
1040	0.063968	2601.8984	2.47876	1040	0.097951
1060	0.05997	2566.716	2.3988	1060	0.09995
1080	0.05997	2896.1512	2.654672	1080	0.11994
1100	0.0727636	3033.6824	2.734632	1100	0.175912
1120	0.063968	2800.1992	2.47876	1120	0.227886
1140	0.05997	2971.95328	2.582708	1140	0.243878
1160	0.0691654	3199.1996	2.734632	1160	0.271864
1180	0.0675662	3168.17512	2.662668	1180	0.33983
1200	0.0655672	3173.45248	2.622688	1200	0.367816
1220	0.0655672	3275.48144	2.662668	1220	0.371814
1240	0.0675662	3096.21112	2.47876	1240	0.3886056
1260	0.0563718	3334.49192	2.622688	1260	0.43978
1280	0.0747626	3618.66976	2.806596	1280	0.45977
1300	0.0655672	3488.49488	2.662668	1300	0.463768
1320	0.0675662	3390.94368	2.550724	1320	0.55972
1340	0.05997	3488.49488	2.582708	1340	0.47976

Continuación del cuadro anterior

Tabla Anexo 3 EXCEL - MODELO ADZ DE TRANSPORTE

1360	0.0691654	4044.05696	2.950524	1360	0.45977
1380	0.0783608	3953.86208	2.846576	1380	0.375812
1400	0.063968	3551.0236	2.51874	1400	0.351824
1420	0.061969	3544.6268	2.47876	1420	0.335832
1440	0.061969	3757.64024	2.590704	1440	0.335832
1460	0.0675662	3913.72216	2.662668	1460	0.3170414
1480	0.0655672	4075.72112	2.734632	1480	0.3026486
1500	0.0711644	4128.17488	2.734632	1500	0.2982508
1520	0.0655672	3901.88808	2.550724	1520	0.2862568
1540	0.061969	4066.60568	2.622688	1540	0.2742628
1560	0.0691654	4116.18088	2.622688	1560	0.269865
1580	0.061969	4005.1964	2.51874	1580	0.267866
1600	0.063968	3990.004	2.47876	1600	0.2326836
1620	0.05997	3739.56928	2.294852	1620	0.2326836
1640	0.0547726	4079.5592	2.470764	1640	0.2230884

1660	0.0687656	4821.90784	2.886556	1660	0.207896
1680	0.0755622	4659.42912	2.75862	1680	0.2194902
1700	0.0623688	4376.05088	2.55872	1700	0.11994
1720	0.0655672	4481.59808	2.590704	1720	0.09995
1740	0.063968	4702.92736	2.686656	1740	0.091954
1760	0.0703648				
				1780	0.071964
				1800	0.067966
				1820	0.063968
				1840	0.063968
				1860	0.061969
				1880	0.05997
				1900	0.055972
				1920	0.051974
				1940	0.047976
				1960	0.051974
				1980	0.055972
				2000	0.047976
				2020	0.047976
Σ		543101.4334	841.547016		

Continuación del cuadro anterior

Tabla Anexo 3
EXCEL - MODELO ADZ DE TRANSPORTE

tiempo de viaje		modelo ADZ
numerador	denominador	
23.99	2.31884	0
68.77	2.31884	0
121.54	2.3988	0
172.71	2.47876	0
207.90	2.31884	0
246.28	2.23888	0
291.05	2.23888	0
335.83	2.23888	0
438.18	2.55872	0
498.95	2.63868	0
503.75	2.3988	0
532.53	2.31884	0
622.09	2.47876	0

MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

711.64	2.63868	0
718.04	2.47876	0
718.04	2.31884	0
766.02	2.31884	0
839.58	2.3988	0
857.17	2.31884	0
841.18	2.15892	0
885.96	2.15892	0
892.35	2.07896	0.006868952
937.13	2.07896	0.013776438
1167.42	2.47876	0.019682875
1252.17	2.55872	0.025741112
1098.65	2.15892	0.031509857
1060.27	1.999	0.035329462
1277.76	2.31884	0.038229109
1504.85	2.63868	0.041446197
1627.99	2.75862	0.052659182
1731.93	2.83858	0.065751884
1839.08	2.91854	0.080314913
1949.42	2.9985	0.097445528

