



SEMINARIO “HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y CONTROL DEL RECURSO HÍDRICO URBANO”

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL A LA LUZ DEL DECRETO 3930 - 2010

Dic. 4 / 2013

Luis Alejandro Camacho Botero, M.Sc., Ph.D.

Profesor Asociado - Departamento de Ingeniería Civil y
Ambiental

Facultad de Ingeniería – Centro de Investigaciones en
Ingeniería Ambiental **CIIA**

CONTENIDO

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL A LA LUZ
DEL DECRETO 3930 - 2010

1. **Problemática de la Contaminación Hídrica en Colombia - Estrategias de Priorización Soportadas en Modelación**
2. **Utilidad de los modelos matemáticos – Algunos Ejemplos**
3. **Metodología para la obtención de un modelo **predictivo** de calidad del agua**



Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- En Colombia cerca del 90% de las aguas residuales domésticas se vierten a los ríos **sin ningún tipo de tratamiento**



Efluente de curtiembre sin
tratamiento

Cortesía Tania Santos



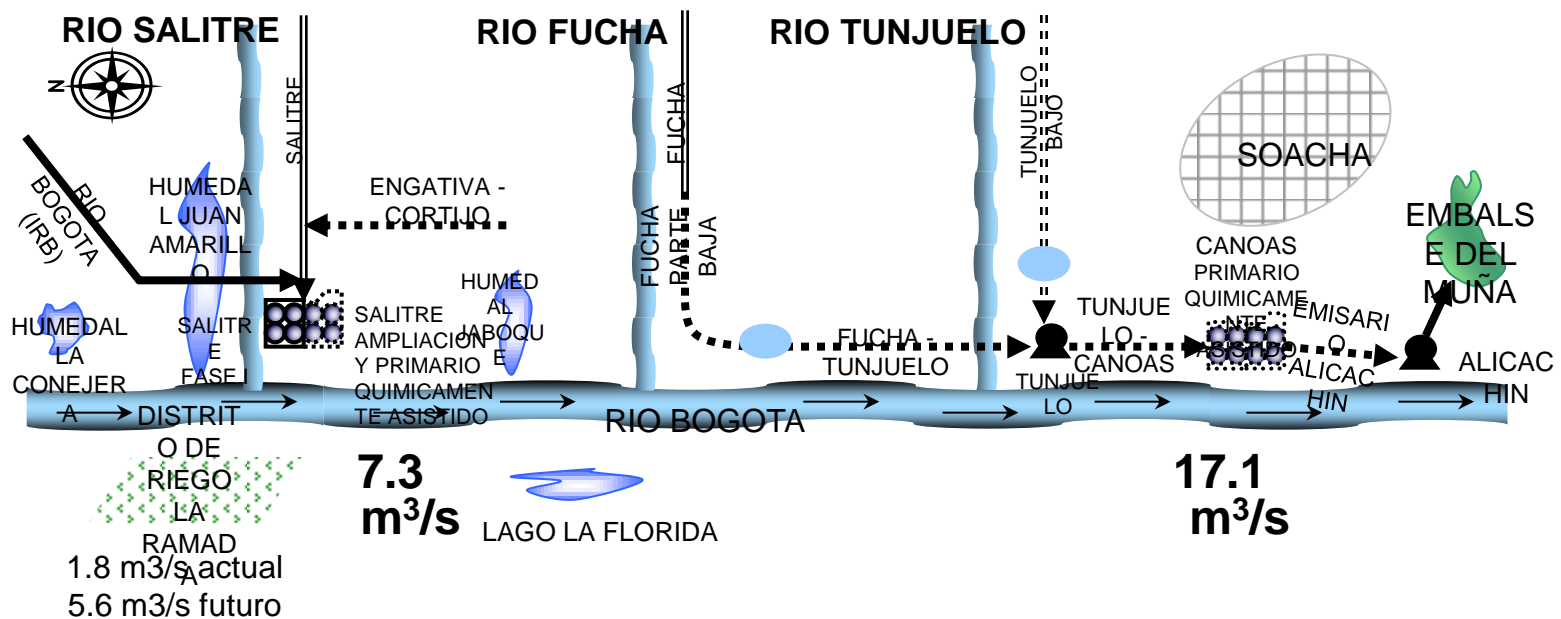
Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- Gran parte de los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales presentan **deficiencias en cuanto a su capacidad y no cumplen con el proceso completo de tratamiento**



Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- **Los recursos para invertir en tratamiento de aguas residuales son limitados**
 - **Solo Río Bogotá US\$2500' + US\$110' + US\$450'**



Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

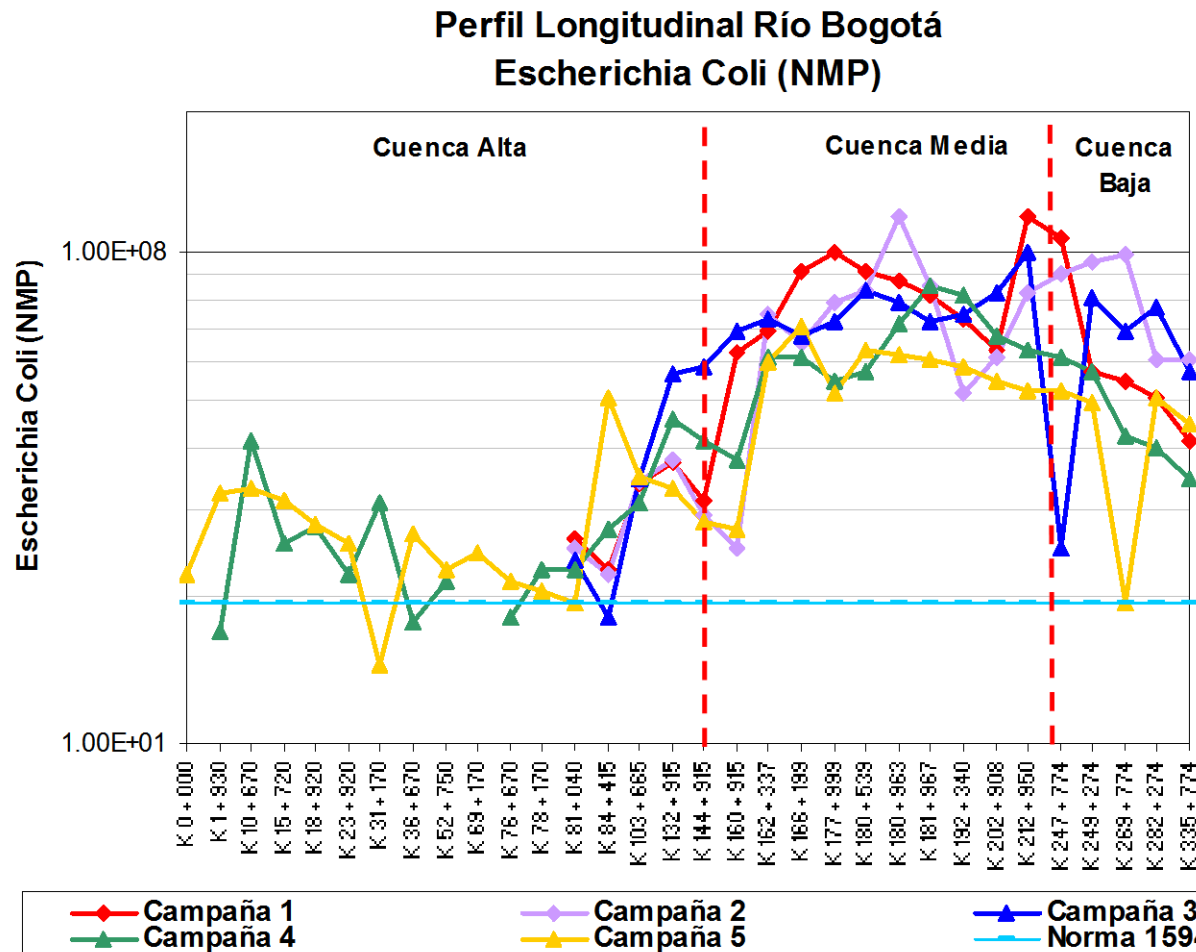
- **Es necesario priorizar las inversiones!**



Problemática - Patógenos

Contaminación por organismos patógenos generalizada en Colombia. Priorización de la inversión?

Uniandes-EAAB (2003)



A.Arr. Villa Pinzón	K 0 + 0
Pte. Plaza	K 1 + 930
Chingacio	K 10 + 670
P. Telecom	K 15 + 720
A.Ab.Ptar Choncontá	K 18 + 920
Saucio	K 23 + 920
Sta.Rosita	K 31 + 170
Pte. Santander	K 36 + 670
Pte. Florencia	K 52 + 750
Pte. Tulio Botero	K 69 + 170
A.Arr. Termizipa	K 76 + 670
A.Ab. Termozipa	K 78 + 170
El Triunfo	K 81 + 40
El Espino	K 84 + 415
Pte. Vargas	K 103 + 665
La Balsa	K 132 + 915
La Virgen	K 144 + 915
Vuelta Grande	K 160 + 915
El Cortijo	K 162 + 337
Jaboque	K 166 + 199
Hda. San Fco	K 177 + 999
A.Arr. Saucedal II	K 180 + 539
B.Saucedal II	K 180 + 963
B.Patio Bonito II	K 181 + 967
La Isla	K 192 + 340
Huertas	K 202 + 908
V.Mondoñedo	K 212 + 950
La Guaca	K 247 + 774
A.Ab. Sta Marta	K 249 + 274
A.Ab. R. Apulo	K 269 + 774
Pte Tocaima Agua de Dio	K 282 + 274
Des. R.Bogotá	K 335 + 774



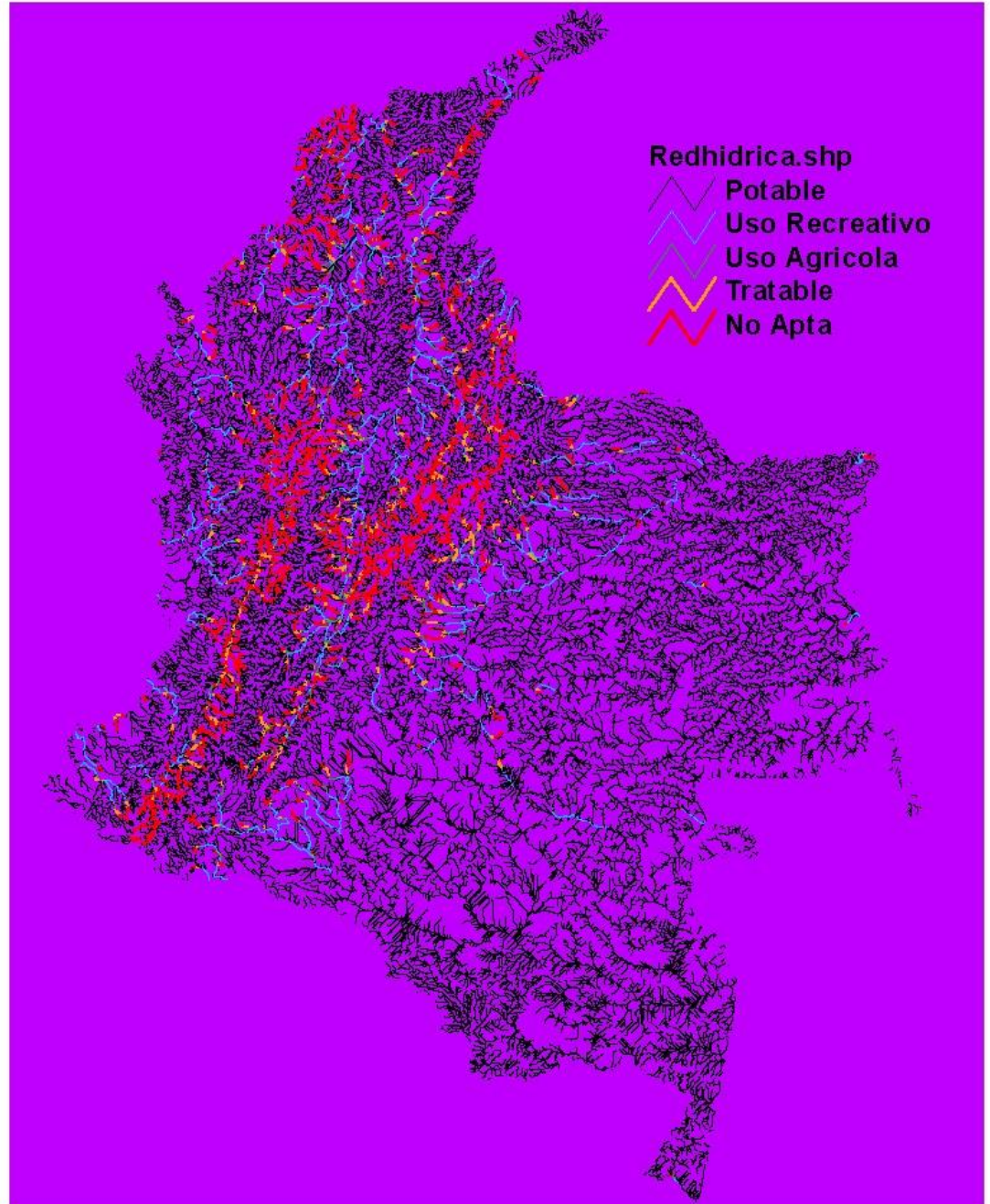
Org. Patógenos – Colombia

En rojo: Agua No Apta para Potabilización

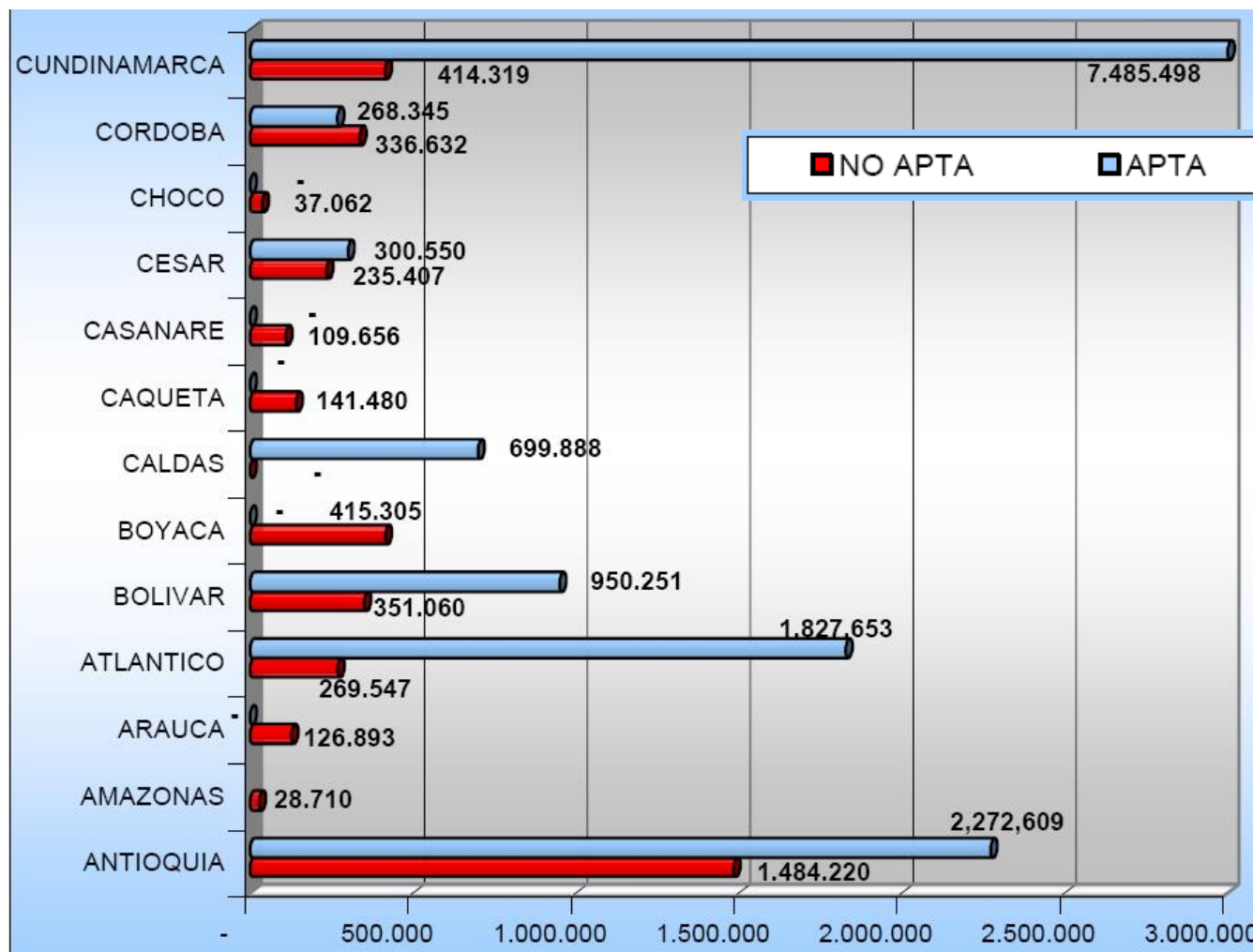
Barrera *et al.*, (2002)

Díaz-Granados *et al.*,
(2002)

Uniandes-MMA (2001)



Problemática - Patógenos

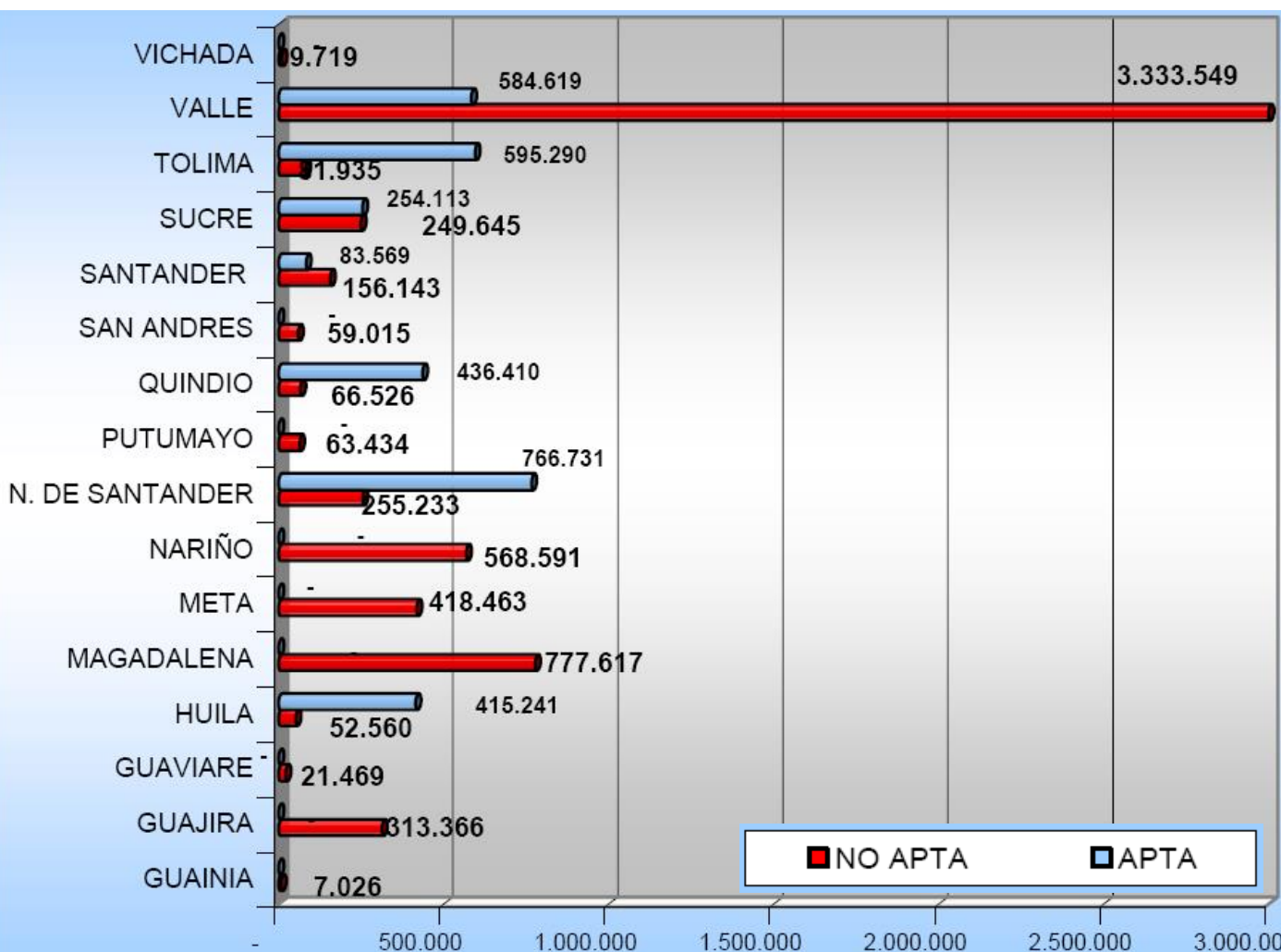


Población
afectada por
suministro de
**agua no apta
microbiológica-
mente** para el
consumo humano

(Informe Nacional de la calidad del agua, Superintendencia de
Servicios Públicos, 2005)



Problemática - Patógenos



Población afectada por suministro de agua no apta microbiológicamente para el consumo humano

(SPP, 2005)



Saneamiento Hídrico – Enfoque posible

- Debe establecerse primero *por qué es necesario tratar*, y *a qué nivel*, teniendo en cuenta una *visión integral de cuenca*, *la cantidad y calidad del agua residual producida*, *la capacidad de asimilación de la fuente receptora* y *los usos del agua aguas abajo*.



Saneamiento Hídrico – Enfoque posible

- Priorización por **afectación de la salud pública**
- Priorización por **limitación de usos del agua aguas abajo** por violación de los estándares de calidad del agua
 - Uso estético (ejemplo basuras, desoxigenación – olores)
 - Uso de agua para **potabilización**
 - Riego **agrícola**
 - Recreación
 - Preservación de la vida acuática y la ecología (muerte de peces y otros organismos superiores, eutrofización de embalses, etc).



Saneamiento Hídrico – Enfoque posible

El objetivo último en el tratamiento de vertimientos a las fuentes receptoras debe ser *alcanzar estándares de calidad que no presenten conflictos con los usos actuales y prospectivos del agua ni efectos nocivos a la salud pública.*



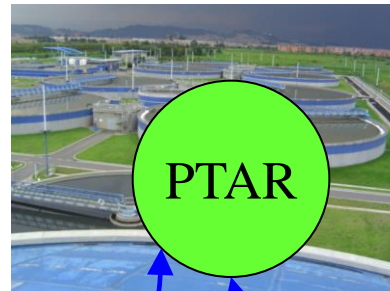
Enfoque posible

- Manejo ***integral de la contaminación urbana*** (sistema de drenaje, alcantarillado, PTAR, fuente receptora)

**Definición nivel de
tratamiento óptimo**



Red de alcantarillado o
•Vertimiento
•Cúanta agua residual y
•de qué características?



**Usos del agua?
Estándares de
calidad de agua**



Fuente receptora



2. Utilidad de los modelos matemáticos

El diseño de un plan de saneamiento o de un esquema de tratamiento de aguas vertidas a una fuente receptora es un problema que puede ser complejo, y con el fin de obtener soluciones técnicas apropiadas que sean **costo-efectivas**, los ingenieros y técnicos estamos en la obligación de proponer la **aplicación de las mejores tecnologías disponibles**.

Los modelos de **transporte** de contaminantes y de **calidad** del agua permiten **dimensionar y diseñar** soluciones estructurales (e.g. plantas de tratamiento) y no estructurales (e.g. tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento.



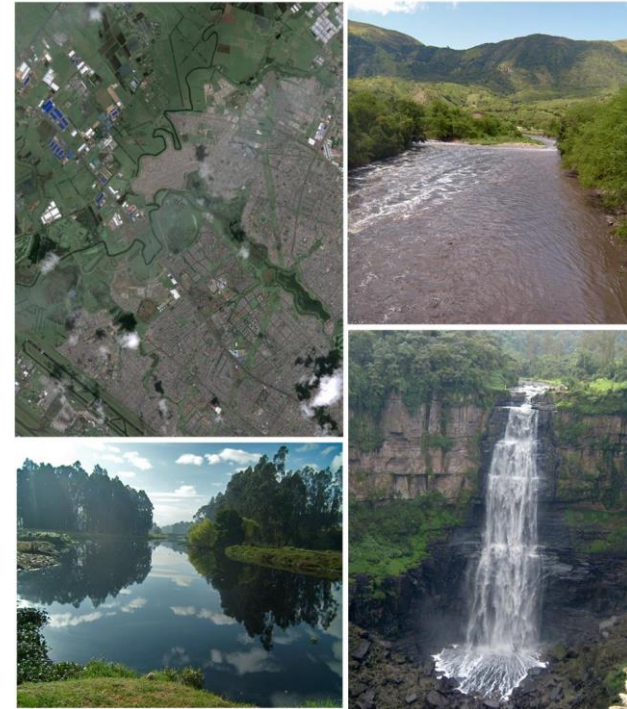
Utilidad de los modelos – Algunos Ejemplos

- ***Río Bogotá***
- ***Río Magdalena***
- ***Río Grande de Tárcos***



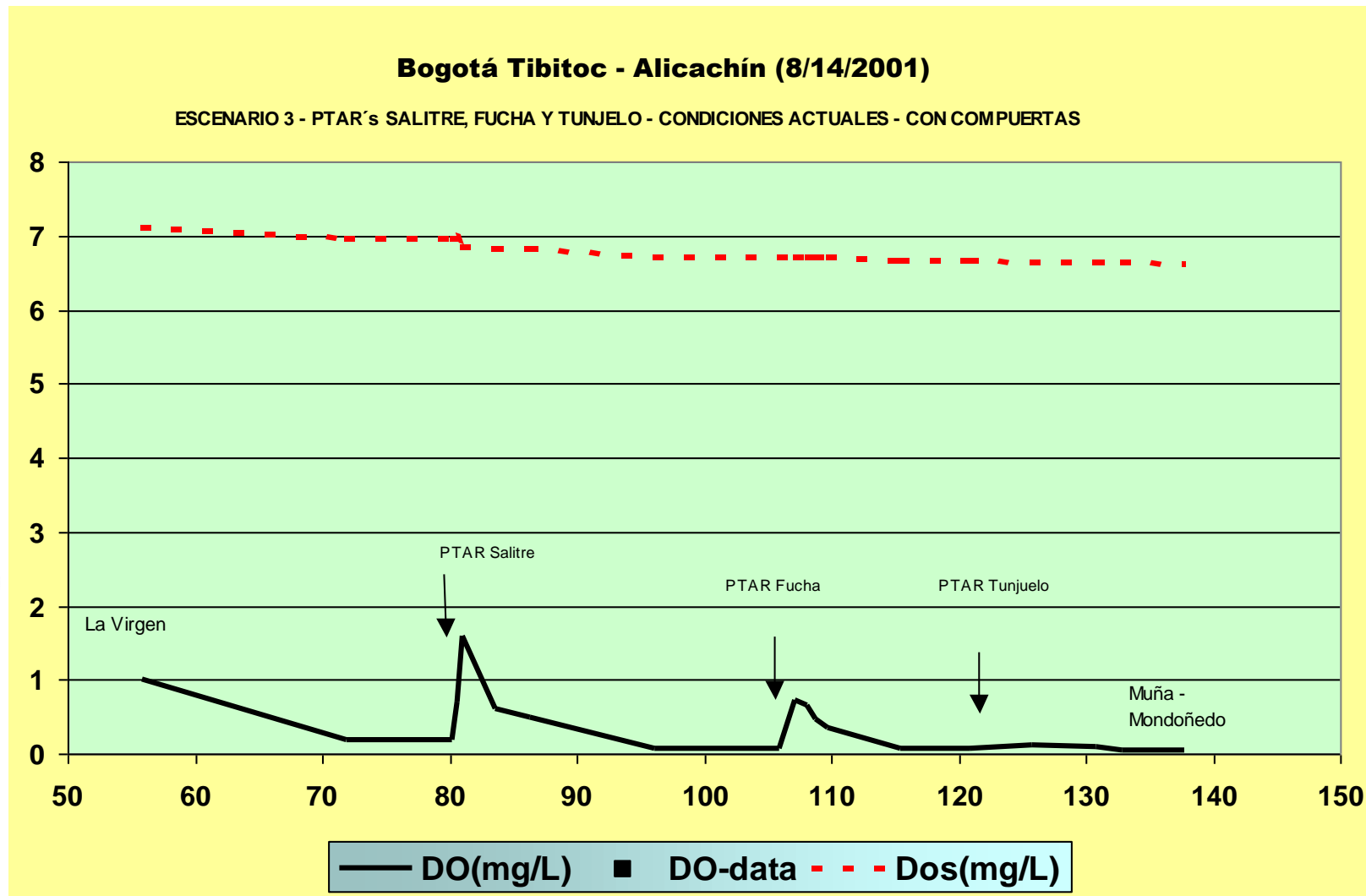
Río Bogotá

- (Uniandes – EAAB, 2001-2002) Modelación de la calidad del agua del Río Bogotá
- (UNAL- CAR, 2007- 2008) Diseño de la red de calidad hídrica del Río Bogotá
- (UNAL – EAAB, 2010 - 2011) Modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá



POT 2002 Bogotá – Uniandes-EAAB 2002

Oxígeno disuelto



Río Bogotá - EAAB-UNAL 2010

Herramienta de simulación de tiempos de viaje calibrada

SimulacionRBObj

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

PROGRAMA PARA SIMULACIÓN DE TIEMPOS DE VIAJE DEL RÍO BOGOTÁ

acueducto

Opciones

OPCIONES INICIALES PARA SIMULACIÓN

Tipo de Datos:

Parámetros calibrados:

Tramos

SELECCIÓN DE TRAMOS PARA SIMULACIÓN

Sección inicial de simulación:

Sección final de simulación:

Resultados

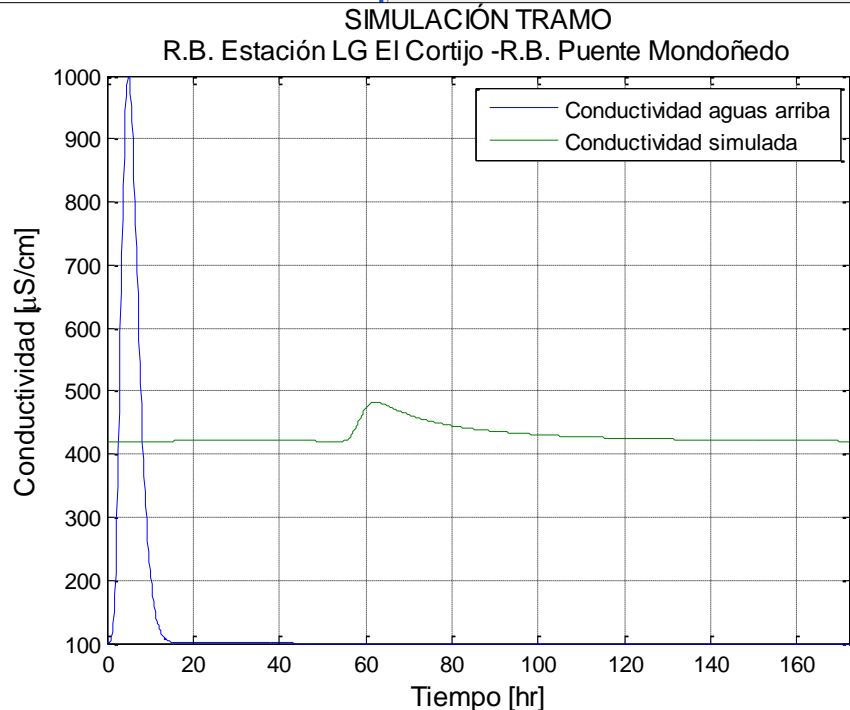
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Tiempo de arribo del soluto a sección aguas abajo [hr]:

Tiempo de viaje medio del soluto a sección aguas abajo [hr]:

Tiempos de viaje a confluencias y vertimientos

	Tiempo de arribo [hr]	Tiempo medio de viaje [hr]
Colector Villa Gladis	0.8141	1.0055
Desc. Vertimiento Engativá	4.0409	4.9338
Desc. Estación Navarra	9.8070	12.5816
Desc. Estación Rivera	12.4593	16.2243
Río Fucha	13.6390	18.0613
Descarga Gibraltar	16.7753	21.7640
Río Tunjuelo	32.3540	44.6447



Río Bogotá

Herramienta de Simulación de Escenarios calibrada para condiciones actuales

SimulaQRB
Archivo Simulación Ayuda

PROGRAMA PARA LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS RÍO BOGOTÁ

Opciones

OPCIONES INICIALES PARA SIMULACIÓN

Tramo de simulación: Definido por el usuario
Condición Hidrológica: Condición Promedio
Escenario de saneamiento: 1. Condiciones actuales ...
Tipo de Análisis: Análisis por Concentraci...
Condición Simulada: Concentración Promedio
Tiempo de simulación: Calculado internamente

VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

Opciones de visualización: Límites Normas
Seleccionar Determinante: Demanda Bioquímica de ...

Norma Graficar

Objetivos de calidad del agua CAR Clase 1	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 2	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 3	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 4	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 5	<input type="checkbox"/>

Graficar Resultados

Tramos

SELECCIÓN DE TRAMO PARA SIMULACIÓN

Sección inicial de simulación: 1. R.B. Aguas arriba V/pinzón vía principal
Sección final de simulación: 54. R.B. SalSiPuedes

Túnel Cancas - Cuenca Baja

Simular Escenario

sítiosRB

SITIOS DE MONITOREO SOBRE EL RÍO BOGOTÁ

SITIO	ABSCISA
R.B. aguas arriba V/pinzón vía principal	K002+241
Confluencia quebrada Chigualá	K004+241
R.B. aguas abajo Quebrada Chigualá	K004+287
R.B. Puente plaza de mercado V/pinzón	K004+586
Confluencia Quebrada Quinchá	K004+591
R.B. aguas arriba descarga alcantarillado V/pinzón	K005+095
R.B. Puente última descarga alcantarillado V/pinzón	K005+226
Confluencia Quebrada San Pedro	K007+916
R.B. Puente acceso Stock 4:40	K011+156
R.B. Pte. de madera - acceso a. abajo Q. Chingacio	K012+966
R.B. Descarga puente de madera curtiembres	K012+966
Descarga curtiembre Puente de madera	K013+026
R.B. Puente Hacienda-Pto. intermedio	K014+466
R.B. Agregados Chocontá	K015+241
Descargas Agregados Chocontá	K015+246
R.B. aguas abajo Agregados Chocontá	K015+796
R.B. Puente de madera Tarabita-Pto. intermedio	K017+291
R.B. Puente aguas arriba Río Tejar	K020+256
Confluencia Río Tejar	K021+456
R.B. Puente vía Chocontá- Cucunubá	K024+051
R.B. Puente aguas arriba PTAR Chocontá	K024+987
Descarga PTAR Chocontá	K024+992
R.B. Puente aguas abajo PTAR Chocontá	K026+156
R.B. Pto. intermedio arriba Saucio	K028+200
R.B. Estación Telemétrica Saucio	K032+056
R.B. aguas arriba Río Sisga	K034+456
Confluencia Río Sisga	K034+556
R.B. aguas abajo Confluencia Río Sisga	K036+545
R.B. Pte. quebrada Santa Rosa	K038+485



Río Bogotá

Herramienta de Visualización de Resultados y Comparación de Escenarios

Escenarios

Archivo Ayuda

PROGRAMA PARA LA COMPARACIÓN DE ESCENARIOS EN EL RÍO BOGOTÁ

Tramo de Simulación: Subcuencas

Subcuenca: Río Bogota completo

Tipo de Análisis: Concentración

ID	Escenario de simulación	Condición hidrológica	Condición s
1	Condiciones actuales...	Seca	Máxima
1	Condiciones actuales...	Promedio	Promedio
1	Condiciones actuales...	Húmeda	Mínima

Cargar Escenarios

VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS



Opciones de visualización: Curvas de excedencia

Seleccionar determinante: Oxígeno disuelto.....

Norma	Graficar
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 1	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 2	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 3	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 4	<input type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 5	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Tratamiento doméstico convencional	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Tratamiento doméstico con desinfe...	<input checked="" type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Uso agrícola	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Uso pecuario	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Recreativo con contacto primario	<input type="checkbox"/>

Graficar Resultados

acueducto
AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ



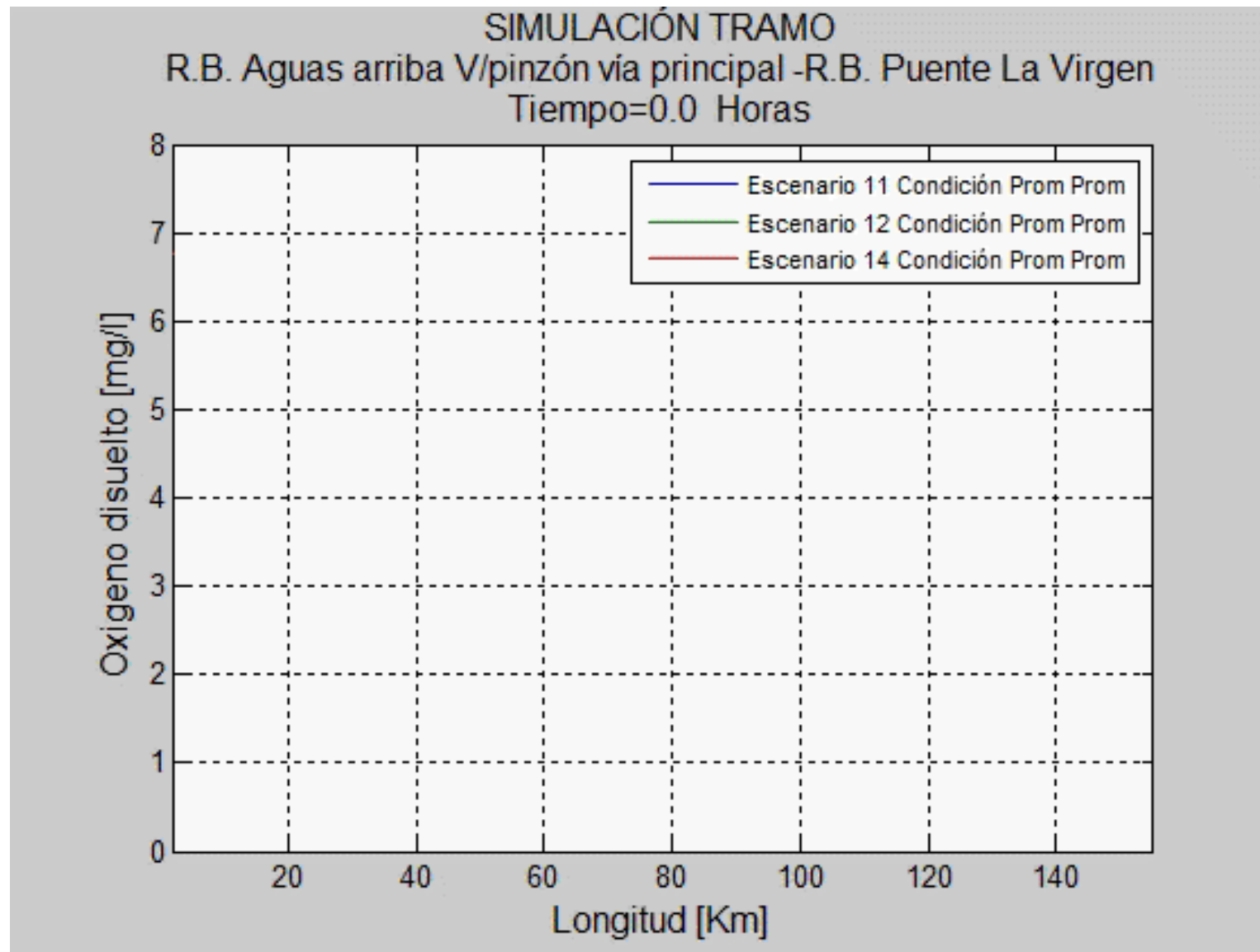
INIER-AULAS-ACADEMIA-ORBE-VERUM



Utilidad de los modelos – Algunos Ejemplos

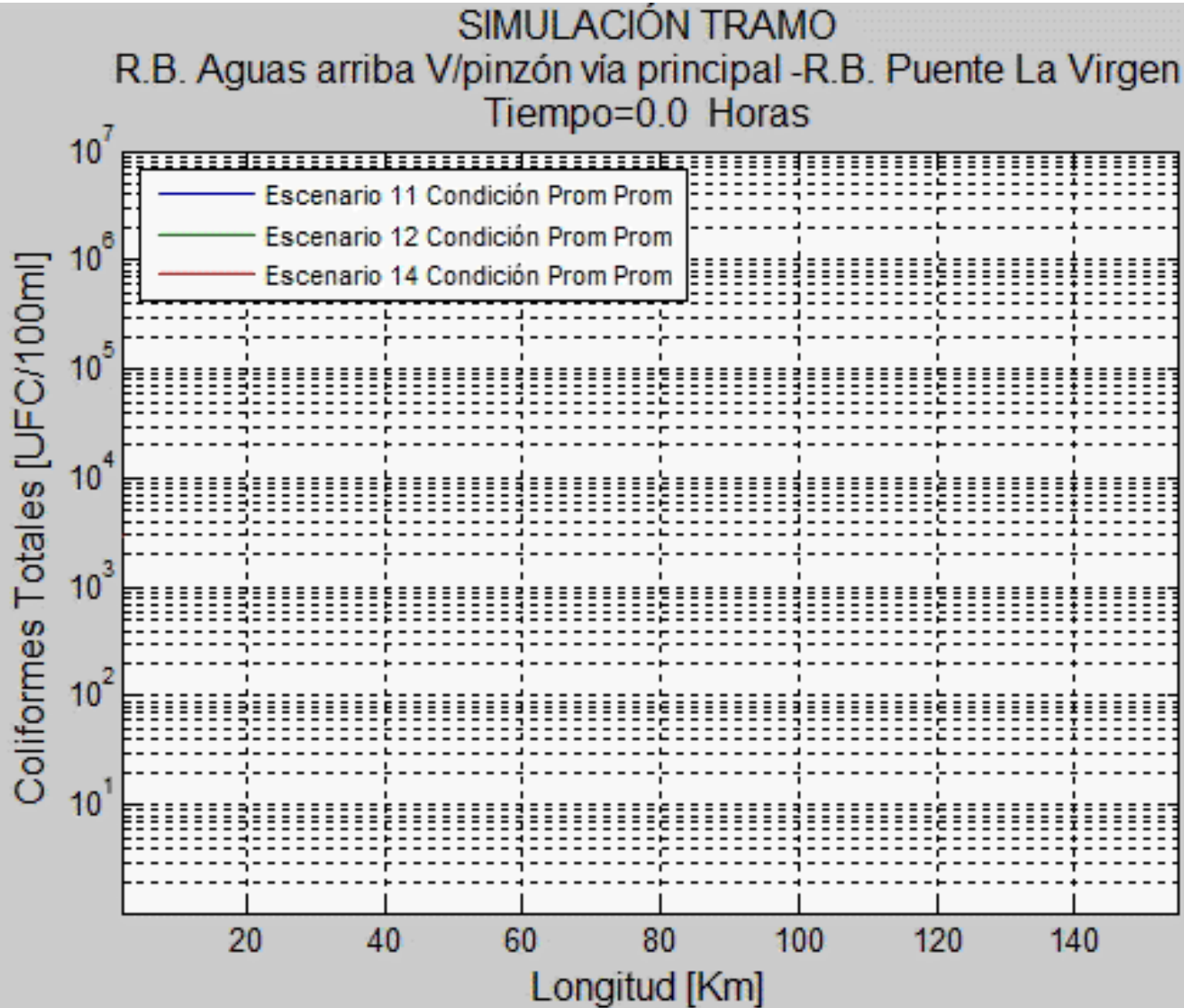
Simulación de escenarios

Oxígeno disuelto



Utilidad de los modelos – Algunos Ejemplos

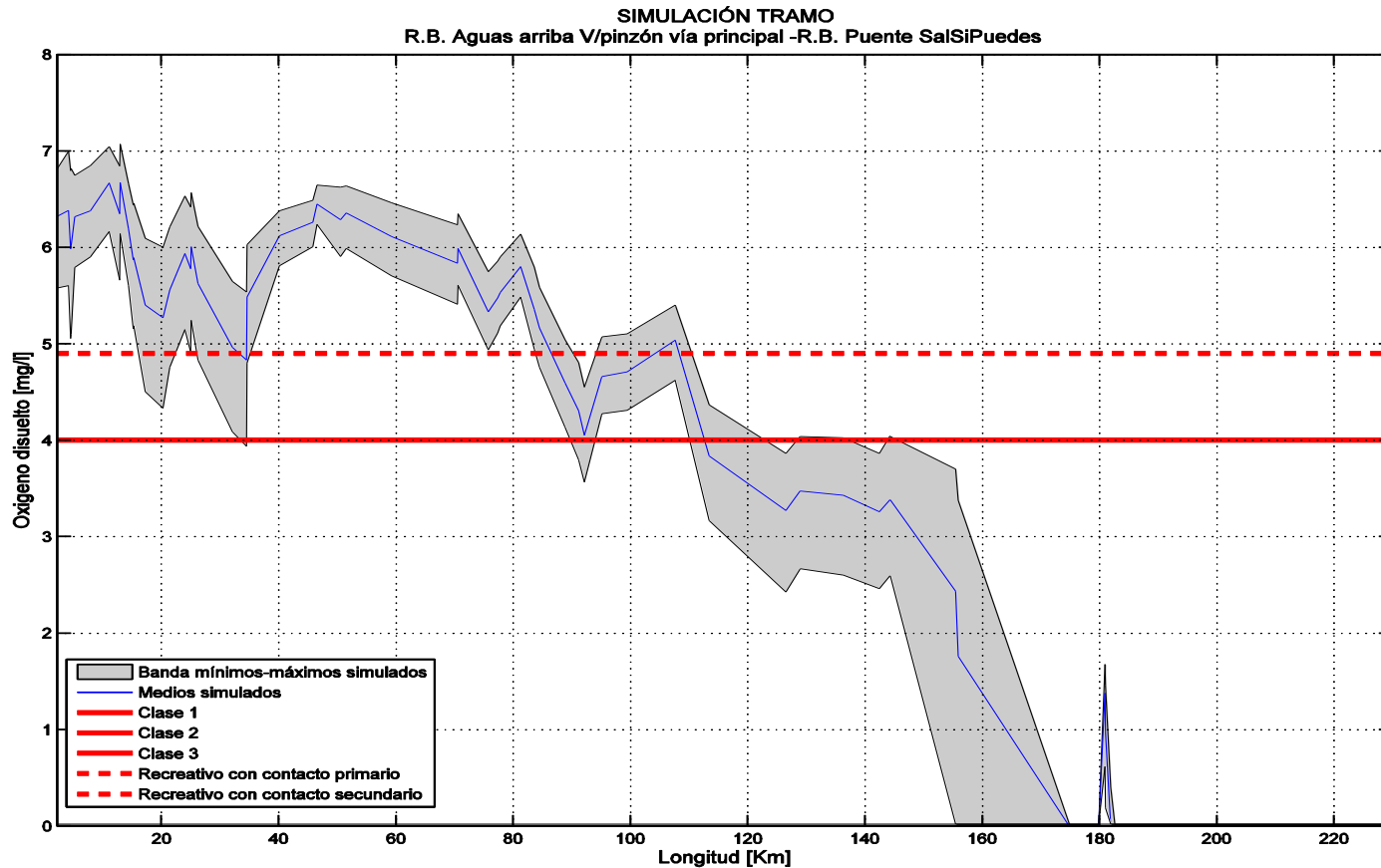
Coliformes totales



Ejemplo Resultados

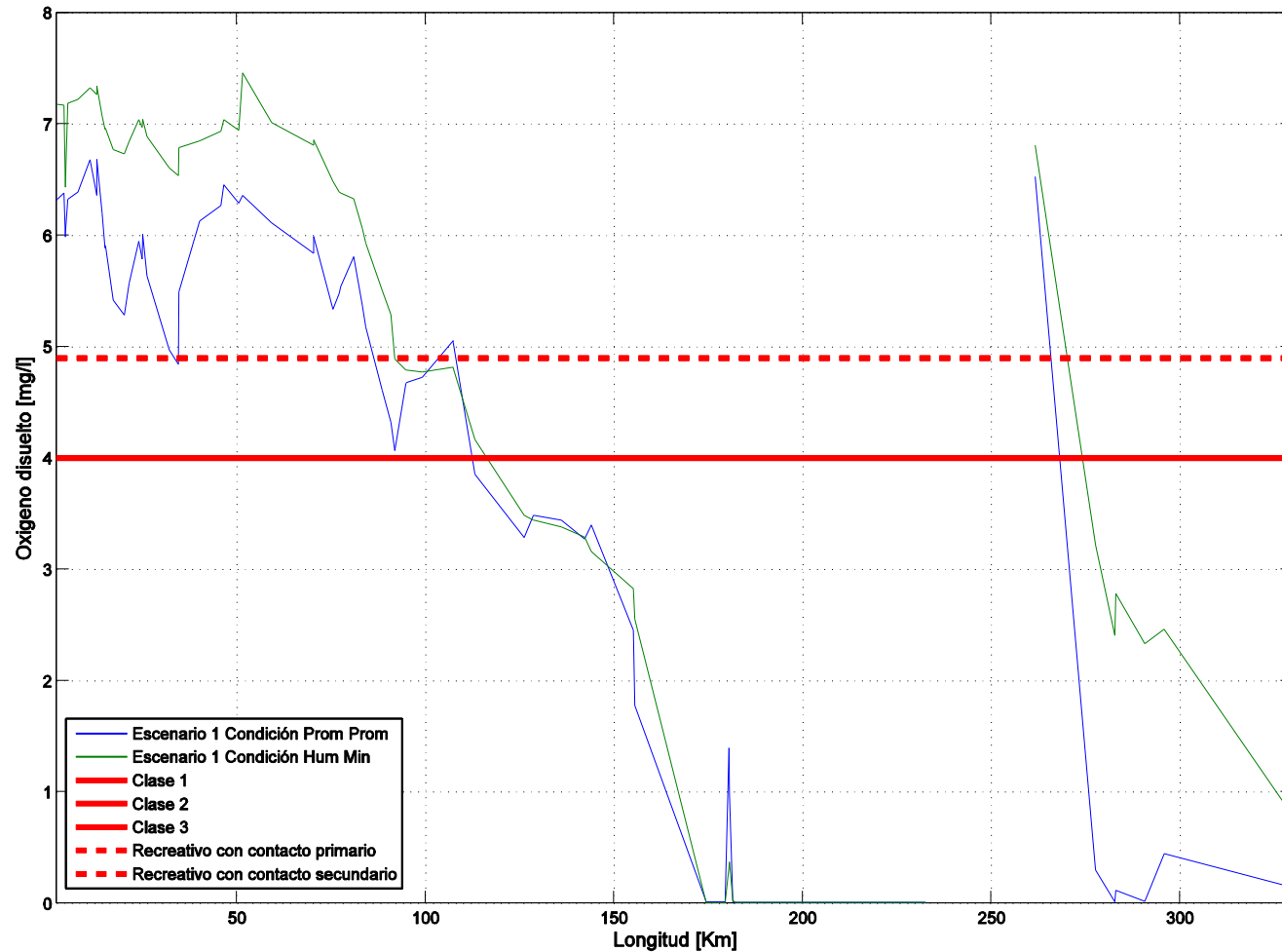
Simulación de escenarios (Banda máximos - mínimos)

Oxígeno disuelto



Ejemplo Resultados

SIMULACIÓN TRAMO
R.B. Aguas arriba V/pinzón vía principal -R.B. Puente SalSiPuedes
Valores medios



Conclusiones Río Bogotá

Con el modelo calibrado y validado se simularon 20 escenarios de saneamiento diferentes. Las conclusiones principales de los escenarios simulados son:

El escenario planteado de **tratamiento biológico de las efluentes de curtiembres y demás industrias de la Cuenca Alta**, junto con la implementación de los PSMV definido, para los municipios de la Cuenca Alta, se considera **NECESARIO para mantener condiciones aerobias** en la corriente, y condiciones favorables para **potabilización y riego agrícola** desde el Kilómetro 25 hasta el Kilómetro 85, justo aguas abajo de Tibitóc en la entrada del Río Negro.



Conclusiones Río Bogotá

Bajo los escenarios modelados **no se alcanzará la Clase II** planteada para la parte alta de la Cuenca Alta del Río Bogotá, antes del kilómetro 25 en Suesca y en toda la Cuenca Alta, razón por la cual se recomienda este límite sea revisado por la autoridad ambiental CAR teniendo en cuenta los resultados del estudio.

No pueden, de acuerdo a la normatividad vigente, llevarse a cabo actividades de **uso agrícola en la parte alta del Río antes de Suesca, ni después de la confluencia del Río Negro en la cuenca media**. Solamente para los escenarios de **condiciones favorables con tratamiento secundario en la PTAR Salitre y la PTAR Canoas se presenta en la Cuenca Baja, a la altura de Tocaima**, la posibilidad de utilizar riego agrícola.



Conclusiones Río Bogotá

Además de tratamientos industriales y municipales en la Cuenca Alta definidos por los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos a 2035, se considera **necesario tratamiento terciario en la PTAR Salitre, y la eliminación de las conexiones erradas de aguas residuales a los ríos Salitre, Fucha y Tunjuelo, para devolver condiciones aerobias al Río Bogotá en la Cuenca Media.**

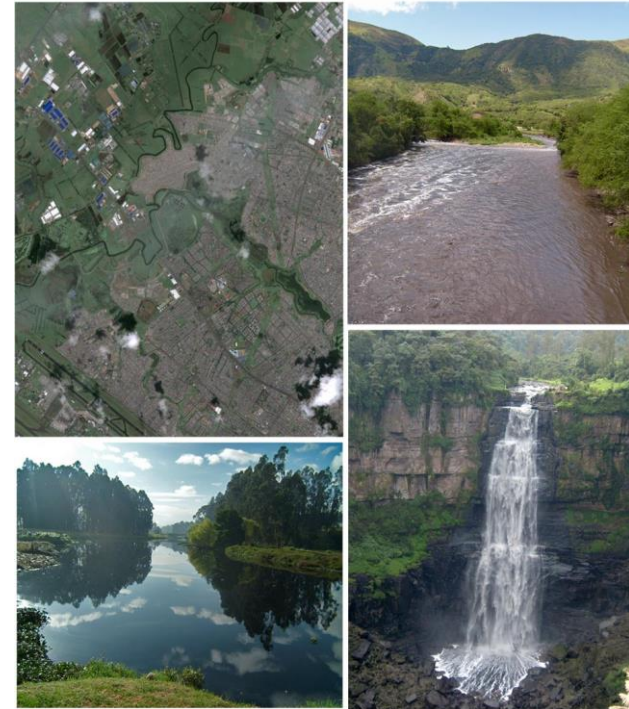
Costo aproximado – US\$3500 millones



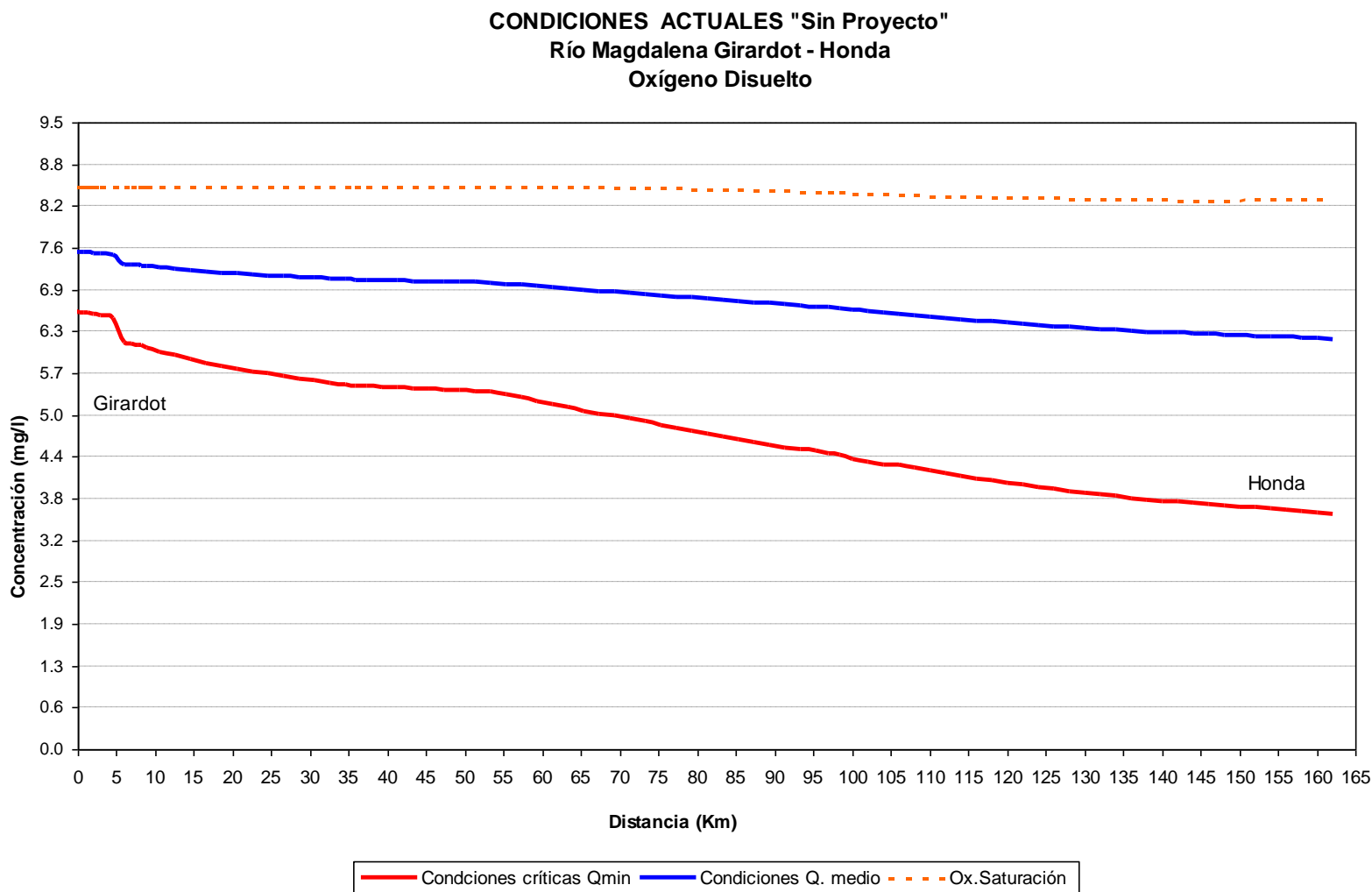
Río Magdalena y Río Tárcoles Grande de Tárcoles

■ (Uniandes – ACUAGYR) Modelación de la calidad del agua del Río Magdalena (Girardot – Honda) y caracterización de las aguas residuales de Girardot)

■ (Uniandes – AyA 2003) Modelación de la calidad del agua del Río Grande Virilla de Tárcoles

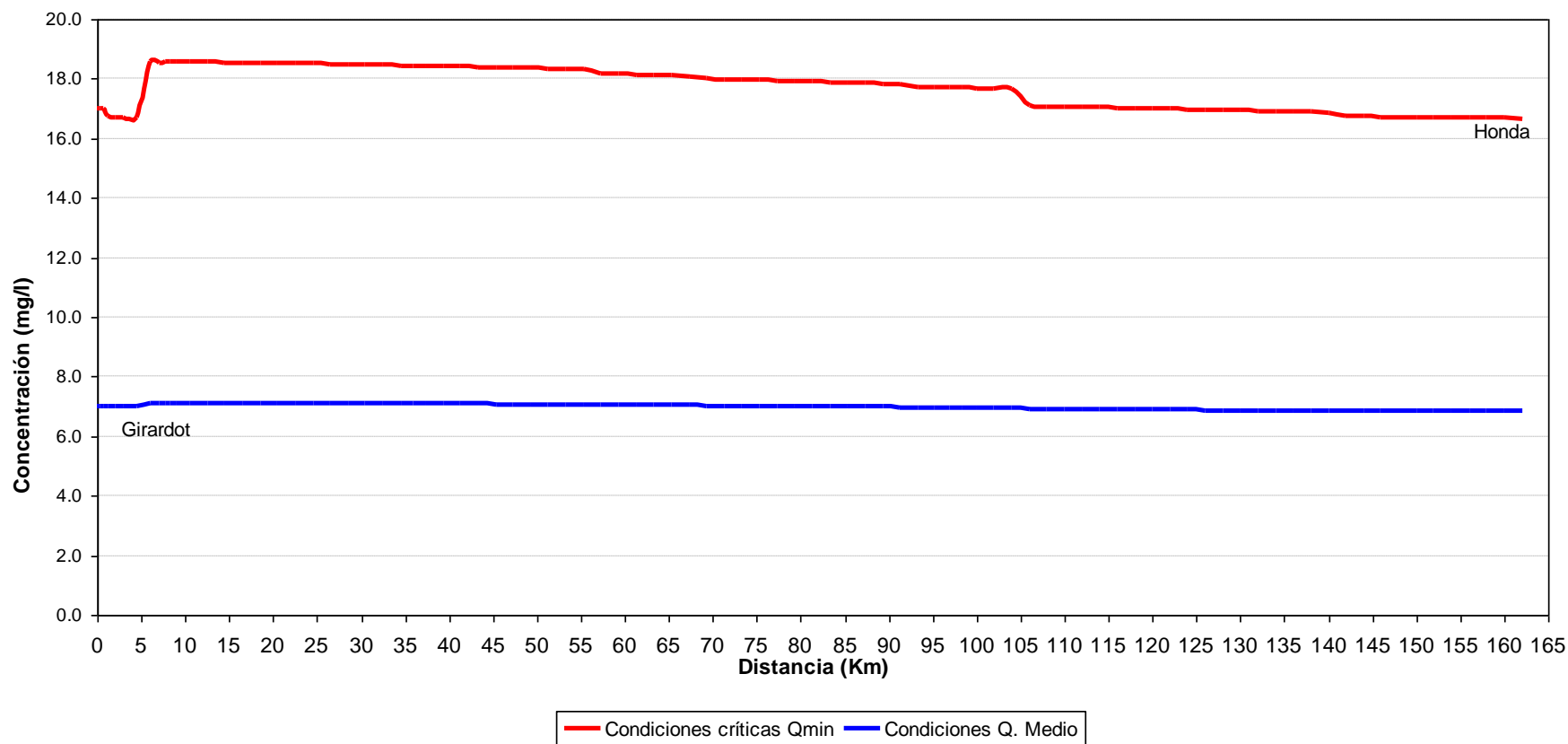


Río Magdalena Girardot – Honda condiciones actuales

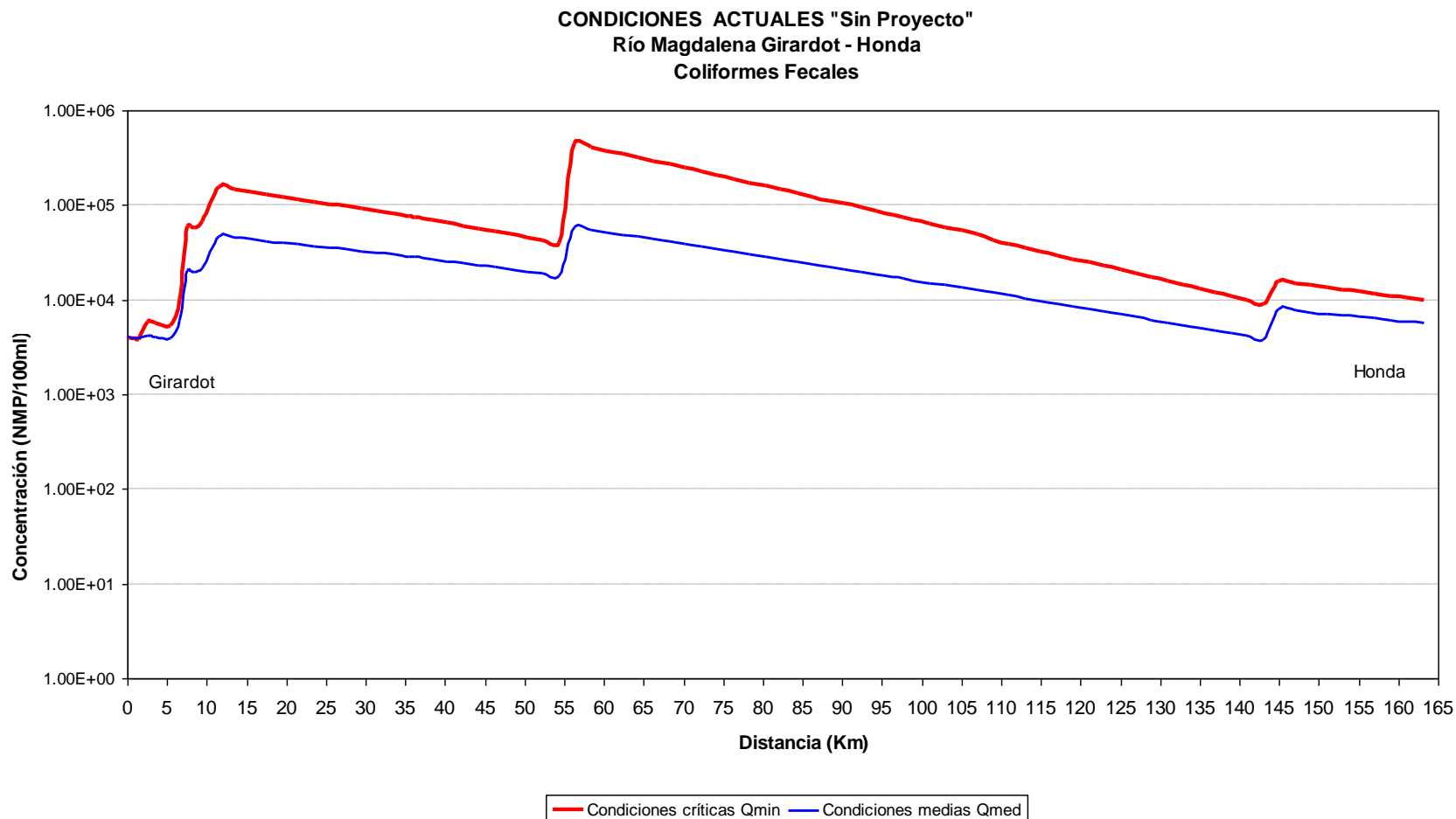


Río Magdalena Girardot – Honda condiciones actuales

CONDICIONES ACTUALES "Sin Proyecto" Río Magdalena Girardot - Honda DBO



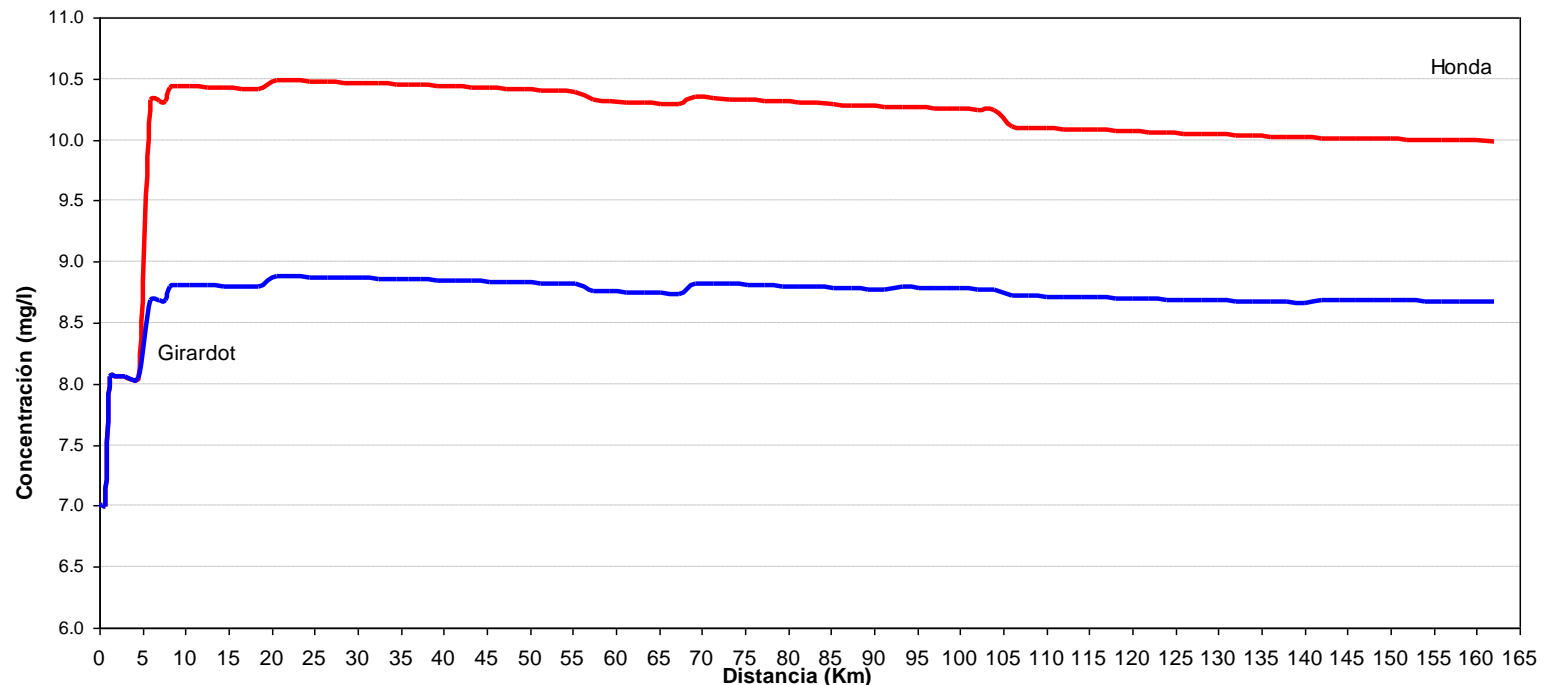
Río Magdalena Girardot – Honda condiciones actuales



Conclusiones Río Magdalena

Los resultados de modelación muestran que la mejora de la calidad del agua del Río Bogotá resulta en una mejora apreciable de la calidad del agua del Río Magdalena.

CONDICIONES CRITICAS 2016 - Escenario 4 "Saneamiento Río Bogotá"
Río Magdalena Girardot - Honda
DBO



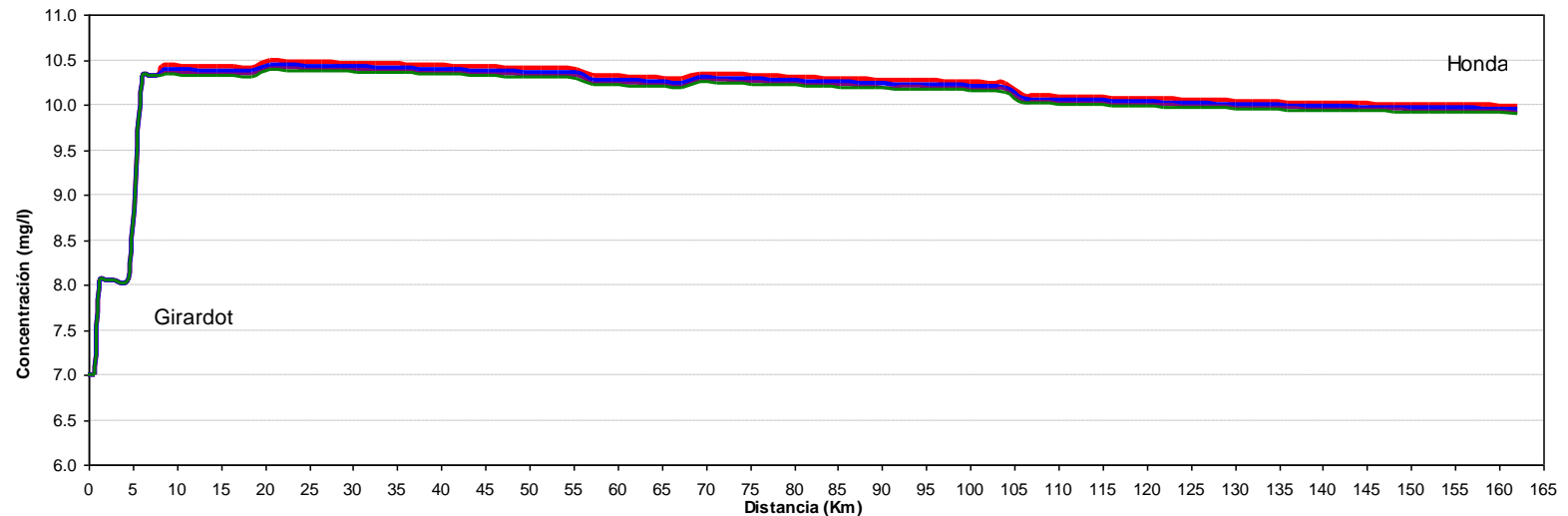
— Condiciones críticas - 2015 - "Interceptor Sin Tratamiento"

— Condiciones Críticas 2016 - "Con Saneamiento Río Bogotá"

Conclusiones Río Magdalena

La calidad del agua resultante en el Río Magdalena es literalmente idéntica para niveles de tratamiento primario, secundario o terciario, del efluente de la ciudad de Girardot.

CONDICIONES CRITICAS 2015 "Alternativas de Tratamiento en Girardot" Río Magdalena Girardot - Honda DBO



- Condiciones críticas - 2015 - "Con Interceptor Sin Tratamiento"
- Condiciones Críticas 2015 - "Tanque de sedimentación primaria"
- Condiciones Críticas 2015 - "Laguna Facultativa"
- Condiciones Críticas 2015 - "Lodos Activados aerobios"

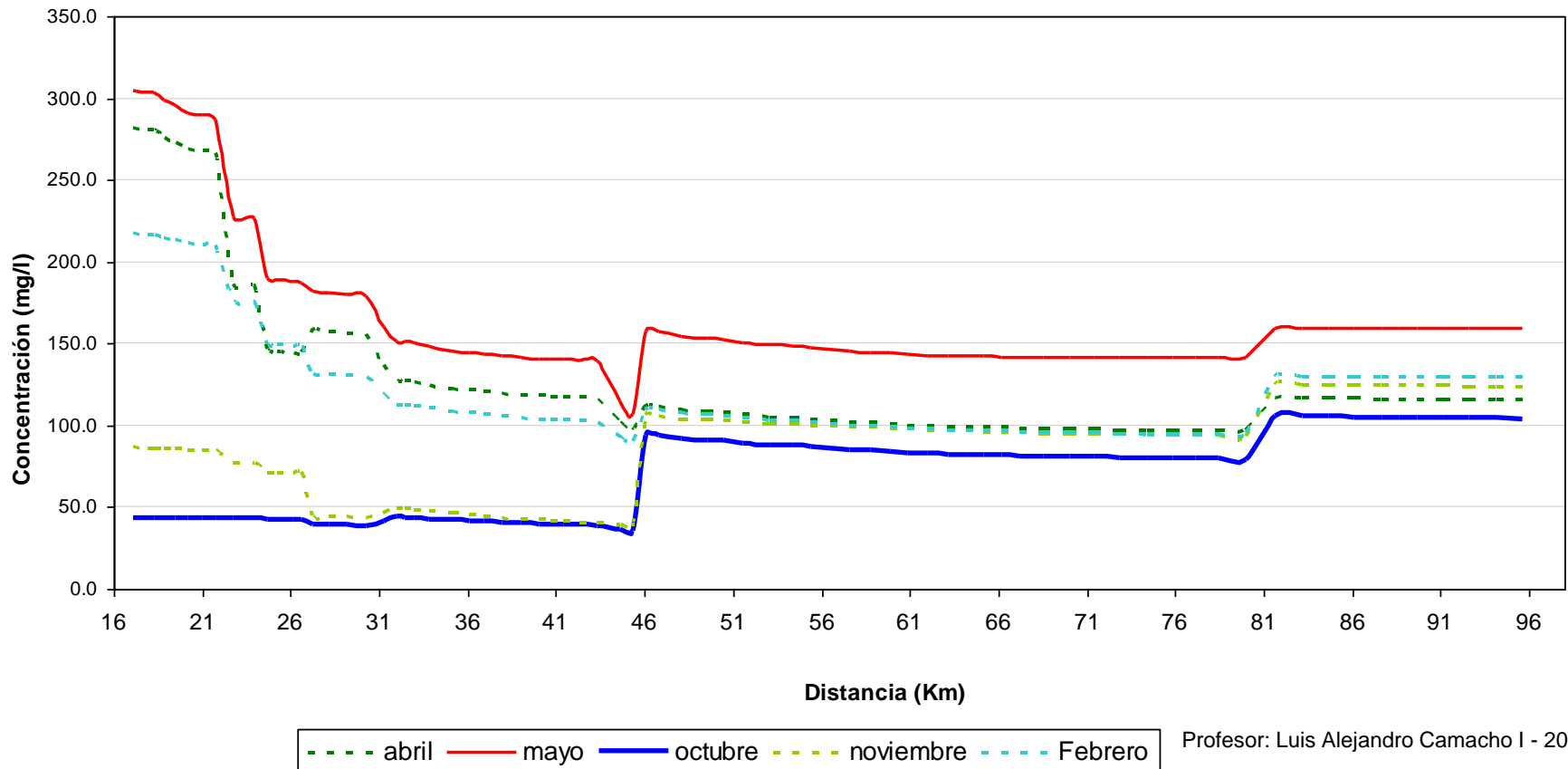
RIO VIRILLA GRANDE DE TARCOLES

2005 “SIN PROYECTO” - SST

CONDICIONES ACTUALES - AÑO TIPICO-2005
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
SST

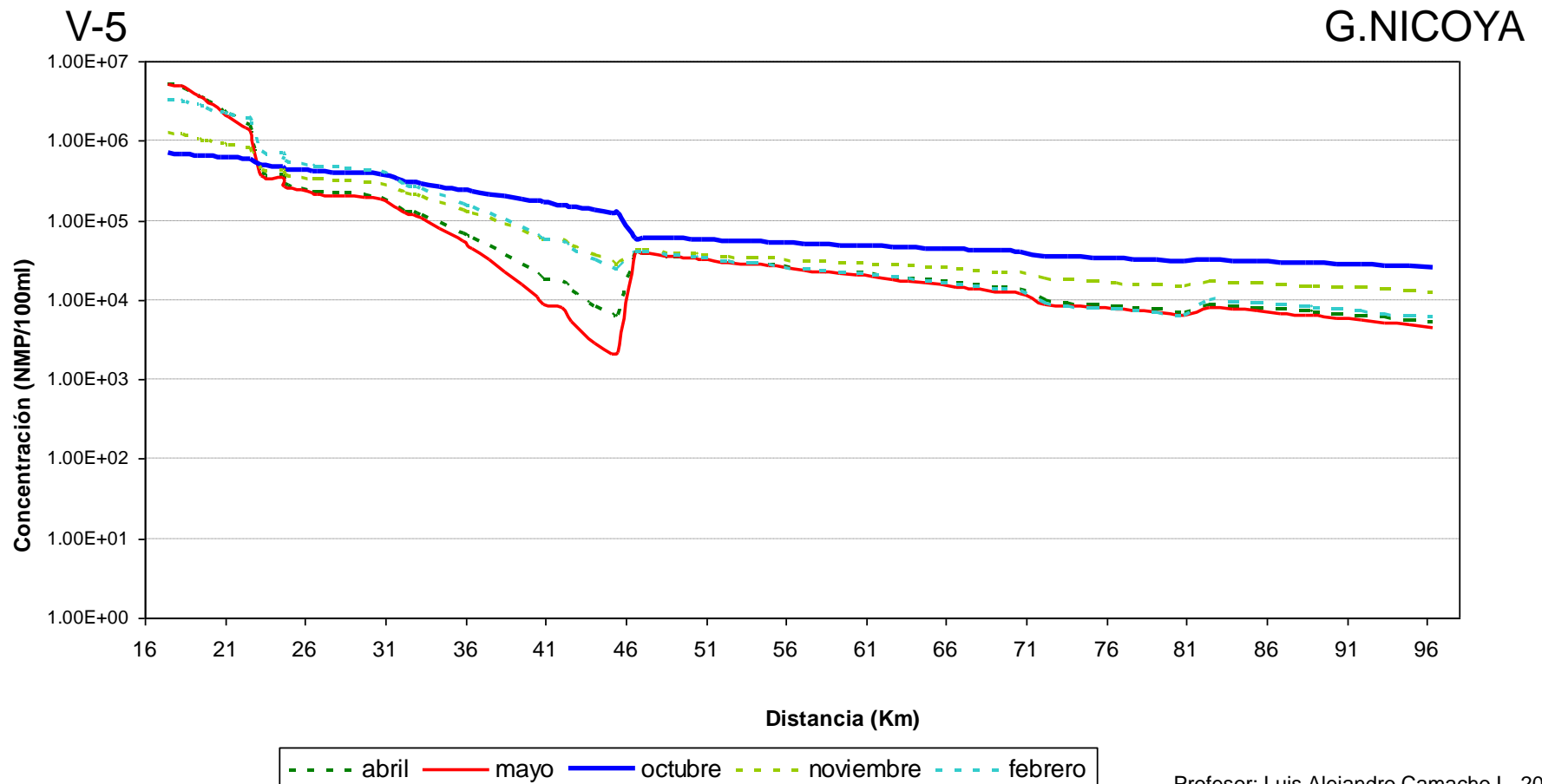
V-5

G.NICOYA



2005 “SIN PROYECTO” – Coliformes Fecales

CONDICIONES ACTUALES - AÑO TÍPICO-2005
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
Coliformes Fecales



SIMULACIONES DE ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO – SAN JOSÉ CR

- **MICROTAMICES 075 mm, 02 mm, 02 mm
Polyelectrolito**
- **TANQUE SEDIMENTACIÓN PRIMARIA (TSP)**
- **UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB)**
- **LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS
ANAERÓBICA (LERan)**
- **LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS
FACULTATIVA (LERfac)**
- **FILTRO DE GOTEIO (FG, TRICKLING FILTER)**
- **LODOS ACTIVADOS AERÓBICOS (LAA)**

TRATAMIENTO PRELIMINAR

Esquema	MT075	MT02	MTP02
Eficiencia Remoción de DBO	10%	20%	50%
Eficiencia Remoción de nutrientes (N, P)	-	-	-
Remoción de coliformes	25-75%	25-75%	25-75%
Remoción de SST	20%	30%	50%
Tiempo de retención hidráulico típico	1-2h	Ca. 6h	>1D
Molestia de olores	+	+	+
Requerimiento de tierra	++	++	++
Requerimiento de operadores expertos	++	++	++
Costo de inversión	++	++	++

(Evaluación de acuerdo a ++...excelente, +...positivo, - ... negativo)

1. Militamices de apertura 0.75 mm
2. Militamices de apertura 0.2 mm
3. Militamices de apertura 0.2 mm, con polyelectrolitos

TRATAMIENTO 1ario Y 2ario

Condiciones ambientales	TSP	UASB	LER		FG	LAA
Condiciones ambientales	Anaerobias	Anaerobias	Anaerobias	Facultativa	Aerobias	Aerobias
Eficiencia Remoción de DBO	30-40%	>70%	>50%	>70%	80-90%	>90%
Eficiencia Remoción de nutrientes (N, P)	-	-	-	-	+(++)	+(++)
Remoción de coliformes	25-75%	90%	90%	90-99%	90-95%	90-98%
Tiempo de retención hidráulico típico	1-2h	Ca. 6h	>1D	>4D	Ca. 6h	Ca. 15h
Molestia de olores	+	++	+	+	++	++
Requerimiento de tierra	++	++	+	-	+	+
Requerimiento de operadores expertos	++	+/-	++	++	+	-
Costo de inversión	++	++	++	+	+	-

1. TSP: Tanque de sedimentación primario 2. UASB: upflow anaerobic sludge blanket 3. LER: Laguna de estabilización de residuos, 4. FG: filtro de goteo (Trickling filter) 5. LAA: Lodos activados aeróbicos

TRATAMIENTOS PRELIMINARES Y 1ario

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO PRELIMAR TAMICES

CONDICION CRITICA - MAYO 2025

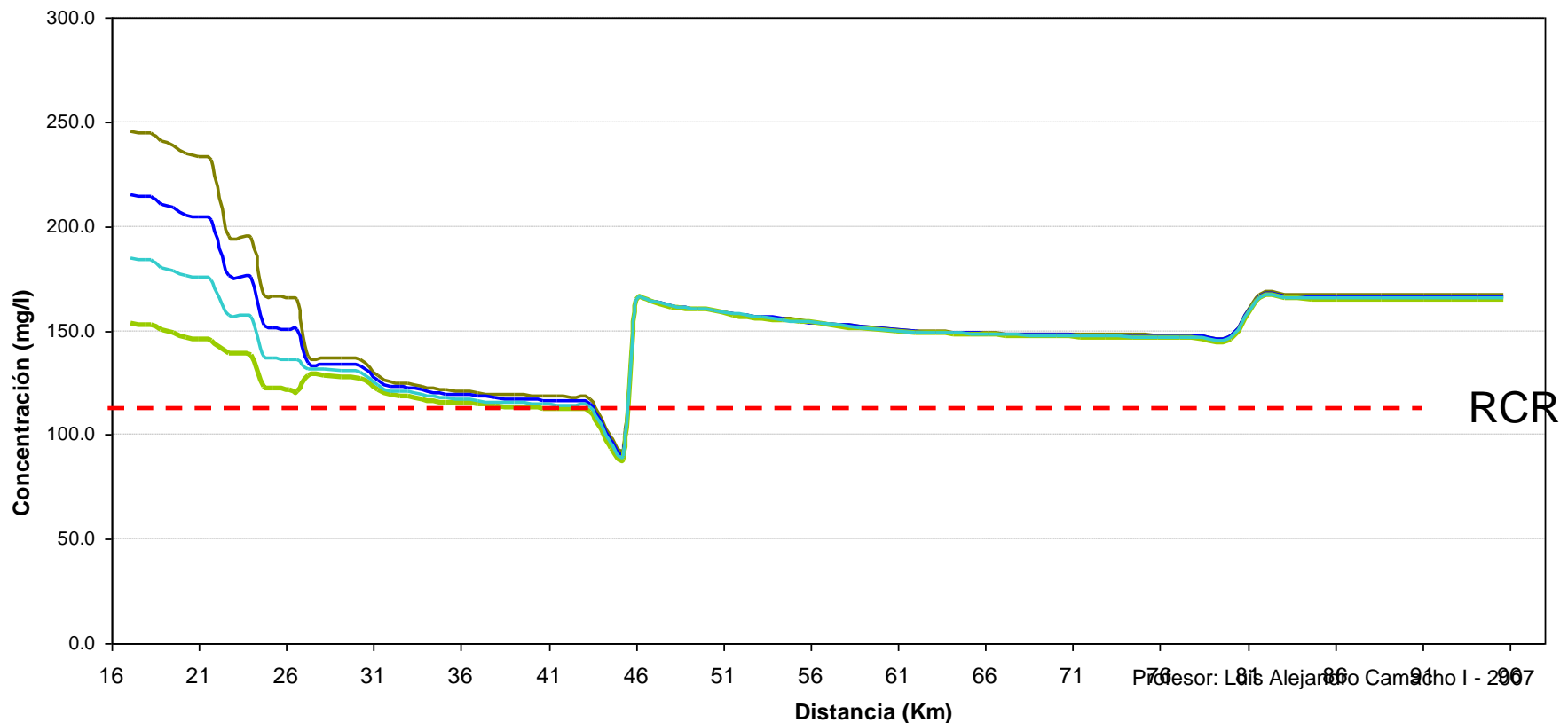
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

SST

SST

G.NICOYA

V-5



MT 075 mm

MT 02 mm

MT 02 mm Polyelectrolito

Tanque de sedimentación primaria

Proesor: Luis Alejandro Camacho I - 2007

TRATAMIENTOS PRELIMINARES Y 1ario

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO PRELIMINAR TAMICES

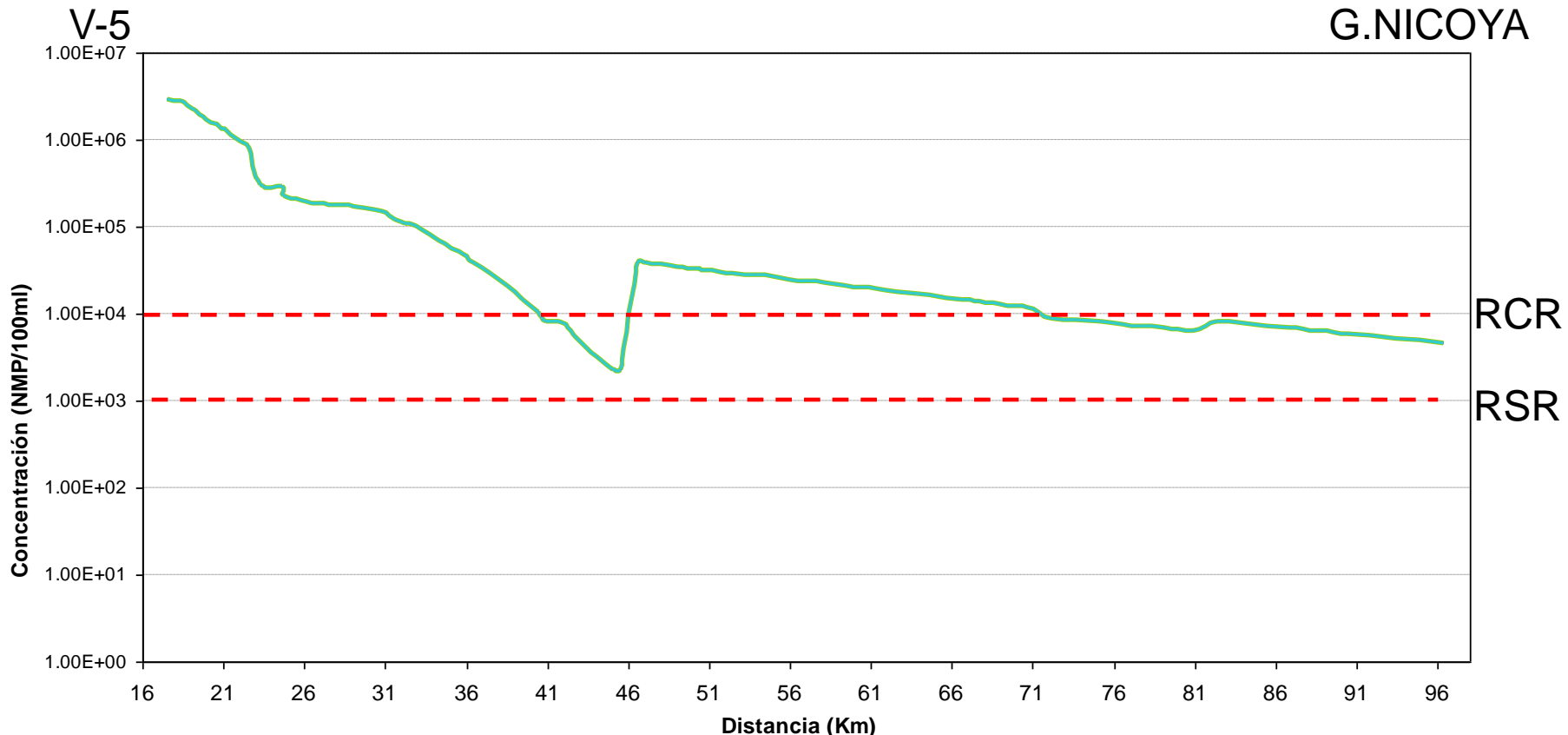
CONDICION CRITICA - MAYO 2025

Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

Coliformes Fecales

CF

G.NICOYA

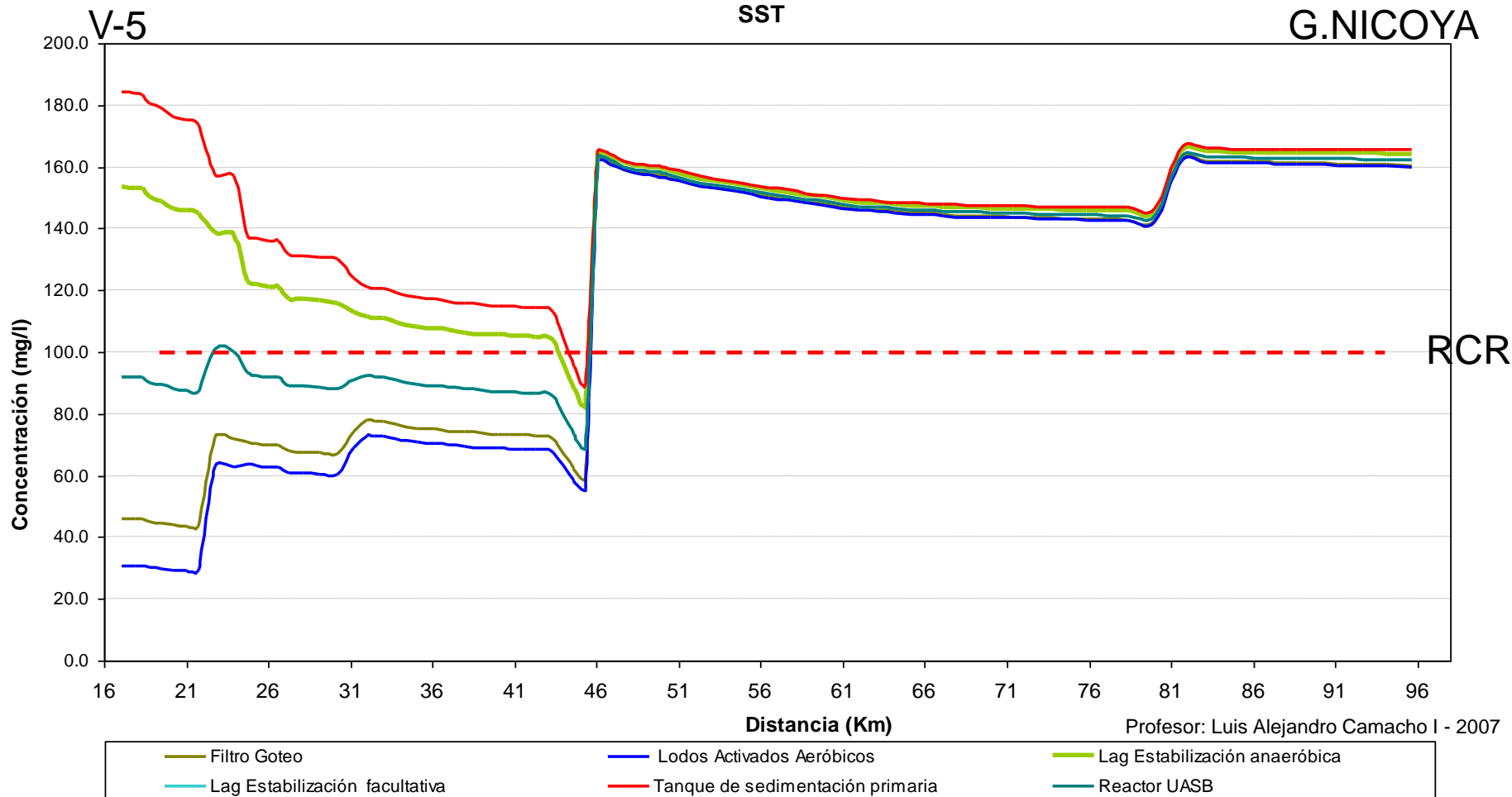


TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
SST

SST

G.NICOYA

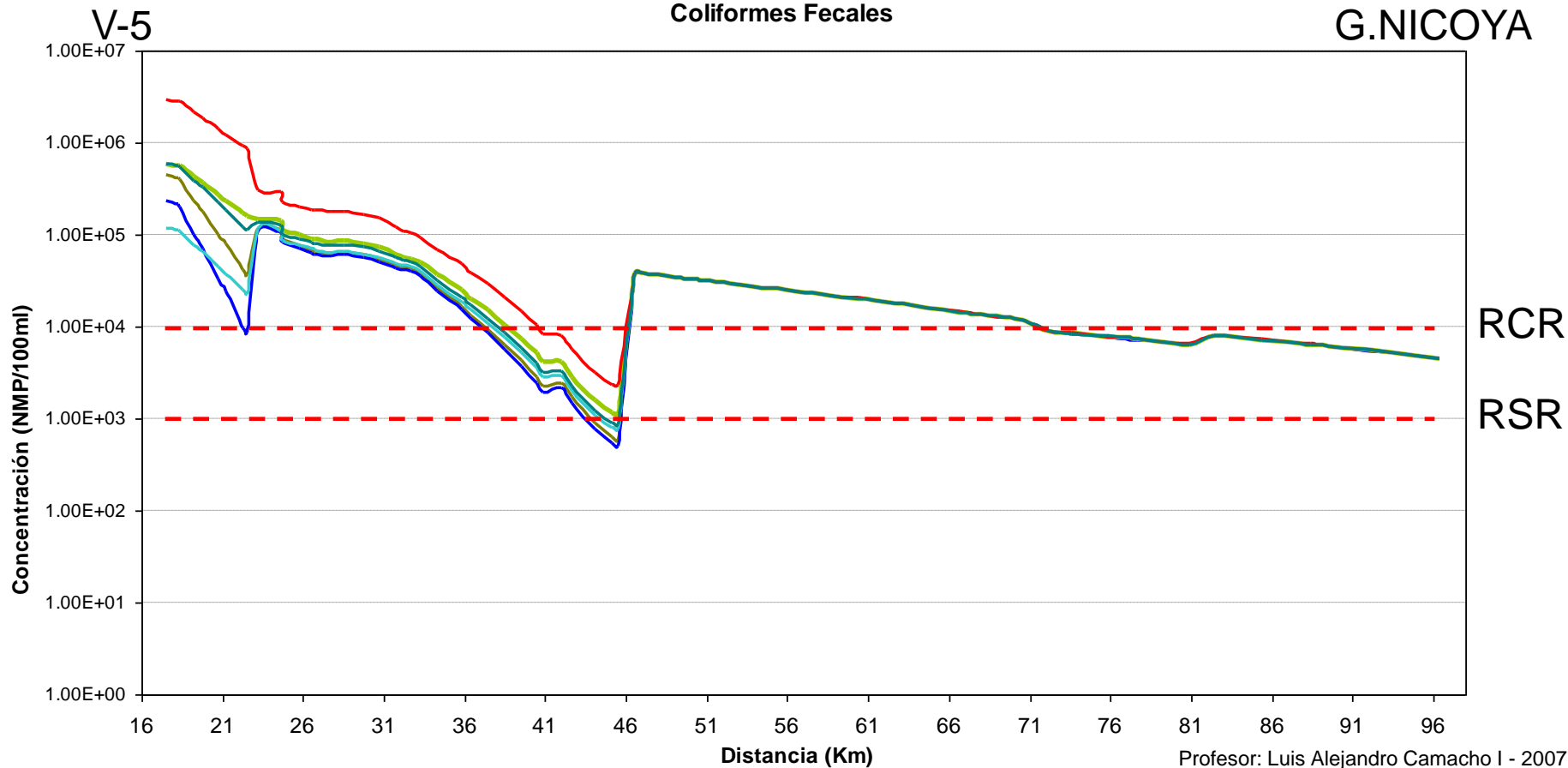


TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
Coliformes Fecales

CF

G.NICOYA



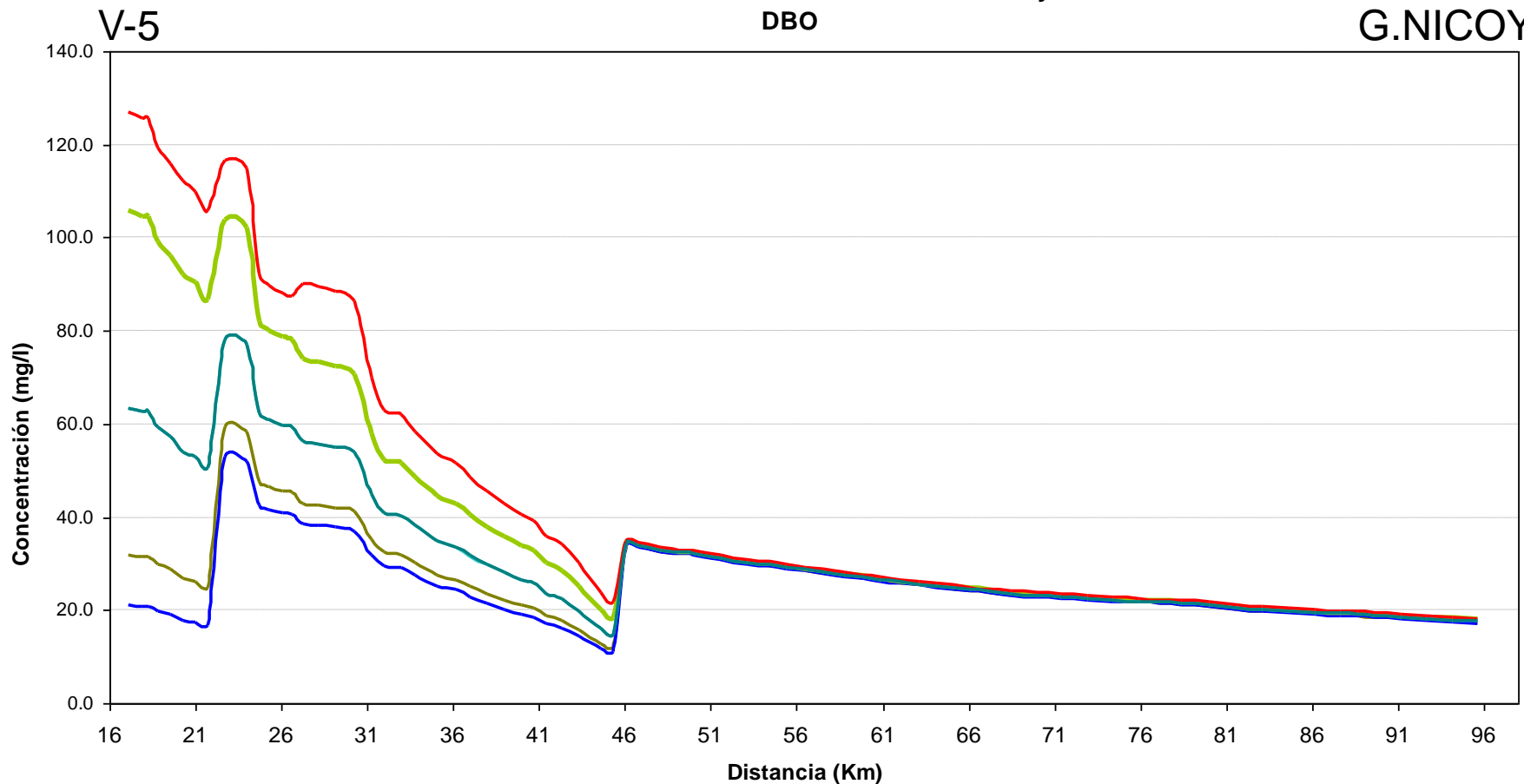
Filtro Goteo Lodos activados aerobicos Lag Estabilización Anaeróbica
Lag Estabilización Facultativa Tanque de sedimentación primaria UASB

TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

DBO

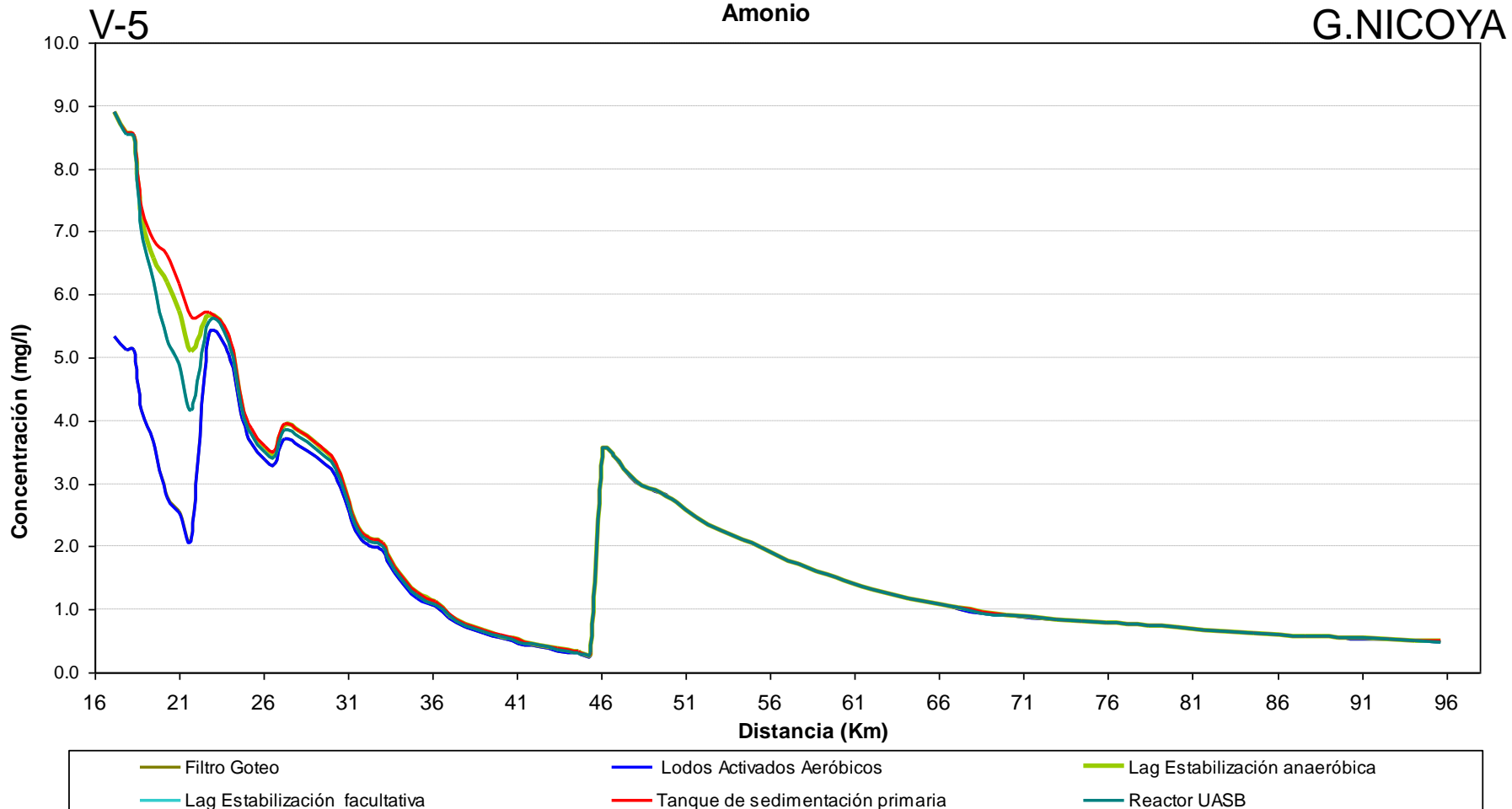
G.NICOYA



TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
Amonio

NH_4

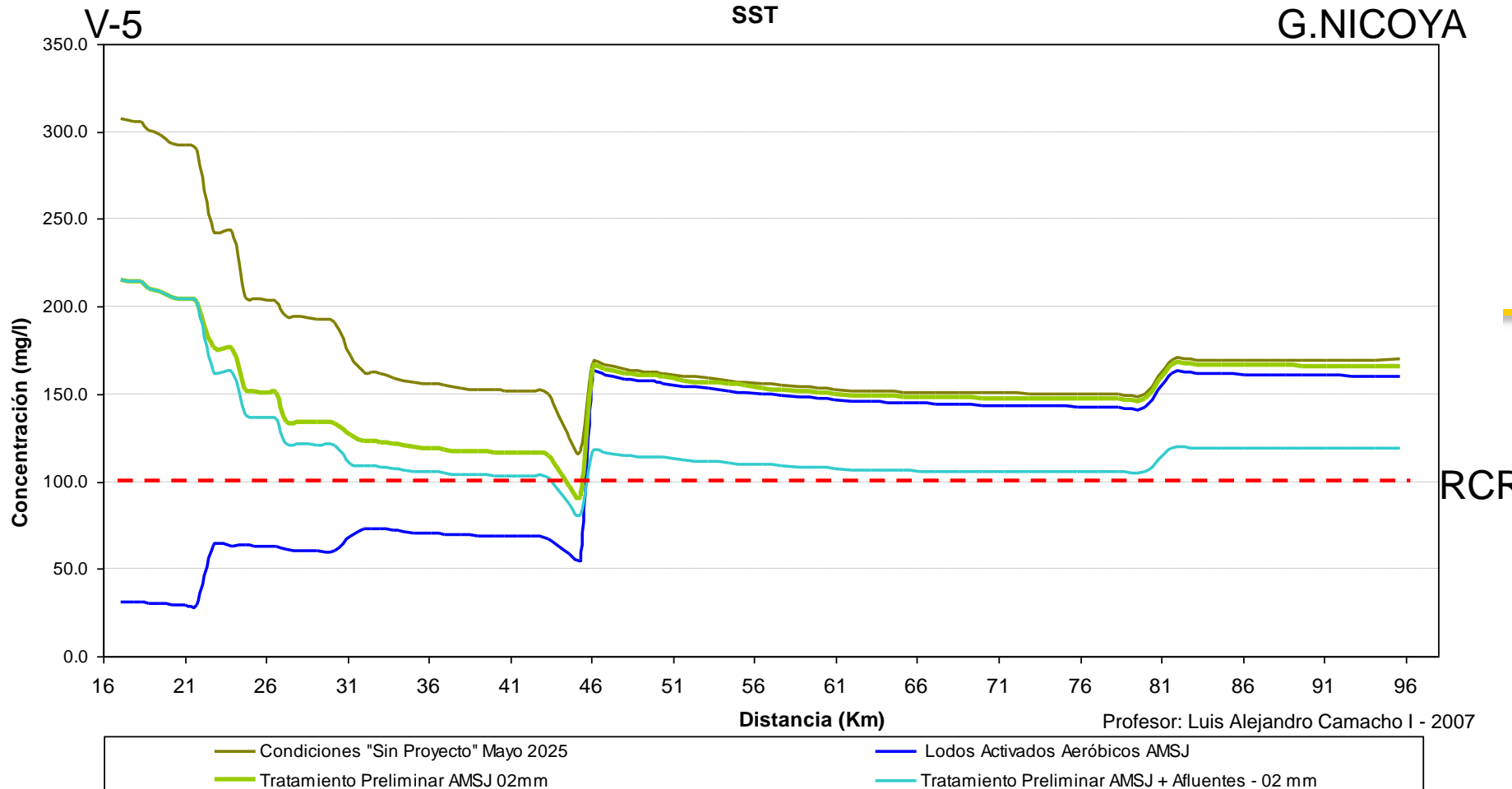


TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

SST

G.NICOYA

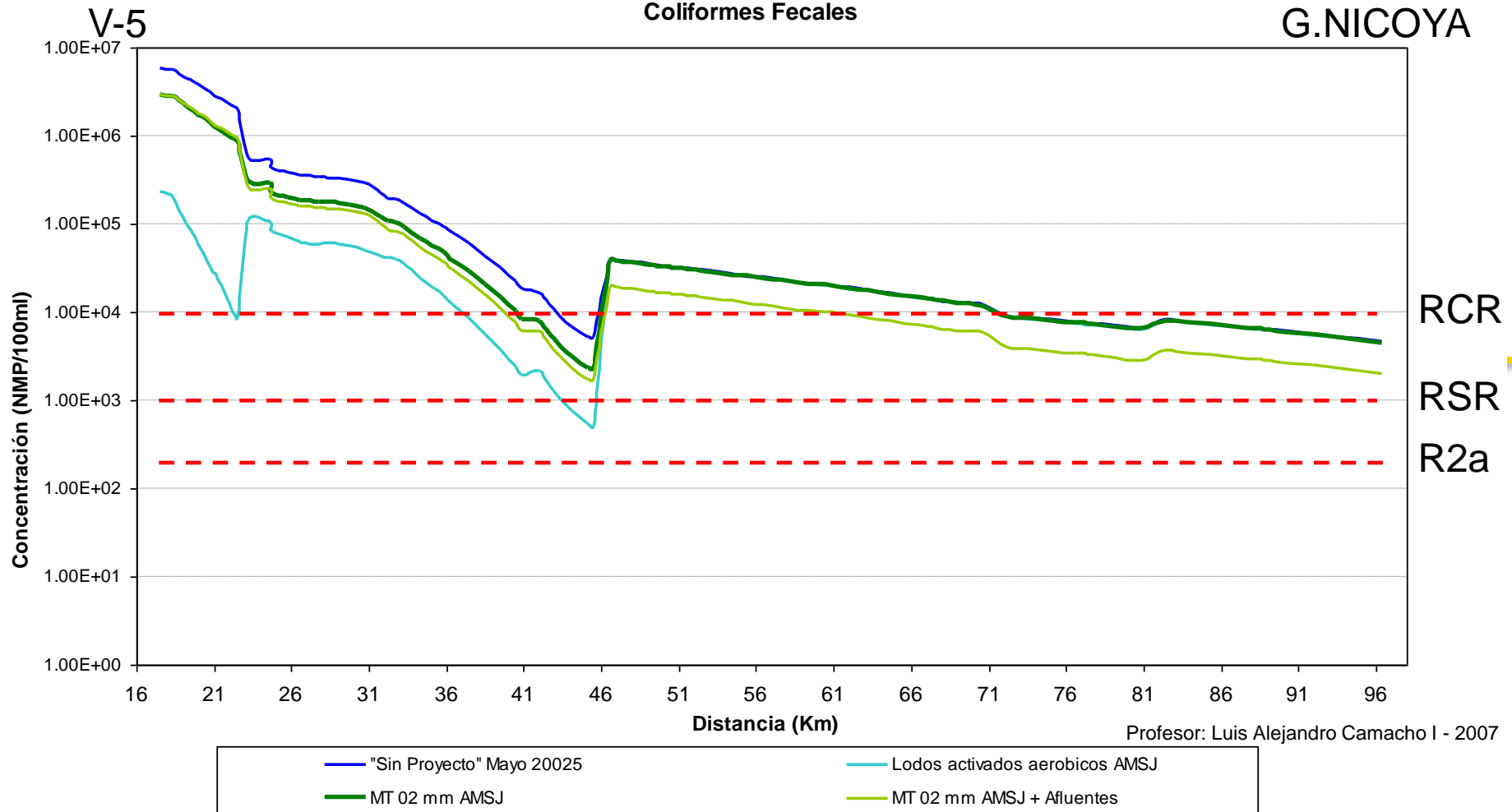


TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
Coliformes Fecales

CF

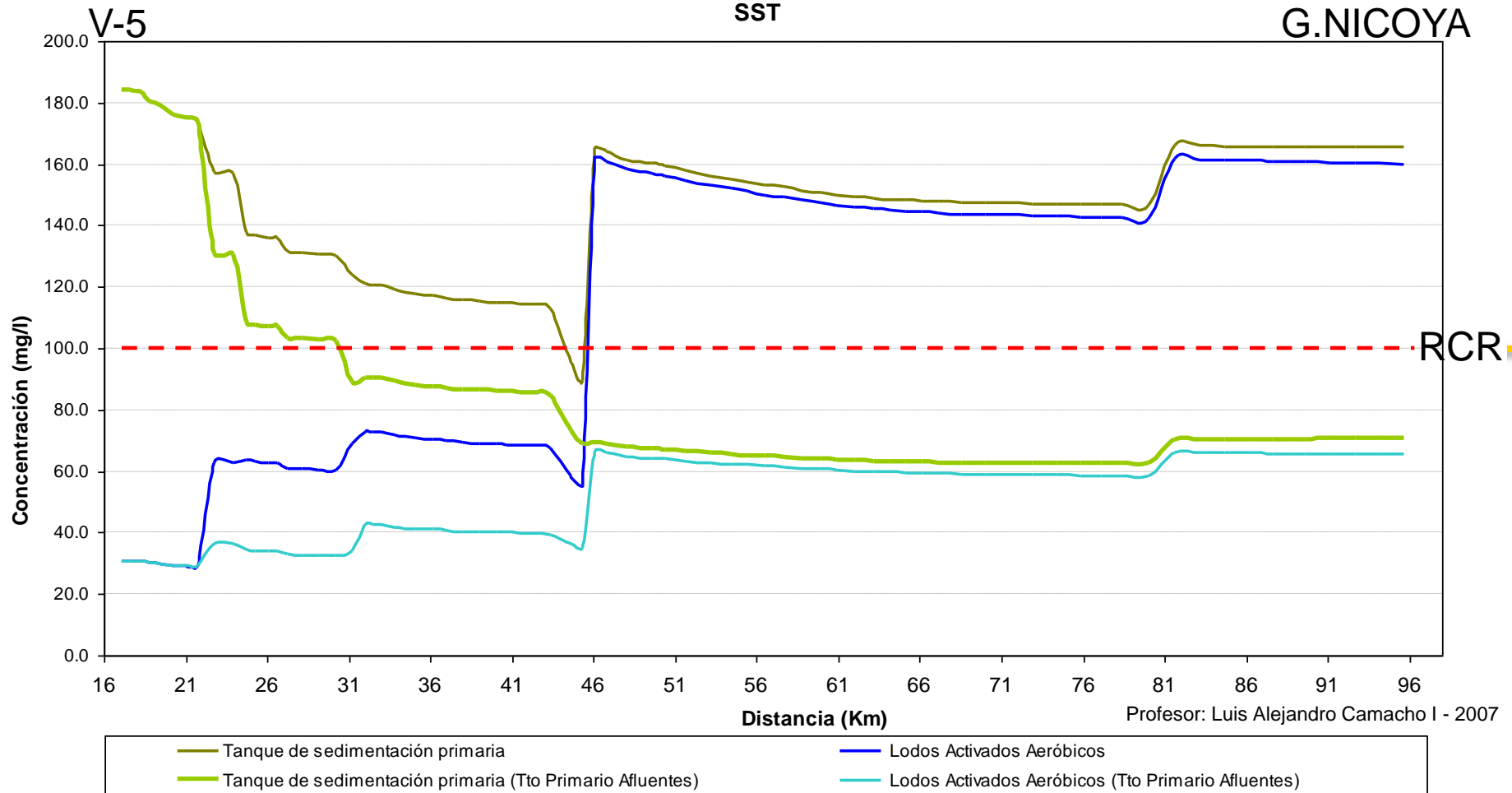
G.NICOYA



TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcos- V5-Golfo Nicoya

SST

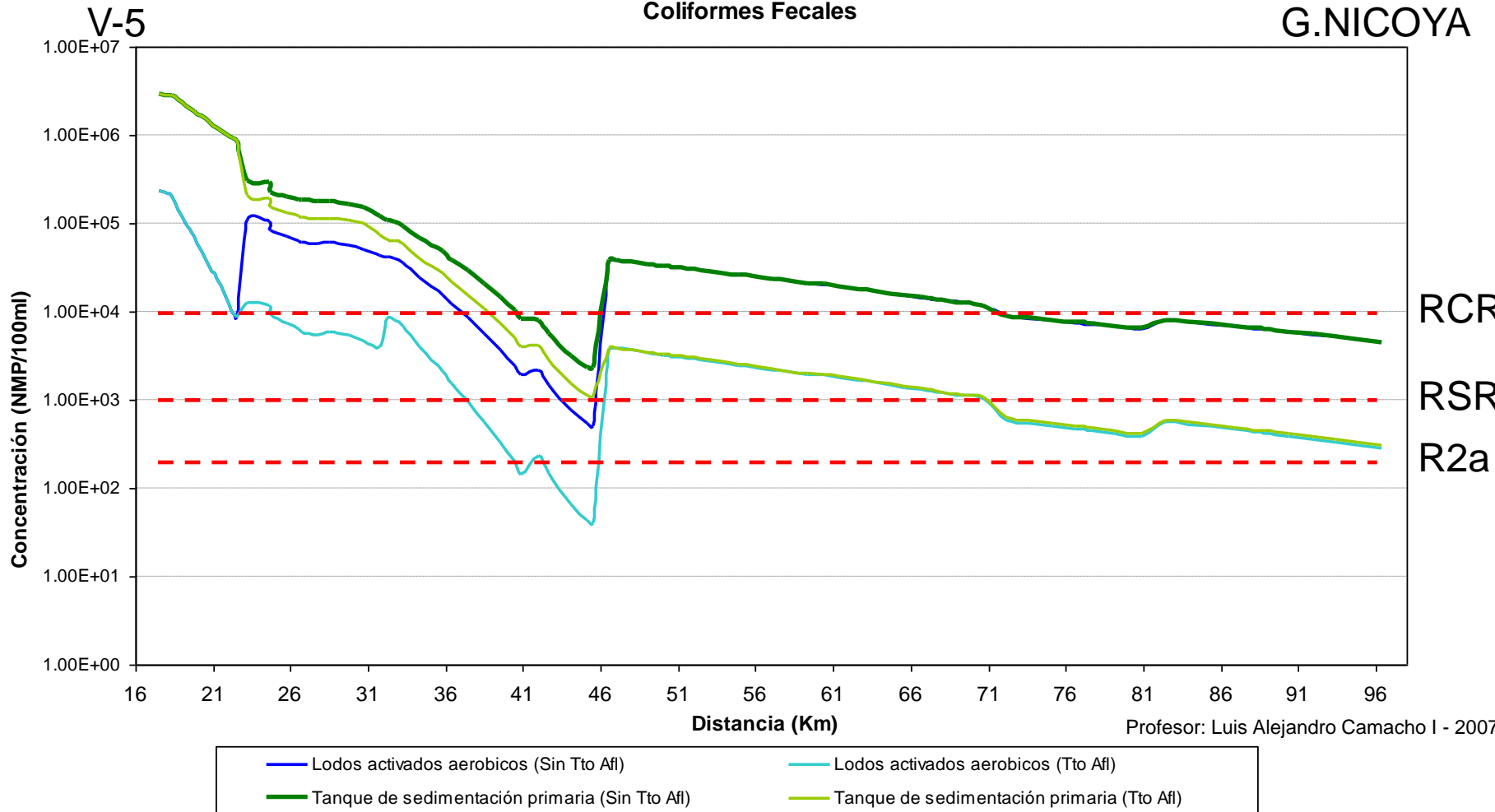


TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO
CONDICION CRITICA - MAYO 2025
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya
Coliformes Fecales

CF

G.NICOYA



Conclusión

Los modelos de **transporte** de contaminantes y de **calidad** del agua permiten **dimensionar y diseñar** soluciones estructurales (e.g. plantas de tratamiento) y no estructurales (e.g. tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento.

Los modelos permiten determinar **la capacidad asimilativa** (i.e. dilución, dispersión, reacción) **de sustancias biodegradables o acumulativas**

Los modelos permiten **priorizar** la toma de decisiones



Colorario

Sin embargo, se requiere una aplicación ***cuidadosa, honesta y responsable*** de estas herramientas.

¿Cuál debe ser la metodología para la obtención de un modelo ***predictivo*** de calidad del agua?



3. Pregunta de investigación

Cómo se implementa un modelo **predictivo** hidráulico de calidad del agua en ríos?



Metodología propuesta como resultado
de estudios integrales de saneamiento:

Casos Río Bogotá, Río Magdalena, Río
Virilla-Grande de Tárcoles
(Uniandes)

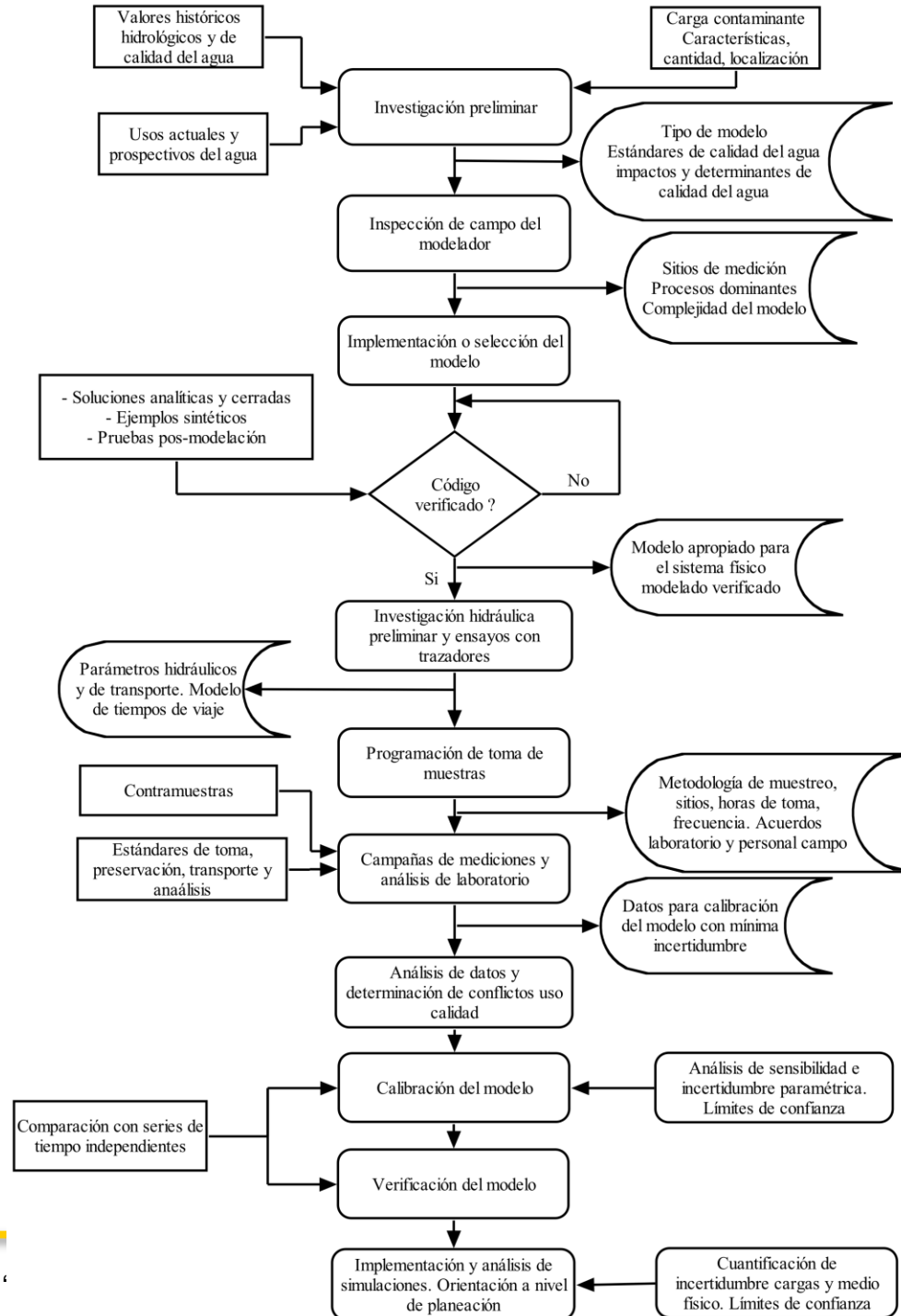
Río Teusacá, Canal del Dique, Mojana
(Unal)



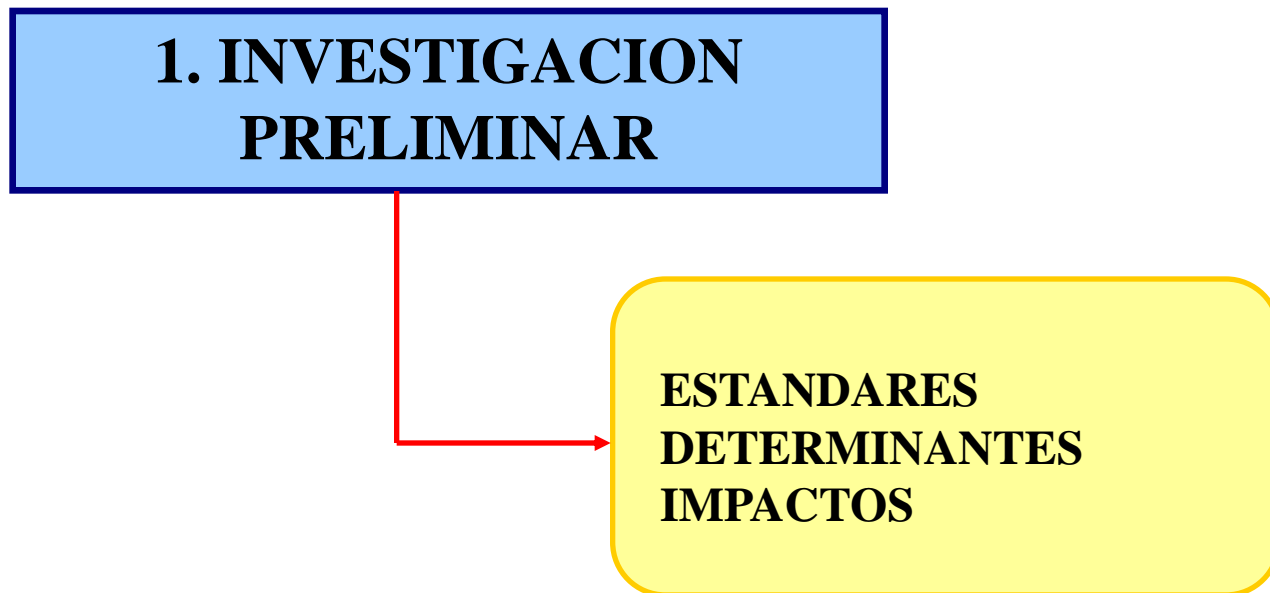
Metodología

Aplicación rigurosa de un Marco o Protocolo de Modelación de calidad del agua en ríos

Camacho y Díaz-Granados (2003)



METODOLOGIA PROPUESTA



INVESTIGACION PRELIMINAR

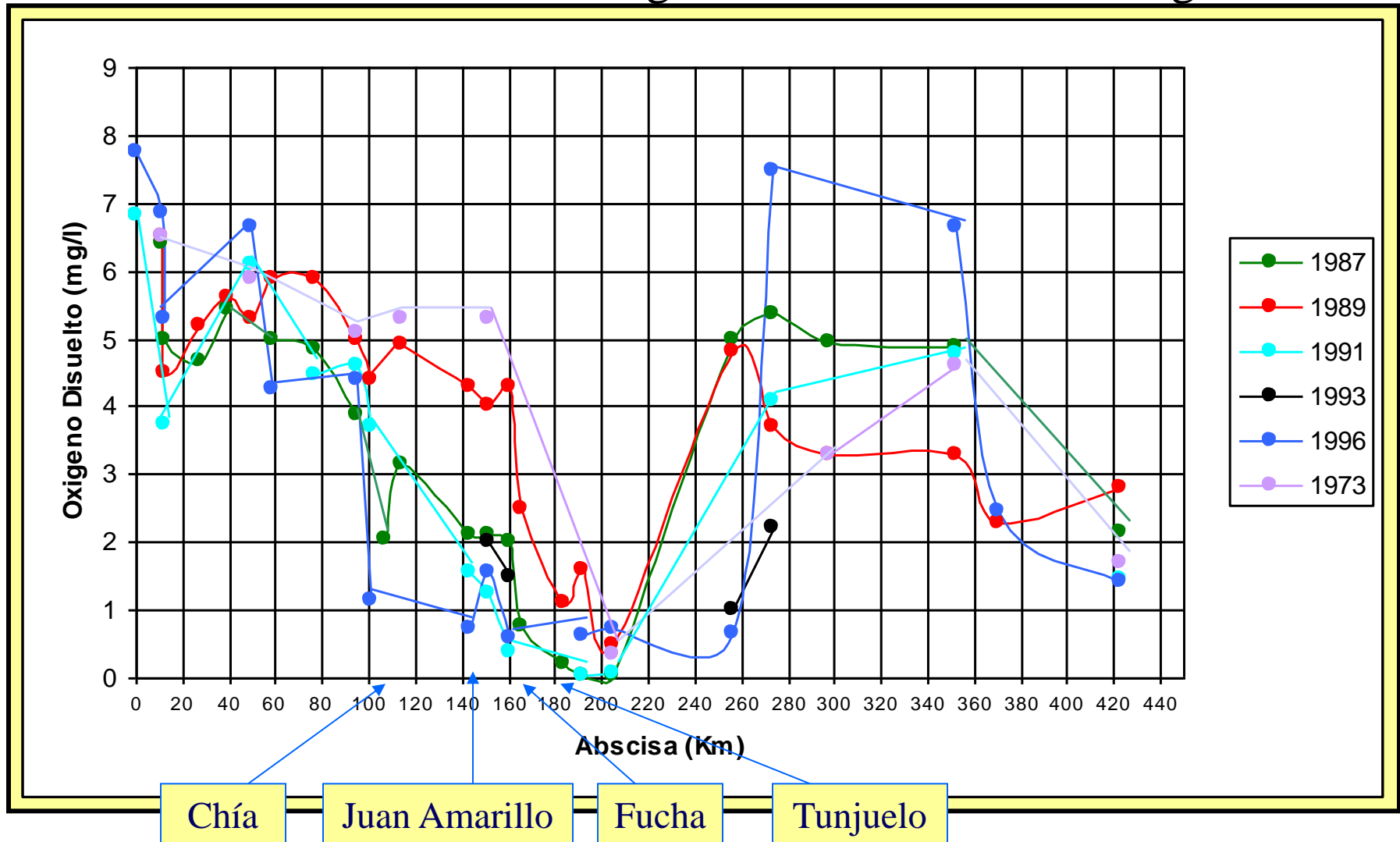
USOS ACTUALES Y PROSPECTIVOS DEL AGUA

Escenario Prospectivo Actividad Socioeconómica

Cuenca Alta		Cuenca Media		Cuenca Baja	
Hoy	Escenario más probable	Hoy	Escenario más probable	Hoy	Escenario más probable
Agroindustria	Urbanización	Urbanización	Urbanización	Agricultura Tradicional	Urbanización
Industria	Industria	Agroindustria (flores)	Industria	Urbanización	Turismo y recreación
Urbanización	Agroindustria	Industria	Agroindustria	Energía	Transporte
Agricultura Comercial	Agricultura Comercial	Transporte	Agricultura Comercial	Turismo y recreación	Energía
Explotación Forestal	Comercio	Agricultura Comercial	Ganadería esp. mayores	Ganadería esp. menores	Agricultura tradicional
Explotación Minera	Transporte	Explotación Minera	Ganadería esp. menores	Ganadería esp. mayores	Ganadería esp. mayores
		Energía (Muña)	Transporte	Transporte	Ganadería esp. menores

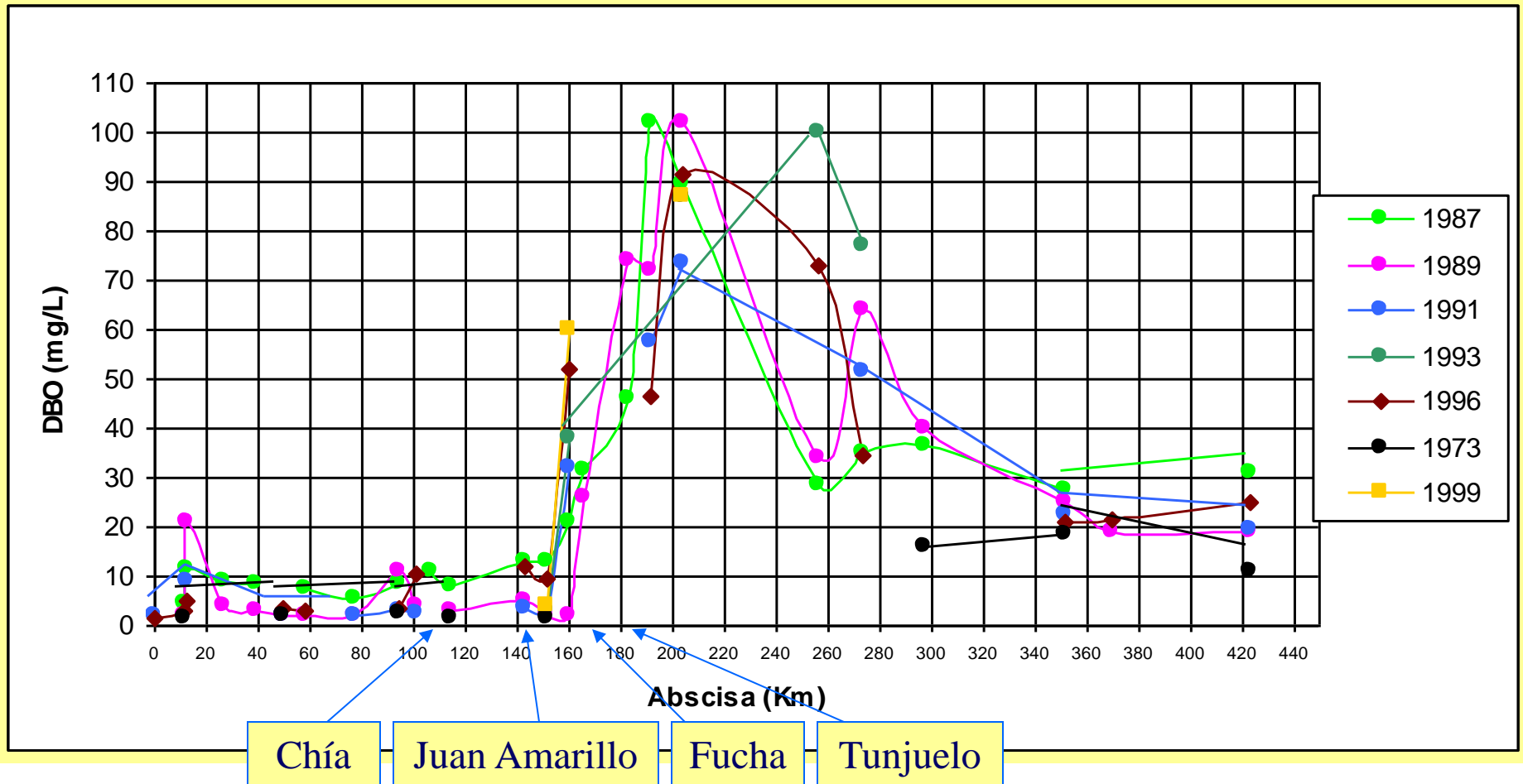
DATOS HISTÓRICOS

Variación Histórica del Oxígeno Disuelto en el río Bogotá



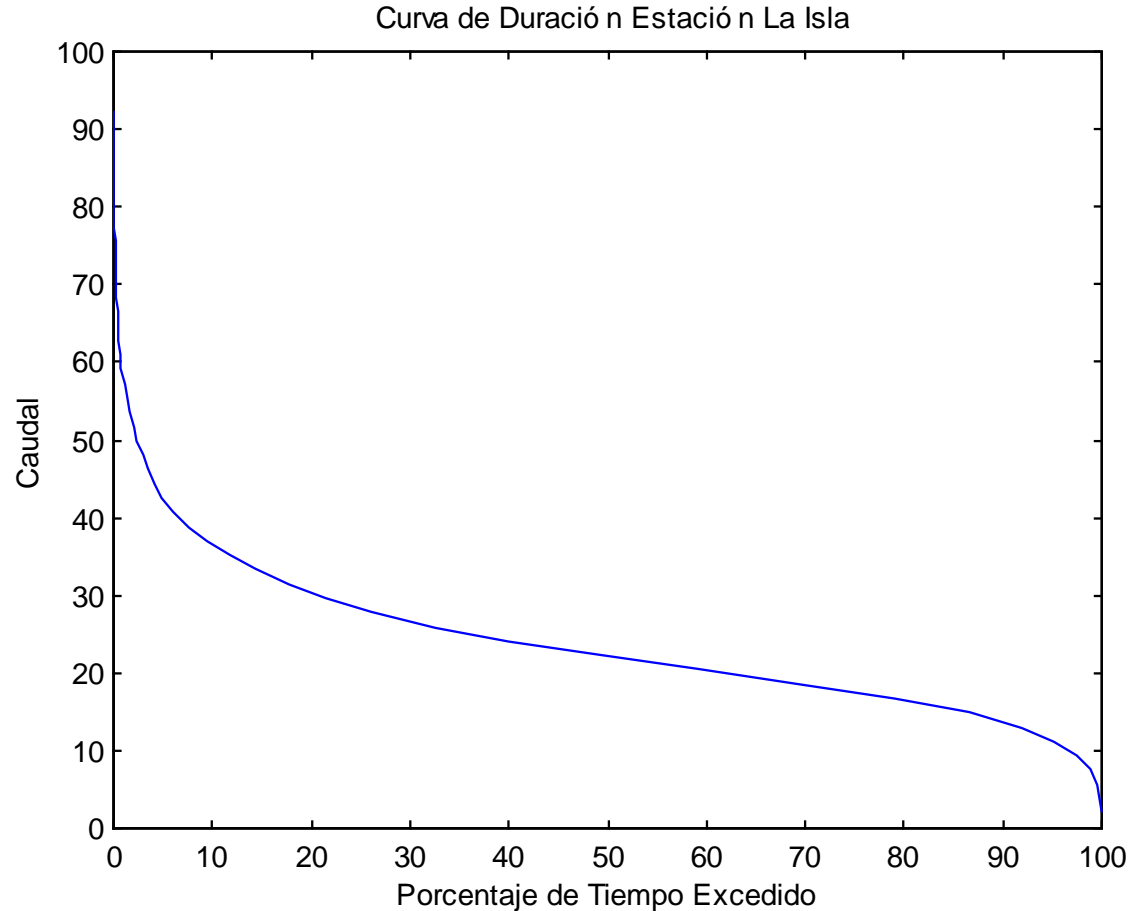
DATOS HISTÓRICOS

Variación Histórica de DBO en el río Bogotá

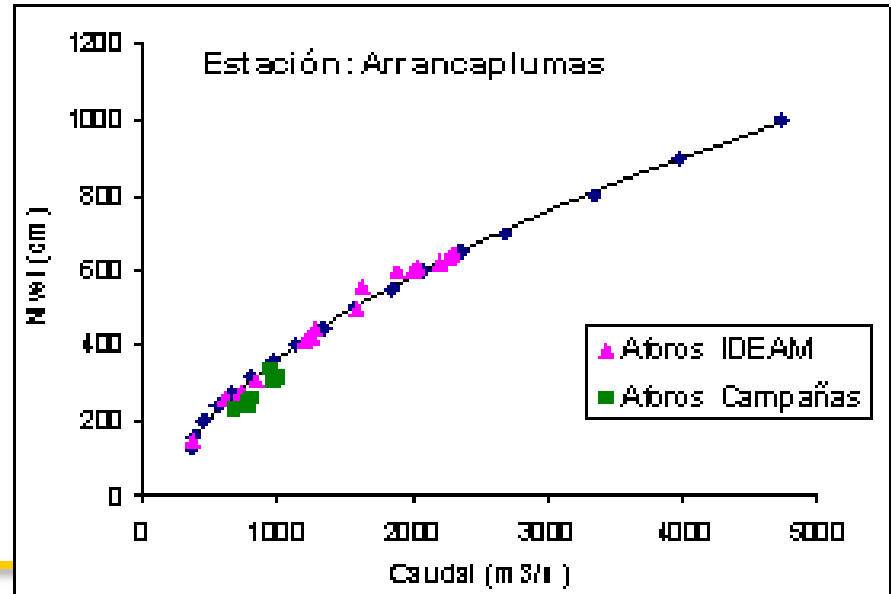
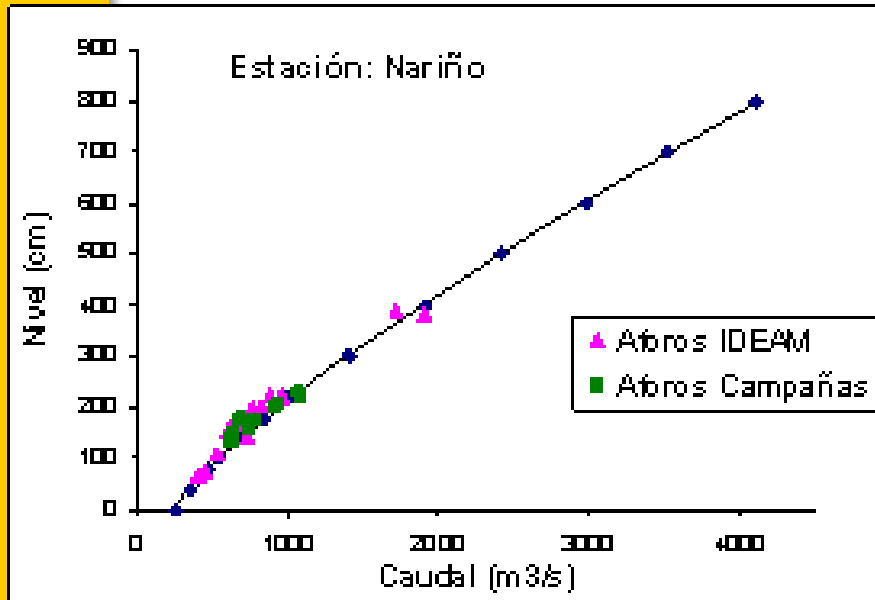


INVESTIGACION PRELIMINAR INFORMACIÓN SECUNDARIA

CURVA DE DURACION CAUDALES



Estudios hidrológicos



Curvas de calibración nivel caudal

Nariño:	$Q = 237.4778 + 1.0075449N^{1.2350386}$	$R^2 = 0.99986$
Arrancaplumas:	$Q = (10.112315 + 0.058945959N)^2$	$R^2 = 0.99938$

Estudios hidrológicos

Tabla 11 - Resultados de análisis de frecuencia estación Nariño
a. Caudales mínimos semanales

Periodo de retorno	Probabilidad de no excedencia	Caudal (m ³ /s)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)	
50	0,98	432	69,4	678	950
25	0,96	479	55,6	659	877
10	0,9	531	40,6	621	780
5	0,8	553	32,8	575	704
3	0,6667	585	29,3	528	643
2,33	0,5708	640	28,3	498	609
2,00	0,5	700	27,7	477	586
1,50	0,3333	768	27,1	426	532
1,25	0,2	814	27,6	378	486

Análisis de frecuencias series anuales, caudales mínimos diarios, mínimos semanales, máximos diarios

Estudios hidrológicos

b. Caudales mínimos diarios

Periodo de retorno	Probabilidad de no excedencia	Caudal (m ³ /s)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)	
50	0,02	263	40,2	184	342
25	0,04	290	33,7	224	356
10	0,1	333	26,9	280	386
5	0,2	376	24,1	328	423
3	0,3333	417	23,7	371	464
2,33	0,4292	443	23,9	397	490
2	0,5	462	24,3	415	510
1,50	0,6667	510	25,7	460	560
1,25	0,8	557	28,7	501	614

c. Caudales máximos diarios

Periodo de retorno	Probabilidad de No excedencia	Caudal (m ³ /s)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)	
100	0,99	5670	708	4280	7060
50	0,98	5350	554	4260	6430
25	0,96	5010	419	4190	5830
10	0,90	4530	281	3980	5080
5	0,80	4130	216	3700	4550
3	0,66670	3780	190	3410	4150
2,33	0,57080	3580	180	3230	3930
2	0,50	3450	173	3110	3790
1,5	0,333	3150	158	2840	3460

METODOLOGIA PROPUESTA

2. INSPECCIÓN DE CAMPO

```
graph TD; A[2. INSPECCIÓN DE CAMPO] --> B[SITIOS DE MEDICIÓN  
PROCESOS  
DOMINANTES];
```

**SITIOS DE MEDICIÓN
PROCESOS
DOMINANTES**



COMPLEJIDADES

Cuenca media

Entender apropiadamente
condiciones anaerobias e
interacciones columna agua
– sedimento

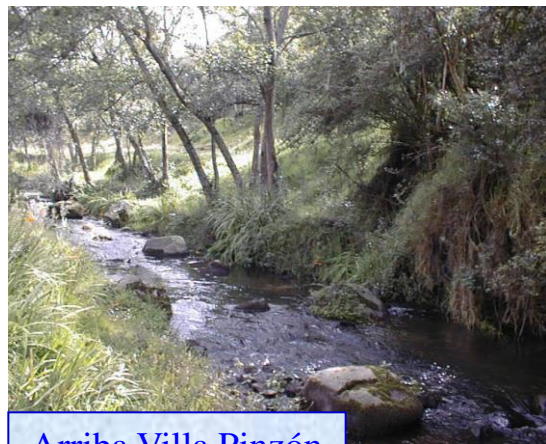


Cuenca alta y la cuenca baja

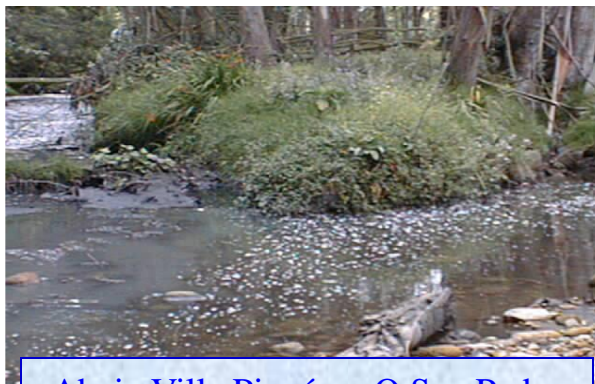
Representar adecuadamente
fenómenos de transporte
propios de ríos de montaña



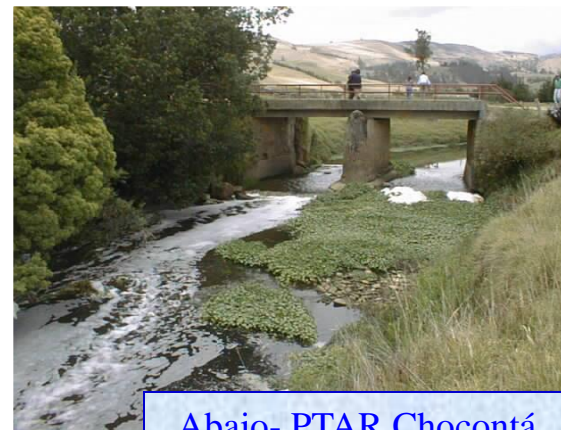
SITIOS DE MEDICION CUENCA ALTA



Arriba Villa Pinzón



Abajo Villa Pinzón – Q.San Pedro



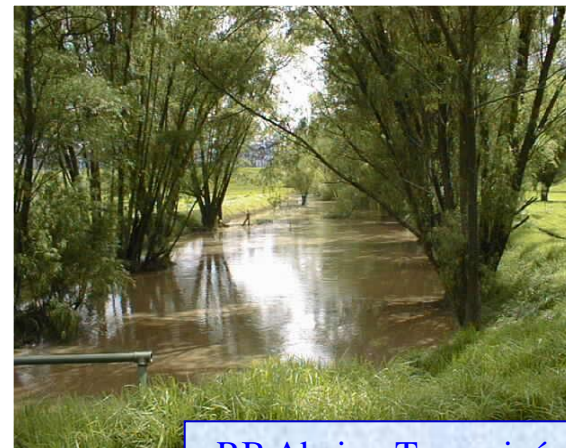
Abajo- PTAR Chocontá



Abajo – Sisga



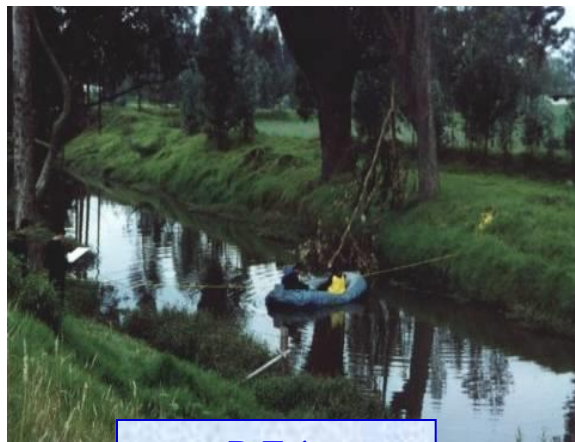
PTAR Gachancipá



RB Abajo - Tocancipá



SITIOS DE MEDICION CUENCA MEDIA



SITIOS DE MEDICION CUENCA BAJA



D. Cadena Nueva - La Guaca



Salto del Tequendama



R. Apulo



Descarga Tocaima



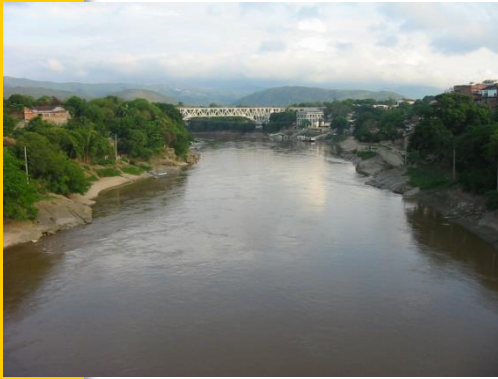
RB Desembocadura



R. Magdalena



Mediciones Río Magdalena



Pte. Ospina

Desembocadura Río Bogotá



Estación Nariño



Estación Arrancaplumas



Bocatoma Cambao



METODOLOGIA PROPUESTA

**3. IMPLEMENTACIÓN O
SELECCIÓN DE UN MODELO
MATEMATICO Y
VERIFICACION DEL
CÓDIGO**

**MODELO APROPIADO
PARA EL SISTEMA
FÍSICO MODELADO
BIEN CODIFICADO**



MODELOS ...

- Modelos de tránsito de crecientes
 - Alarma
 - Planeamiento y diseño
- Modelos de transporte de contaminantes
 - Alarma,
 - Diseño de planes de contingencia
- Modelos de calidad del agua
 - Alarma
 - Planeamiento de saneamiento
 - Diseño de saneamiento

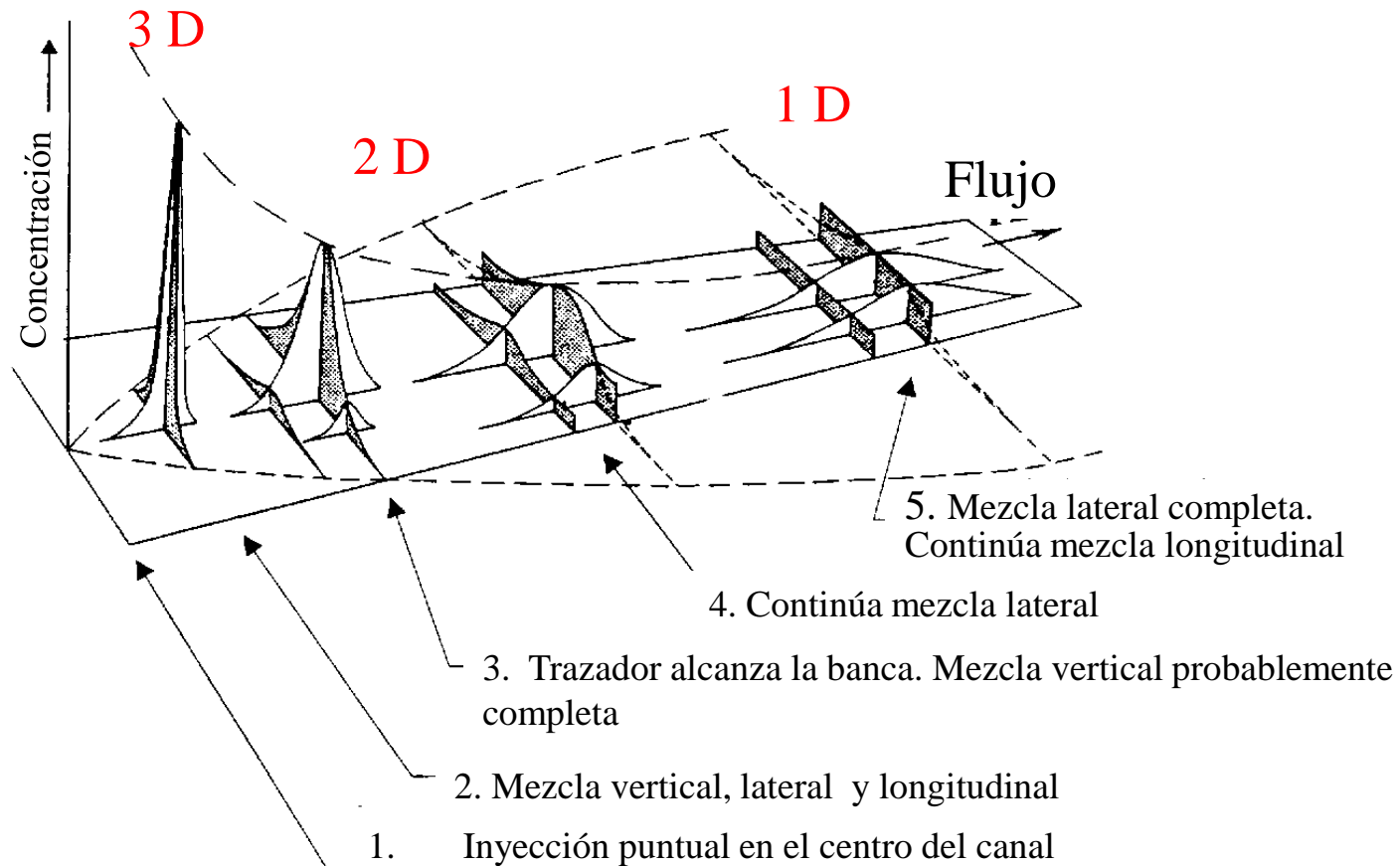


Nivel de Complejidad – Integración flujo - calidad

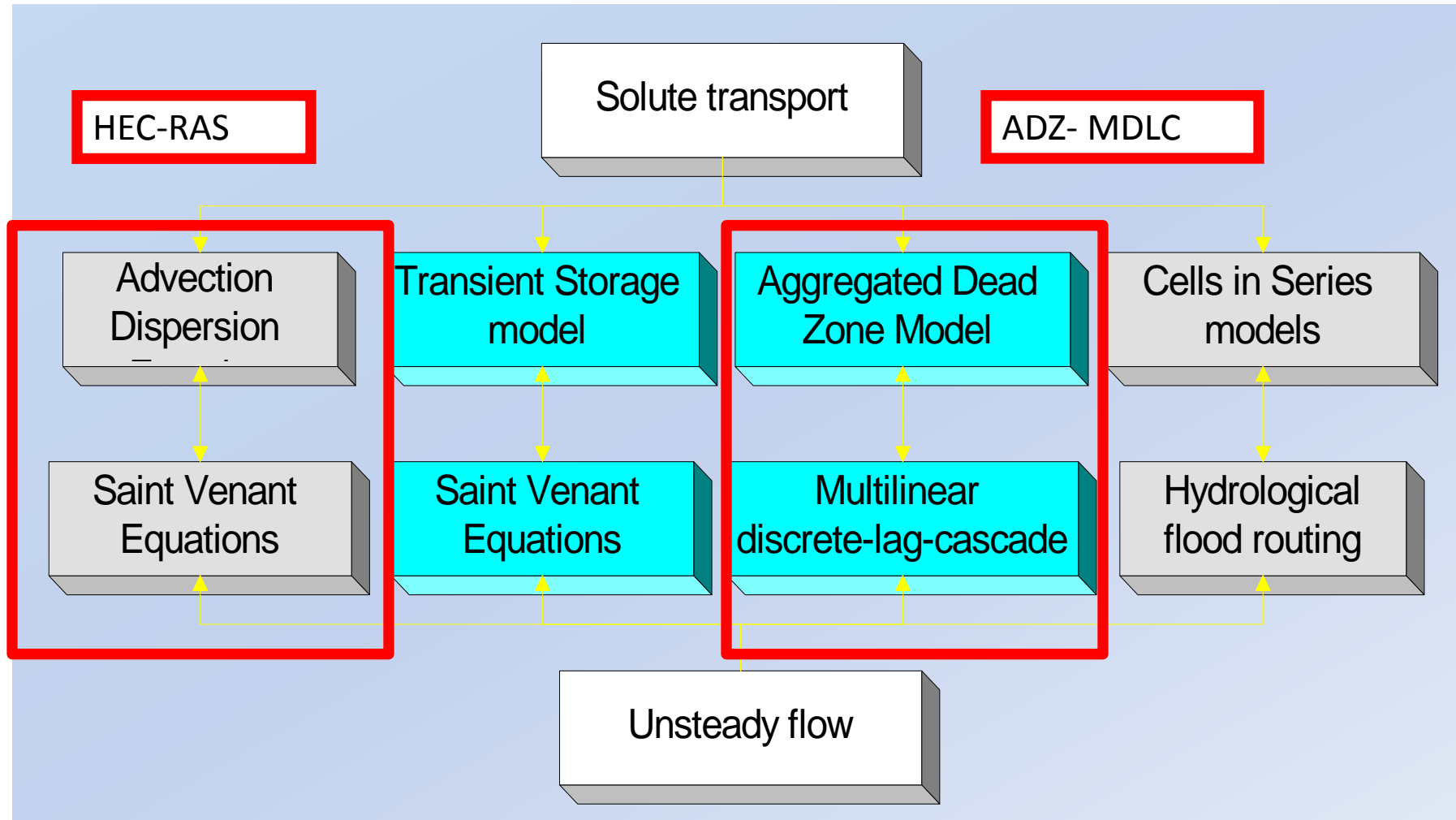


Modelos de transporte de

Patrones de mezcla lateral y longitudinal y cambios en la distribución de la concentración de un trazador inyectado instantáneamente



MODELOS DE TRANSPORTE



Selección e implementación del modelo de calidad del agua

Modelos de estado estable:

- QUAL2K – Nivel de planemiento (e.g. R. Bogotá, 2001)

Modelos Dinámicos:

- WASP (WATER QUALITY ANALYSIS SIMULATION PROGRAM)
- HEC RAS Versión 4.0**
- MIKE 11
- SIMBA
- SMS (Modulo de calidad de agua RMA4)
- ADZ – MDLC - QUASAR extendido. – Nivel diseño (e.g. R. Bogotá, 2010)**

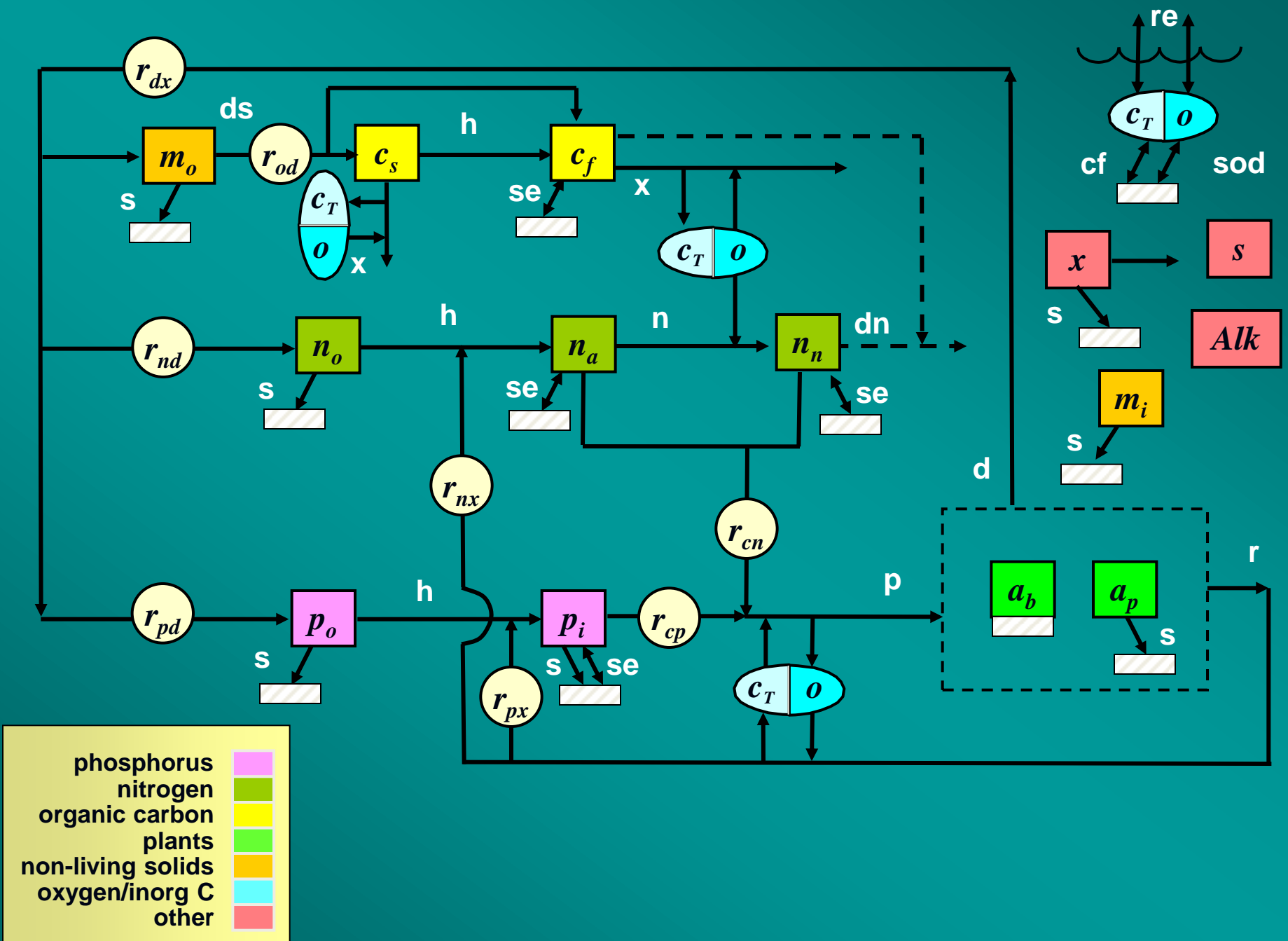


Q2K

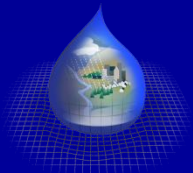
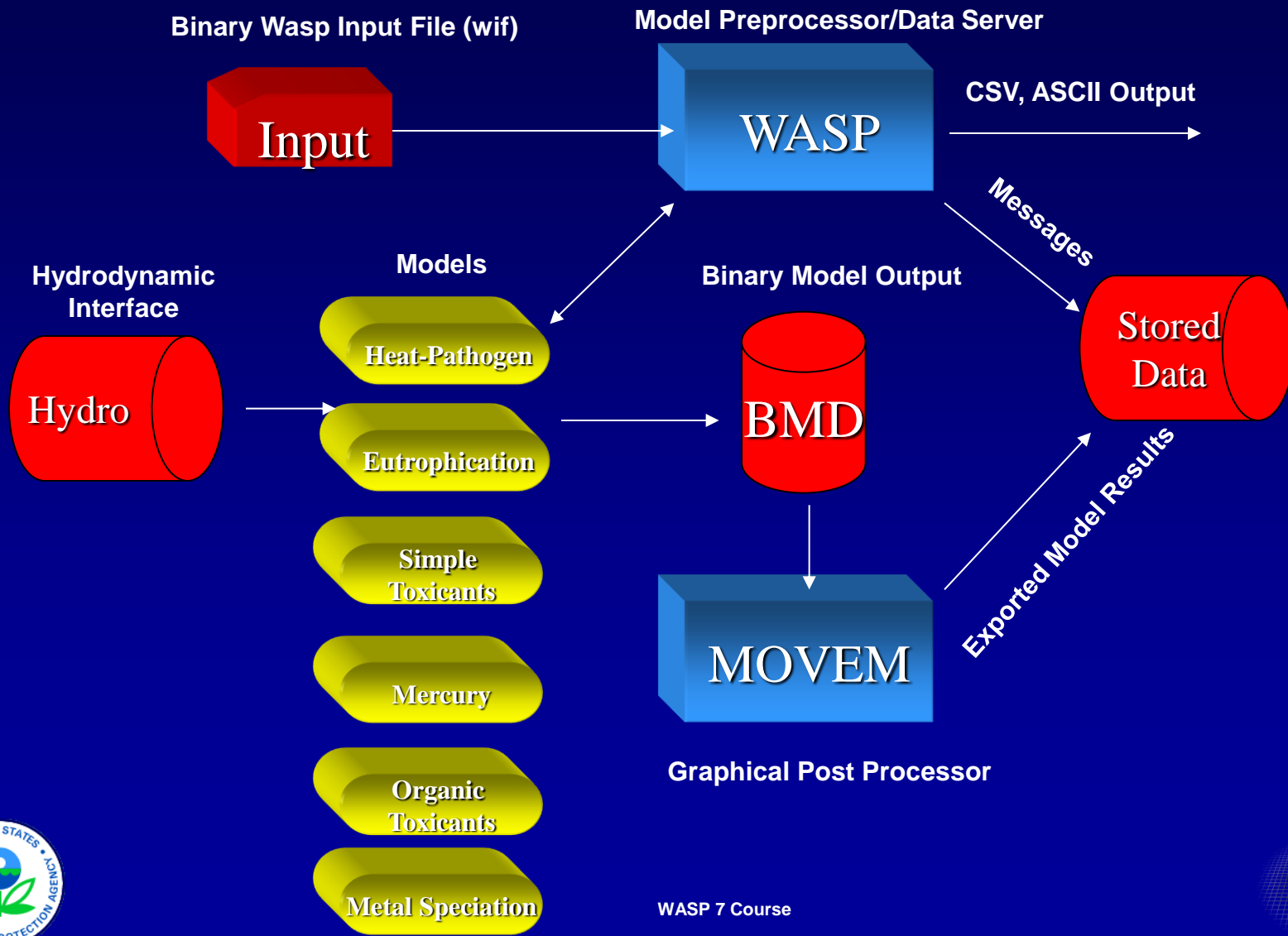
DETERMINANTES CONVENCIONALES

Variable	Symbol	Units*
Conductivity	s	μmhos
Inorganic suspended solids	m_i	mgD/L
Dissolved oxygen	o	mgO_2/L
Slowly reacting CBOD	c_s	mgO_2/L
Fast reacting CBOD	c_f	mgO_2/L
Organic nitrogen	n_o	$\mu\text{gN/L}$
Ammonia nitrogen	n_a	$\mu\text{gN/L}$
Nitrate nitrogen	n_n	$\mu\text{gN/L}$
Organic phosphorus	p_o	$\mu\text{gP/L}$
Inorganic phosphorus	p_i	$\mu\text{gP/L}$
Phytoplankton	a_p	$\mu\text{gA/L}$
Detritus	m_o	mgD/L
Pathogen	X	$\text{cfu}/100 \text{ mL}$
Alkalinity	Alk	mgCaCO_3/L
Total inorganic carbon	c_T	mole/L
Bottom algae biomass	a_b	mgA/m^2
Bottom algae nitrogen	IN_b	mgN/m^2
Bottom algae phosphorus	IP_b	mgP/m^2



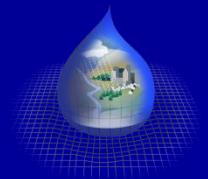


WASP Modeling Framework



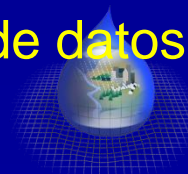
WASP Ventajas y Características

- Flexibilidad en la red
 - Aplicable a la mayoría de cuerpos de agua con algún nivel de complejidad
- Aborda la mayoría de problemas de calidad del agua
 - Calidad del agua convencional: OD, eutroficación, calor
 - Transporte y destino de tóxicos: organicos, metals simples, mercurio
- Separación of Procesos
 - Transporte
 - Cinética
- Comunicación interna (Calor a Eutro. a Tóxicos)
- Comunicaciones externas a Modelos y Hojas de Cálculo
- Tres Técnicas de Solución Numérica



WASP Limitaciones

- No maneja algunos determinantes y procesos:
 - Procesos de zona de mezcla
 - Líquidos en fase no acuosa (e.g., vertimientos aceites o hidrocarburos)
 - Zonas de secado (planicies de inundación)
 - Reacciones de especiación de metales (módulo especial, META4, no hace parte general de la liberación de WASP)
- Archivos hidrodinámicos potencialmente grandes
- Módulos separados de eutroficación y de destino de sustancias tóxicas
 - Versión 7.3: comunicación interna CALOR - EUTRO - TOXI
- No puede correrse en modo automático
 - Programas de calibración objetiva
 - Programas de simulación de Monte Carlo
 - Version 7.3: Ejecución modo supervisor e importación de datos



ADZ – MDLC - QUASAR EXTENDIDO

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
QUASAR EXTENDIDO permite la modelación dinámica de la calidad del agua en una red hídrica de canales conectados con vertimientos puntuales. El módulo permite la modelación del transporte y destino de un conjunto limitado de componentes de calidad del agua pero puede ser fácilmente extendido a otros determinantes. El modelo utiliza la ecuación de transporte de solutos ADZ apropiada para ríos con piscinas o zonas muertas de flujo lento.	1. Transporte de trazadores	1. Caudal y nivel de agua	El software es libre y de código abierto, desarrollado por el Director del Proyecto desde 1991	Software muy versátil que permite la modelación con SIMULINK en forma iconográfica	Requiere modificación para considerar condiciones anaeróbicas en algunos tramos del Río Bogotá
	2. Transporte de sólidos suspendidos	2. SST			
	3. Oxígeno disuelto	3. Nitratos			
	3.1. Reaireación	4. Nitrógeno amoniacal			
	3.2. Oxidación carbonácea	5. DBO		Ambiente de trabajo amigable basado en Simulink lo que permite el montaje del modelo de manera cómoda	Se requiere modificación para incorporar la especie de nitrógeno orgánico
	3.3. Nitrificación	6. Oxígeno disuelto			
	3.4. Denitrificación	7. Fósforo orgánico particulado		Puede utilizarse para control en tiempo real y análisis en línea del comportamiento de la calidad del cuerpo de agua.	El módulo de temperatura requiere modificación por uno más sofisticado como el de Qual2k o WASP.
	3.5. Fotosíntesis y Respiración	8. Fósforo soluble reactivo			
	3.6. Crecimiento de fitoplancton	9. Coliformes totales			
	3.7. Muerte de fitoplancton	10. Fitoplancton			
	3.8. Demanda de oxígeno de sedimentos	11. Tiempos de retención hidráulica y retraso advectivo de los solutos		Por corresponder a un software "desarrollado en casa" puede modificarse y extenderse fácilmente y muy rápidamente	
	4. Eutroficación	calculados en función de caudal y considerando zonas muertas			
	4.1. Ciclo de P				
	4.2. Ciclo de N				
	4.3. OD				
	4.4. Fitoplancton	12. Temperatura		La complejidad del modelo puede incrementarse en el tiempo, por ejemplo incluyendo el transporte y destino de sustancias tóxicas una vez se calibren correctamente las interacciones agua - sedimento.	
	5. Temperatura	13. Salinidad y/o sólidos disueltos			
	6. Salinidad y/o sólidos disueltos				
	7. Coliformes totales				

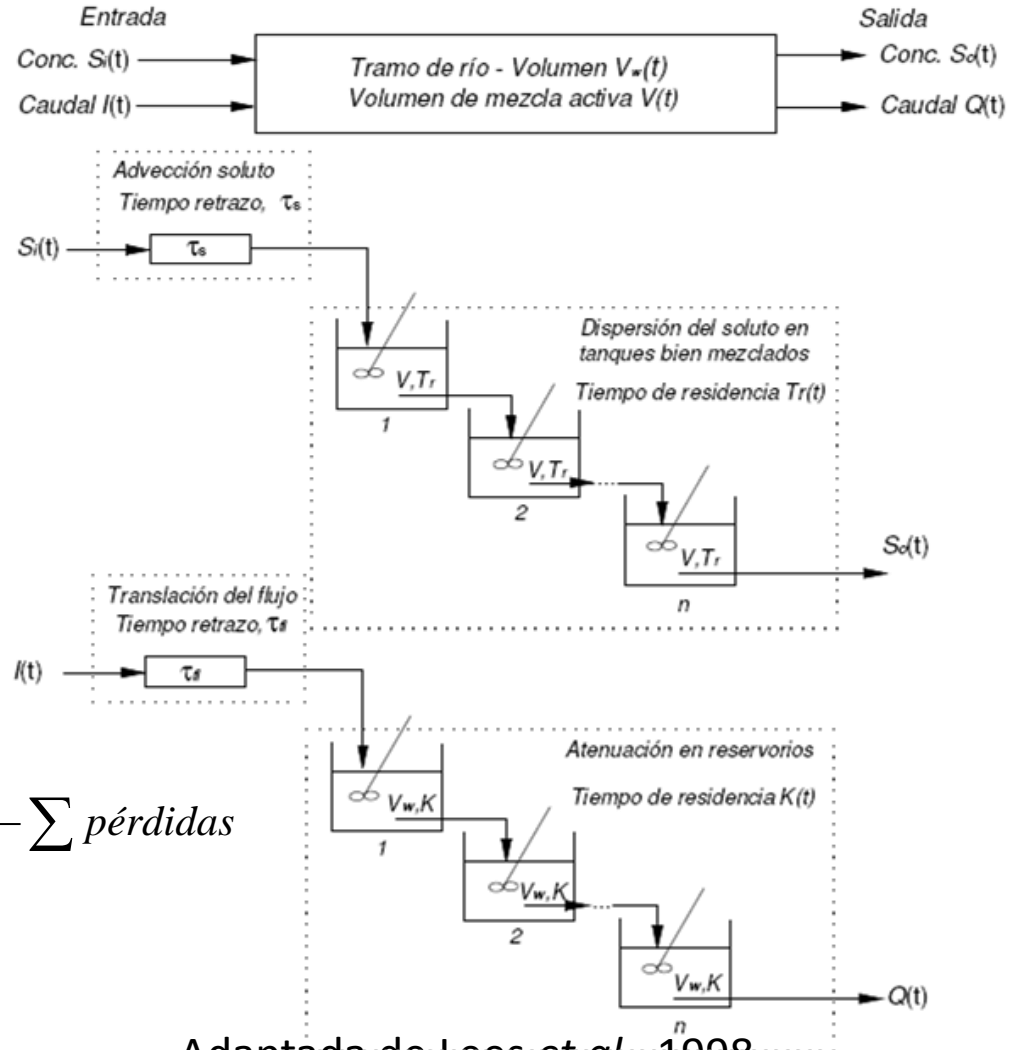


Modelo – ADZ-MDLC-QUASAR

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \frac{1}{K} (Q_m(t - \tau_{ff}) - Q(t))$$

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = \frac{1}{Tr} (S_m(t - \tau) - S(t))$$

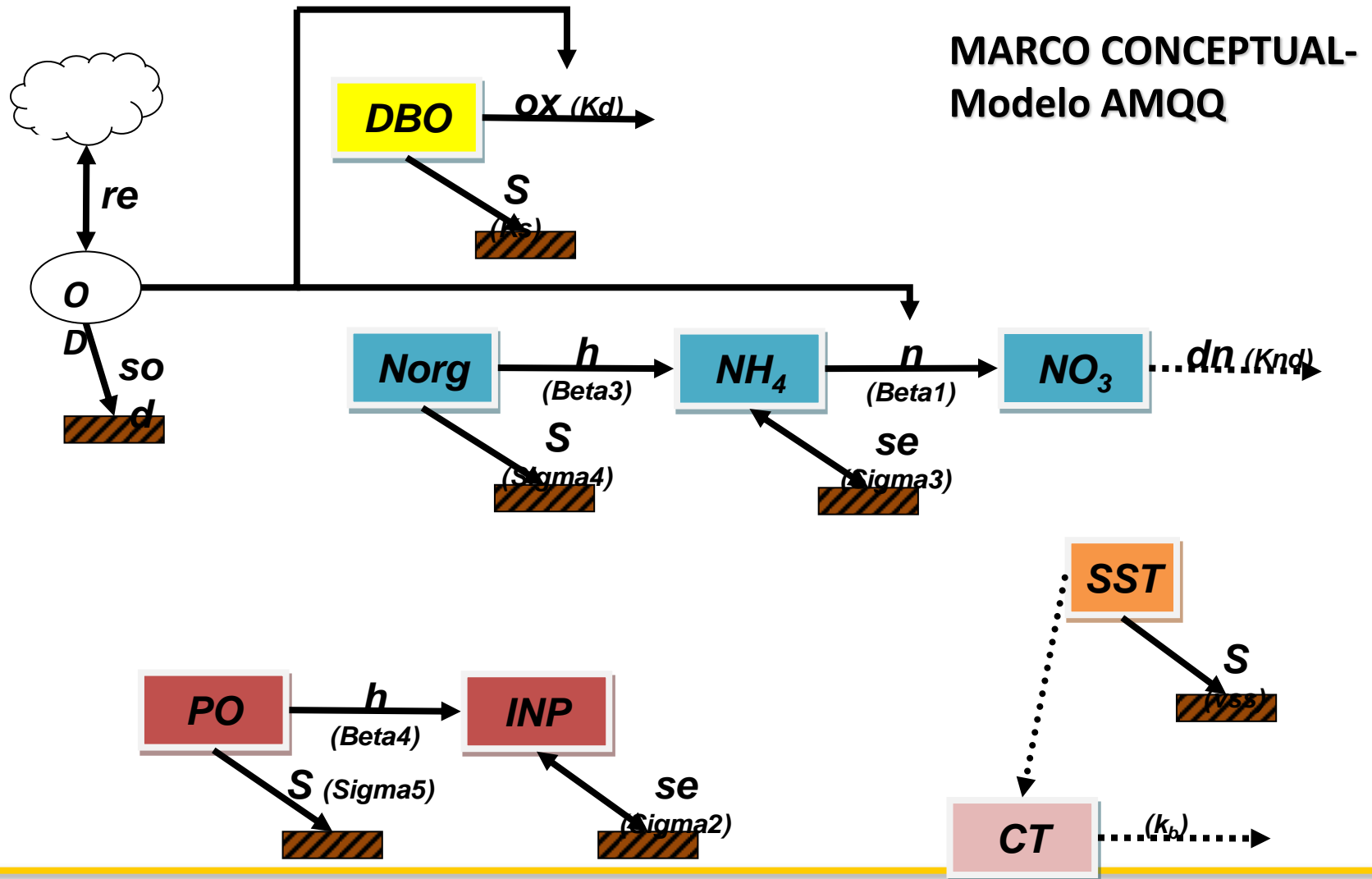
$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = \frac{1}{Tr} (e^{-kt} \cdot X_m(t - \tau) - X(t)) + \sum \text{fuentes} - \sum \text{pérdidas}$$



. Adaptada de Lees *et al.*, 1998



QUASAR Extendido

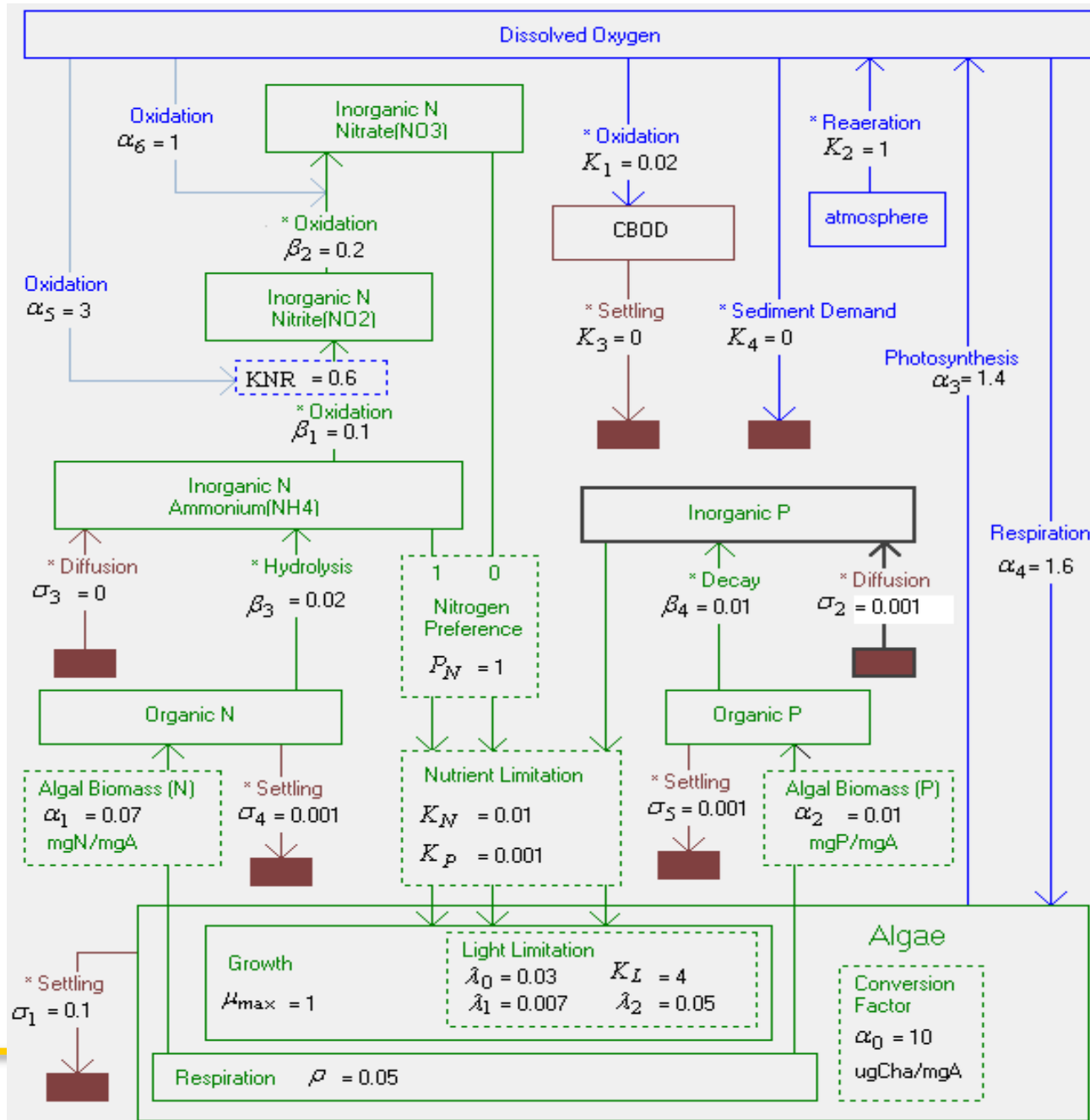


HEC - RAS (Versión 4.0)

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>El módulo para la modelación de calidad del agua de HEC-RAS, está destinado a permitir al usuario realizar análisis de calidad del agua en sistemas fluviales. Incluye un módulo de Advección – Dispersión, contando adicionalmente con la capacidad de modelar temperatura del agua. Este nuevo módulo utiliza el esquema numérico explícito QUICKEST – ULTIMATE (Leonard, 1991) para solucionar la ecuación unidimensional de Advección – Dispersión usando un volumen de control con aplicación completa del cálculo de la energía térmica. C95</p>	1. Transporte de sedimentos/Modelación de lecho móvil.	1. Modelo de nutrientes	<p>Gratuito. El software puede descargarse gratuitamente de http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/</p>	Software versátil, sencillo de manejar ampliamente utilizado para simulaciones hidrodinámicas.	Permite modelar un número limitado de componentes de calidad del agua. El código es cerrado y no se puede modificar
	2. Métodos de Análisis de Impactos de Sedimentos (SIAM).	1.1. Nitrito disuelto (NO_2)		Modelo gratuito respaldado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.	No contiene la cinética y los procesos que se presentan en condiciones anaerobias
	3. Modelo de temperatura.	1.2. Nitrato disuelto (NO_3)		<p>El módulo hidrodinámico ha sido ampliamente utilizado en el medio de la ingeniería y es reconocido como nuevo y no ha sido apropiado y robusto en gran cantidad de aplicaciones.</p>	<p>El código implementado para simulación de calidad del agua es nuevo y no ha sido aplicado con una cantidad amplia de datos.</p>
	4. Modelación de nutrientes	1.3. Nitrógeno Orgánico disuelto (OrgN)			
	4.1. Nitrógeno Disuelto ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, y Org-N)	1.4. Nitrógeno amoniacal disuelto (NH_4)			
	4.2. Fósforo Disuelto ($\text{PO}_4\text{-P}$ y Org P)	1.5. Fósforo orgánico disuelto (OrgP)			
	4.3. Algas	1.6. Ortofosfato disuelto (PO_4)			
	4.4. Oxígeno Disuelto	1.7. Algas (A)			
	4.5. Demanda Biológica de Oxígeno Carbonácea (CBOD)	1.8. Demanda Biológica de Oxígeno Carbonácea (CBOD)			
	5. Modelación de constituyentes arbitrarios: definidos por el usuario, independientes de la temperatura y de los nutrientes del agua.	1.9. Oxígeno disuelto (DOX)			
	6. Reglas definidas por el usuario para el control de operación de compuertas			<p>La interfaz para manejo de datos de calidad del agua es amigable y altamente flexible, encuentra aún en desarrollo por parte del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.</p>	<p>Presenta algunos errores de código que interrumpen su funcionamiento de forma súbita. El software se encuentra aún en desarrollo por parte del cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.</p>
	7. Modelación de flujo a presión en tuberías				



MARCO CONCEPTUAL-Modelo HEC RAS



Esquema de las interacciones analizadas por HEC-RAS en el módulo de modelación de nutrientes (Tomado de HEC-RAS 4.0)



MIKE 11

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>MIKE 11 permite la simulación hidráulica, de calidad de agua y transporte de sedimentos en estuarios, ríos, sistemas de irrigación, canales y otros cuerpos de agua. Es un modelo unidimensional dinámico para diseño detallado, manejo y operación de sistemas simples y complejos de canales y ríos.</p> <p>Funciona a través de módulos que son acoplados en un proyecto.</p>	1. Hidrodinámica	1. Plantilla eutroficación	Módulo hidrodinámico ilimitado (MIKE 11): Alrededor \$50'000.000	Software ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería en un gran número de aplicaciones.	Dado que es un software comercial de alto costo, los procesos, ecuaciones, cinética y desarrollo de códigos que utiliza como solución el modelo son cerrados y no se conocen en su totalidad y se mantienen por DHI bajo reserva.
	2. Advección – Dispersión	1.1. Fitoplancton			
	3. Transporte de Sedimentos	1.2. Carbono			
	4. ECOLab (Módulo para la modelación de calidad del agua)	1.3. Nitrógeno	Módulo AD: Alrededor de \$9'000.000	Es el software comercial no gratuito de más reconocimiento y uso en proyectos de gran escala para consultoría e investigación.	El usuario no puede tener conocimiento completo de la operación y forma de solución de las ecuaciones que utiliza el programa.
		1.4. Fósforo			
	4.1. Eutroficación	1.5. Clorofila	GIS (MIKE 11): Alrededor de \$9'000.000		
	4.2. Metales pesados	1.6. Zooplancton			
	4.3. Coliformes	1.7. Carbono	ECOLAB: Alrededor de \$10'000.000		
	4.4. BOD disuelta, BOD en suspensión, BOD en el lecho del río, OD, amoníaco y nitrato.	1.8. Detritos			
	5. Lluvia – Escorrentía	1.9. Carbono	DHI ofrece planes de inversión a 5 años para manejo de licencias y actualizaciones para las cuales también es necesario realizar los pagos correspondientes con lo cual el costo puede ascender a más de \$150'000.000	El módulo de calidad del agua (ECOLab) es presentado por DHI como altamente flexible y posible de modificar de acuerdo a las necesidades específicas del proyecto.	En la literatura han sido mostrados casos en los cuales el modelo MIKE11 pierde robustez y presenta fallas en su operación y solución de las ecuaciones.
		1.10. Nitrógeno			
	6. Predicción de inundaciones	1.11. Fósforo			
		1.12. Nitrógeno inorgánico			
		1.13. Fósforo inorgánico			
		1.14. Oxígeno disuelto			
		1.15. Vegetación béntica			
		2. Plantilla metales pesados			



SIMBA

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SIMBA permite realizar un análisis holístico del sistema de alcantarillado, planta de tratamiento, manejo de lodos y aguas receptoras. Todos los componentes necesarios para un análisis detallado de los subsistemas y sus interacciones se integran en un sistema de simulación simple. El modelo facilita las aplicaciones en campos como: Planeamiento y diseño de plantas de tratamiento considerando variantes operacionales, incluyendo control, optimización de diseño de procesos y operación de plantas existentes, análisis de los procesos de manejo de agua, tratamiento de lodos y consumo de energía, análisis de flujos en áreas urbanas, desarrollo y prueba de estrategias para control en tiempo real de sistemas de drenaje urbano, análisis de interacciones de lluvia, tratamiento de aguas y calidad del agua del cuerpo receptor.	1. Simulación de PTAR's	1. Alcantarillados	El software tiene un costo por licencia cercano a los 1000 Euros	Software muy versatil que permite la modelación de manera integrada Alcantarillado - PTAR - Río	Para el análisis hidrodinámico de ríos utiliza SWMM cuyos desarrollos se concentran principalmente al análisis hidráulico de alcantarillados y por tanto podría no ser el más apropiado para el caso de ríos.
	2. Modelos para clarificación primaria y secundaria	1.1. OD		Ambiente de trabajo amigable basado en Simulink lo que permite el montaje del modelo de manera cómoda	
	3. Modelación de sistemas de alcantarillado	1.2. Amoniac		Dado que tiene un amplio desarrollo para modelación de calidad del agua en alcantarillados, contiene la cinética y procesos bajo condiciones anaerobias	El objetivo principal de SIMBA es realizar la simulación integrada Alcantarillado - PTAR - Río lo cual podría considerarse por fuera del alcance del estudio para el proyecto.
	4. Procesos anaeróbicos	2. PTAR		Puede utilizarse para control en tiempo real y análisis en línea del comportamiento de la calidad del cuerpo de agua.	
	5. Cuerpos de agua receptores	2.1. OD		Permite un estudio amplio del sistema integrado y las interacciones Alcantarillado-PTAR-Río ya que contiene gran cantidad de procesos, ecuaciones y cinética para representar de forma completa el sistema	
	6. Aproximación de modelación de Lagrange	2.2. Nitrógeno			
		2.3. Fósforo			Se encuentra poca información en la literatura sobre el funcionamiento propio del Software, por lo cual sería necesario contactarse con <i>IfaK</i> para obtener mayor información sobre su operación y limitaciones y ventajas potenciales.



Surface Water Modelling System (SMS)

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SMS es una interfaz gráfica para pre y post procesamiento de modelos hidrodinámicos en una, dos y tres dimensiones. Incluye elementos finitos 2D, diferencias finitas 2D, elementos finitos 3D y herramientas de modelación 1D. Los modelos soportados por SMS incluyen GFGEN, RMA2 (modelo hidrodinámico que se acopla a RM4), RMA4 (modelo para calidad del agua), SED2D-WES, ADCIRC, CGWAVE, STWAVE, M2D, HIVEL2D y HEC-RAS. Las aplicaciones primarias de dichos modelos incluyen: cálculo de niveles y velocidades de flujo en condiciones de flujo permanente y no permanente, modelación de contaminantes, intrusión salina, transporte de sedimentos, dispersión de ondas, propiedades de ondas y otros.	1. Transporte de solutos (1 y 2D)	1. Oxígeno disuelto (plantilla)	Los módulos RMA2 (Hidrodinámico) y RMA 4 (Calidad del agua) cuestan del orden de \$8'000.000	Permite análisis en una y dos dimensiones	El enfoque de los módulos RMA2 y RMA4 está orientado hacia el análisis de costas, por tal motivo permiten modelación 2D, sin embargo pensando en la modelación de ríos podría considerarse de un nivel de complejidad excesivo
	2. OD				Se encuentra limitado al análisis de hasta 6 constituyentes de calidad del agua.
	3. DBO				La única plantilla de análisis predeterminada en el software es la de oxígeno disuelto, cualquier otro constituyente de calidad del agua deberá ingresarse y definirse de manera manual
					No contiene la cinética y los procesos que se presentan en condiciones anaerobias
					La interfaz para ingreso de datos e información sobre las características del río es bastante compleja y poco amigable requiriendo en algunas circunstancias la generación de archivos txt para ensamble en el modelo



SELECCIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

Resumen

- QUAL2-E (EPA)
 - No maneja bien condiciones anaeróbicas
 - Requiere correcciones para su aplicación Río Bogotá
 - Interacciones agua sedimentos se modelan exógenamente
 - No es amigable
- QUAL2-K (Chapra, 2001 – EPA 2002)
 - Ok. Condiciones anaeróbicas,
 - Ok Interacciones agua sedimentos se manejan endógenamente
 - Facilidad de uso, amigabilidad



SELECCIÓN DEL MODELO

QUASAR (Whitehead, et al. 1997)

- Sencillez modelo conceptual. Muy costoso
- Requiere modificaciones. Dinámica a nivel planeamiento?

OTIS (Runkel, 1998), ADZ (Beer y Young, 1983)

- Ok. Procesos de transporte Ríos de Montaña
- Requieren extensión para su aplicación como
- modelos de calidad

•MIKE-11

- Complejidad justificada a este nivel ?
- Manejo de condiciones anaeróbicas? Metanogénesis? Costo?



METODOLOGIA PROPUESTA

4. INVESTIGACIÓN HIDRÁULICA PRELIMINAR Y ENSAYOS CON TRAZADORES

**PARÁMETROS
HIDRÁULICOS Y DE
TRANSPORTE**

**MODELOS DE TIEMPO
DE VIAJE**



Investigación hidráulica

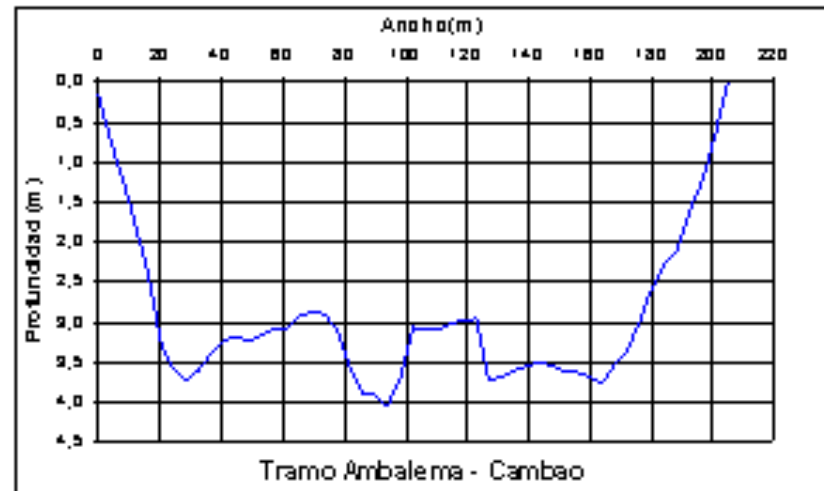
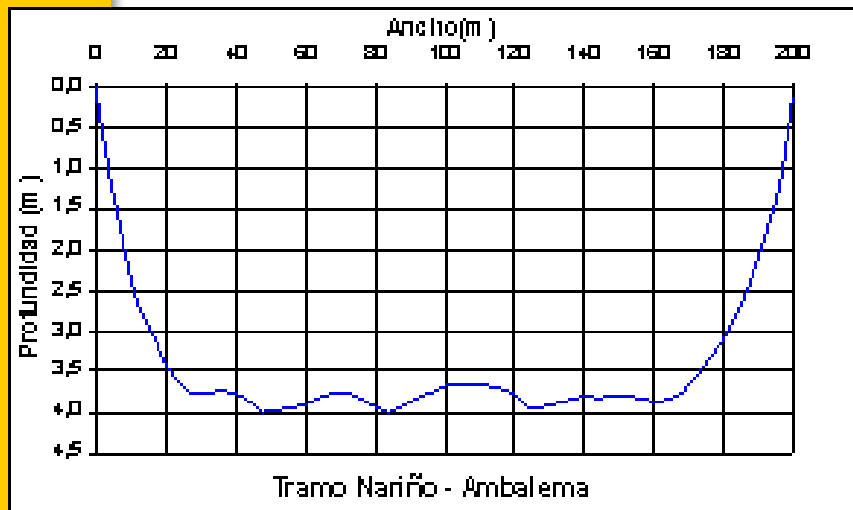
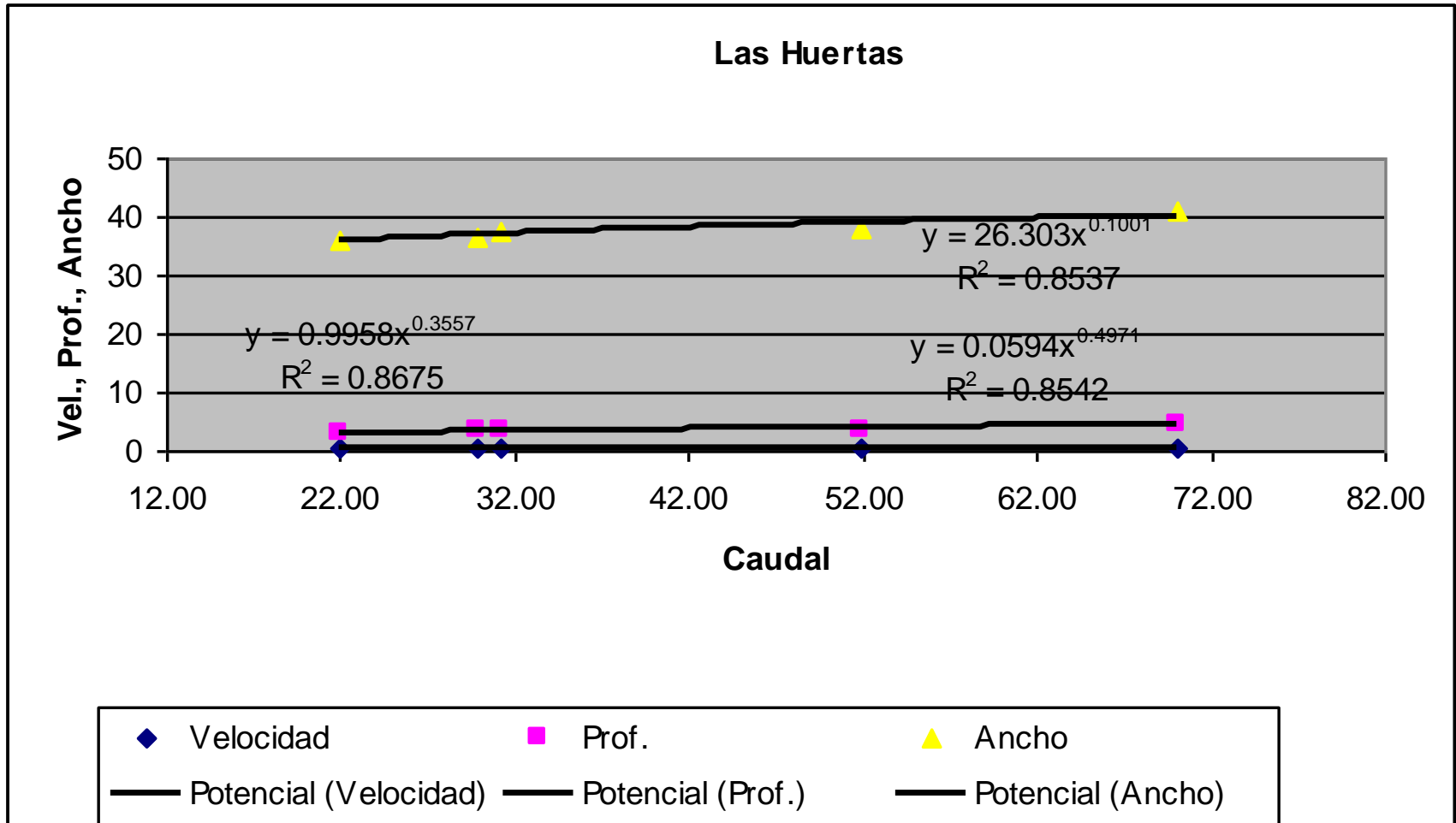


Tabla 44 – Características de las secciones transversales trapezoidales de los subtramos de estudio

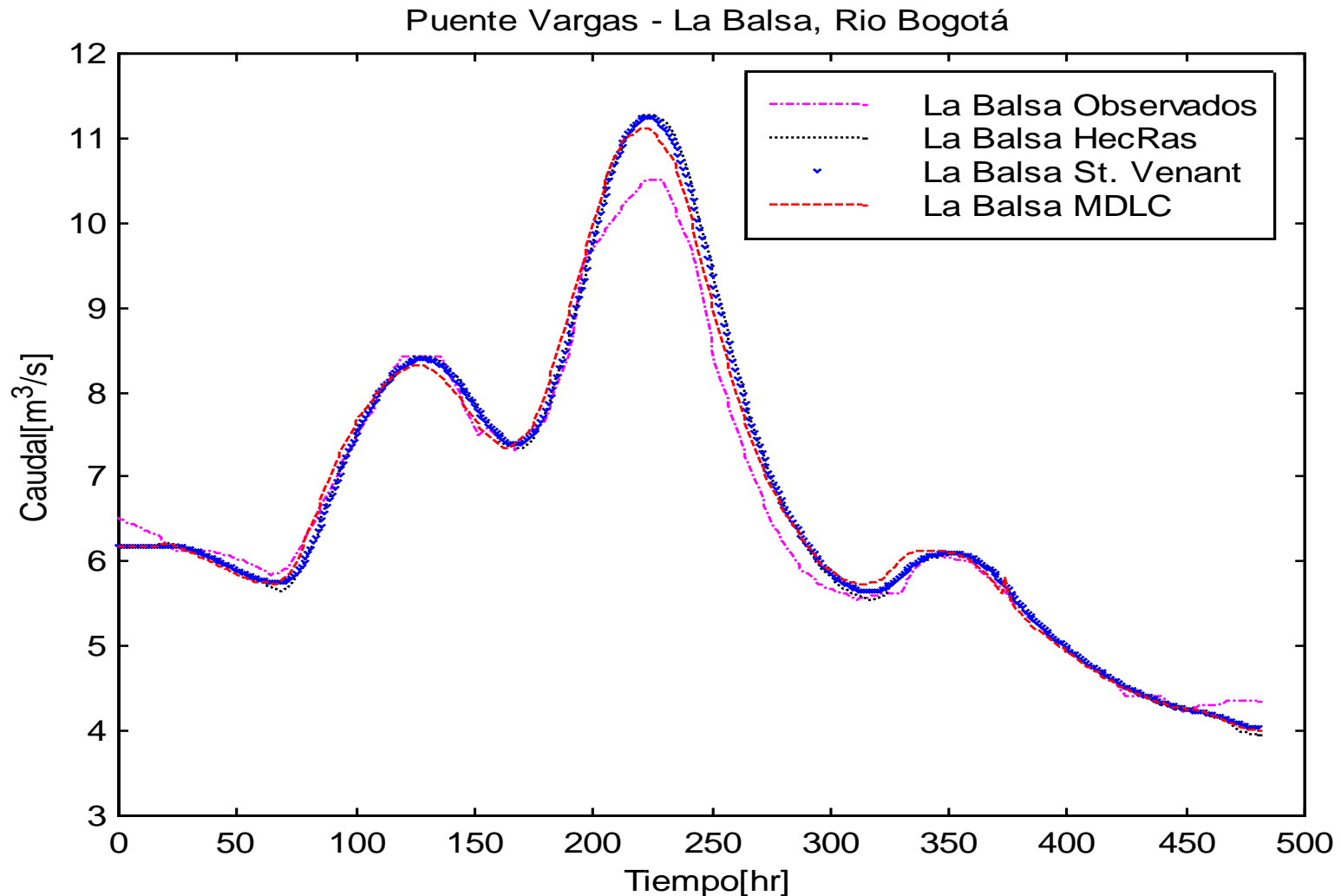
Subtramo	Ancho base (m)	z
Purificación - Coello	80	6.67
Coello - Nariño	100	5.00
Nariño - Ambalema	160	5.26
Ambalema – Sabandija	150	8.11
Sabandija - Arrancaplumas	55	5.93

Secciones transversales medias

INVESTIGACIÓN HIDRAULICA

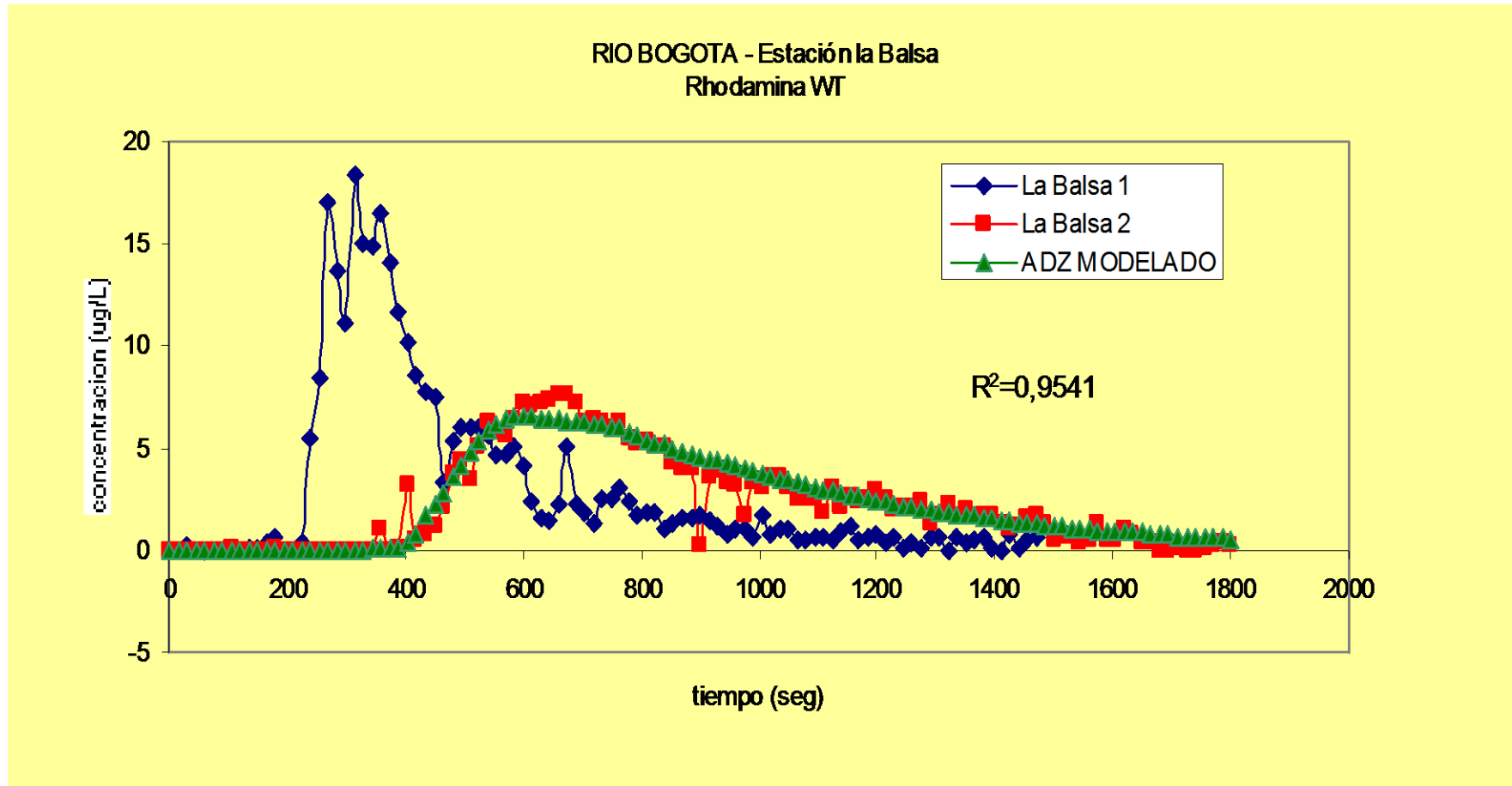


CALIBRACION HIDRAULICA



EXPERIMENTOS CON TRAZADORES

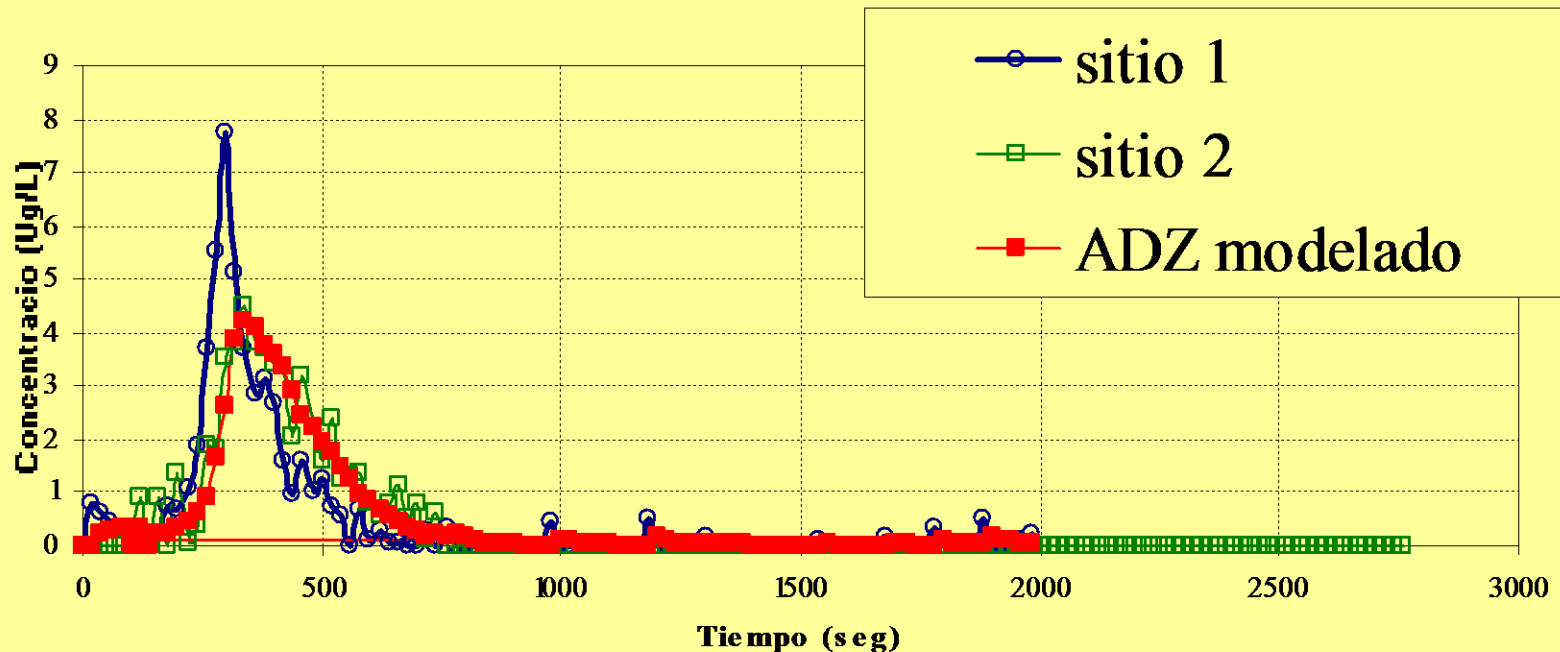
CUENCA MEDIA



EXPERIMENTOS CON TRAZADORES

CUENCA BAJA

Ensayo de Trazadores en el Río Bogotá, Cuenca Baja
(Rodamina WT)



Experimento No. 1 con trazadores Río Magdalena

- Determinar longitud de mezcla
- Estimar coeficiente de dispersión transversal y longitudinal
- Estimar fracción dispersiva modelo de tiempo de viaje ADZ-MDLC
- Modelo de tiempos de viaje en el tramo de estudio



Inyección rodamina
WT

METODOLOGIA PROPUESTA

5. PROGRAMACION DE TOMA DE MUESTRAS

```
graph TD; A[5. PROGRAMACION DE TOMA DE MUESTRAS] --> B[METODOLOGIA  
SITIOS  
DETERMINANTES  
ACUERDOS  
LABORATORIO];
```

METODOLOGIA
SITIOS
DETERMINANTES
ACUERDOS
LABORATORIO



MEDICIONES DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

- Aforos de caudal, T, pH, conductividad y Oxígeno disuelto, Vel. Viento (40 sitios)
- DBO total y soluble, DQO total y soluble,
- NTK, amonio, nitratos, fósforo total y soluble, alcalinidad,
- Clorofila-*a*
- Coliformes totales, Coliformes fecales
- SST y Análisis de muestras de columna agua sedimento (Demanda béntica)

Campo

Mat. Org.

Nutrientes

Fito.