Continuación del cuadro anterior

Tabla Anexo 3
EXCEL - MODELO ADZ DE TRANSPORTE

2062.97	3.07846	0.117500248
2157.32	3.126436	0.140087924
2248.48	3.166416	0.164345911
2364.42	3.23838	0.188525078
2489.15	3.31834	0.213716797
2617.09	3.3983	0.24046058
2620.29	3.31834	0.268761972
2721.84	3.35832	0.296743964
2920.14	3.51824	0.328254999
2990.50	3.51824	0.35925712
3060.87	3.51824	0.388351739
3203.20	3.5982	0.416045612
3347.13	3.67816	0.441891957
3420.69	3.67816	0.465778855
3494.25	3.67816	0.487466411
3654.01	3.766116	0.506837061
3823.53	3.862068	0.524351641
3892.45	3.854072	0.539616953
3994.80	3.87806	0.552709494
4156.32	3.95802	0.563555618
4709.64	4.3978	0.56903225
6460.77	5.91704	0.570853357
8974.71	8.07596	0.570766445
10665.06	9.43528	0.570031094
11867.66	10.31484	0.565947802
14327.23	12.23388	0.558063689
16847.57	14.15292	0.547484696
17899.85	14.7926	0.531987378
18709.68	15.208392	0.512668038
20719.87	16.567712	0.492422918
22852.57	17.991	0.466938488
23828.08	18.47076	0.441771297
26834.58	20.46976	0.416789918
27634.18	20.7896	0.393054581
25363.31	18.7906	0.370795035

Continuación del cuadro

anterior

Tabla Anexo 3
EXCEL -

MODELO ADZ DE

TRANSPORTE

22878.16	16.71164	0.347861612
20223.48	14.55272	0.325745041
19388.70	13.75312	0.305290148
19209.59	13.43328	0.276891869
18929.57	13.057468	0.250847438
18216.01	12.3938	0.228855861
17905.92	12.017988	0.208981731
17649.73	11.690152	0.191446345
17149.50	11.210392	0.177480011
16867.08	10.882556	0.164122158
16884.35	10.75462	0.151865752
15910.44	10.010992	0.14213375
14984.82	9.307344	0.133358798
14856.25	9.11544	0.125381227
14219.45	8.619688	0.118342438
14277.02	8.547724	0.112367198
11452.83	6.788604	0.105777778
7516.24	4.3978	0.102127978
6638.28	3.83808	0.097825583
6014.59	3.43828	0.094264723
5376.51	3.03848	0.090228992
5008.69	2.7986	0.087750273
4775.21	2.63868	0.08664534
4682.46	2.55872	0.083976719
4659.27	2.51874	0.081386897
4560.12	2.43878	0.07910184
4381.81	2.31884	0.07774435
4122.74	2.15892	0.076311369
3857.27	1.999	0.075705684
3898.85	1.999	0.074512609
4253.87	2.15892	0.073036504
4135.53	2.07896	0.07258096
3857.27	1.91904	0.071332167
		0.070465568

Continuación del cuadro

anterior

714416.053 592.82344

Tabla Anexo 3

EXCEL - MODELO ADZ DE TRANSPORTE

RESULTADOS DE PARAMETROS Y COSTANTES PARA REMPLAZAR EN ECUACION ADZ DE METALES

t de viaje 1 (s)	645.3607738	t de viaje 2 (s)	1205.107634
c prom 1 (mg/L)	0.239075857	c prom 2 (mg/L)	0.147248743
Δt	20		
t prom (s)	559.7468604		
τ_1 (s)	140	τ_2 (s)	540
τ prom (s)	400		
δ	20		
Tr (s)	159.7468604		
a ₁	-0.882322116		
b ₀	0.117677884		
DF	0.285391258		
masa iny (kg)	25		
Distancia total		105	
Distancia del punto 2-1		72	
U (m/s)	0.18		

ANEXOS 4

Tabla Anexo 4
EXCEL - MODELO ADZ PARA METALES

0,1	86400	1,15741E-06
------------	--------------	--------------------

		24/04/2004			
punto	localizacion (m)	mercurio	cobre	plomo	cromo
1	0	0,047	0,17	0,0237	0,026
2	500	0,051	0,032	0,042	0,031
3	1250	0,069	0,028	0,038	0,023
4	1800	0,094	0,016	0,054	0,037

		31/04/04			
punto	localizacion (m)	mercurio	cobre	plomo	cromo
1	0	0,005	0,2	0,031	0,022
2	500	0,0047	0,24	0,05	0,0035
3	1250	0,0062	0,19	0,031	0,002
4	1800	0,0078	0,018	0,052	0,0044

		16/06/2004			
punto	localizacion (m)	mercurio	cobre	plomo	cromo
1	0	0,015	0,023	0,02	0,022
2	500	0,0098	0,0033	0,0051	0,03
3	1250	0,023	0,035	0,046	0,033
4	1800	0,03	0,018	0,055	0,043

		05/02/2005			
punto	localizacion (m)	mercurio	cobre	plomo	cromo
1	0	0,01	0,021	0,041	0,035
2	500	0,01	0,0057	0,005	0,01
3	1250	0,001	0,017	0,01	0,0022
4	1800	0,035	0,01	0,01	0,03

Continuación del cuadro anterior

Tabla Anexo 4
EXCEL - MODELO ADZ PARA METALES

Tr (s)	159,74	τ (s)	400
Tr (día)	0,001848843	τ (día)	0,00462963
kHg	kCu	kPb	kCr
0,00056059	0,000560592	0,00073684	0,00056059
campana 1			
Hg modelo	Cu modelo	Pb modelo	Cr modelo
0,0394	0,1427	0,0188	0,0218
0,0428	0,0269	0,0334	0,0260
0,0579	0,0235	0,0302	0,0193
0,0789	0,0134	0,0429	0,0311

campana 2			
Hg modelo	Cu modelo	Pb modelo	Cr modelo
0,0042	0,1678	0,0247	0,0185
0,0039	0,2014	0,0398	0,0029
0,0052	0,1594	0,0247	0,0017
0,0065	0,0151	0,0414	0,0037

campana 3			
Hg modelo	Cu modelo	Pb modelo	Cr modelo
0,0126	0,0193	0,0159	0,0185
0,0082	0,0028	0,0041	0,0252
0,0193	0,0294	0,0366	0,0277
0,0252	0,0151	0,0437	0,0361

campana 4			
Hg modelo	Cu modelo	Pb modelo	Cr modelo
0,0084	0,0176	0,0326	0,0294
0,0084	0,0048	0,0040	0,0084
0,0008	0,0143	0,0080	0,0018
0,0294	0,0084	0,0080	0,0252

Tabla Anexo 4
EXCEL - MODELO ADZ PARA METALES

COMPARATIVOS					
Muestras tomados en campo	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
	Hg modelo	Hg experimental	Cu modelo	Cu experimental	Pb modelo
1	0,0394	0,094	0,1427	0,1700	0,0188
2	0,0428	0,069	0,0269	0,0320	0,0334
3	0,0579	0,051	0,0235	0,0280	0,0302
4	0,0789	0,047	0,0134	0,0160	0,0429
5	0,0042	0,078	0,1678	0,2000	0,0247
6	0,0039	0,0062	0,2014	0,2400	0,0398
7	0,0052	0,005	0,1594	0,1900	0,0247
8	0,0065	0,0047	0,0151	0,0180	0,0414
9	0,0126	0,03	0,0193	0,0230	0,0159
10	0,0082	0,023	0,0028	0,0033	0,0041
11	0,0193	0,015	0,0294	0,0350	0,0366
12	0,0252	0,0098	0,0151	0,0180	0,0437
13	0,0084	0,01	0,0176	0,0210	0,0326
14	0,0084	0,01	0,0048	0,0057	0,0040
15	0,0008	0,01	0,0143	0,0170	0,0080
16	0,0294	0,01	0,0084	0,0100	0,0080

Continuación del cuadro anterior

Columna 6	Columna 7	Columna 8
Pb experimental	Cr modelo	Cr experimental
0,054	0,0218	0,037
0,042	0,0260	0,031
0,038	0,0193	0,023
0,0237	0,0311	0,026
0,052	0,0185	0,044
0,05	0,0029	0,022
0,031	0,0017	0,02
0,031	0,0037	0,0037
0,055	0,0185	0,043
0,046	0,0252	0,033
0,02	0,0277	0,03
0,0051	0,0361	0,022
0,041	0,0294	0,035
0,022	0,0084	0,03
0,01	0,0018	0,01
0,005	0,0252	0,001

Continuación del cuadro anterior

Columna 1		Columna 2
Dif cuad		Dif cuad
0,00297656		0,000747309
0,000686497		2,6479E-05
4,7671E-05		2,0273E-05
0,001016607		6,61976E-06
0,005447035		0,001034337
5,08857E-06		0,001489445
4,12113E-08		0,000933489
3,40667E-06		8,37813E-06
0,000303181		1,36791E-05
0,000218327		2,81598E-07
1,85027E-05		3,16766E-05
0,000236416		8,37813E-06
2,58584E-06		1,14036E-05
2,58584E-06		8,4014E-07
8,39204E-05		7,47309E-06
0,000375267		2,58584E-06
0,011423692		0,004342648
0,500502052		1

Continuación del cuadro anterior

Columna 3		Columna 4
Dif cuad		Dif cuad
0,001235544		0,000230461
7,38821E-05		2,48499E-05
6,04795E-05		1,36791E-05
0,000370512		2,55045E-05
0,000747709		0,000652175
0,000104708		0,000363391
4,02498E-05		0,000335681
0,000107288		5,69186E-11
0,001528269		0,0006021
0,001759277		6,12176E-05
0,000275093		5,32033E-06
0,001493361		0,000198397
7,04058E-05		3,16766E-05
0,000324838		0,000466908
4,18833E-06		6,6484E-05
8,72292E-06		0,000584471
0,008204527		0,003662317
0,009588868		0,341180756

ANEXOS 5

PLANOS DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA:

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI

ESC 1:10000

**PLANO DE UBICACIÓN: DOCUMENTO DE TESIS BIBLIOTECA UNIVERSIDAD
DE LA SALLE BOGOTA**

MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA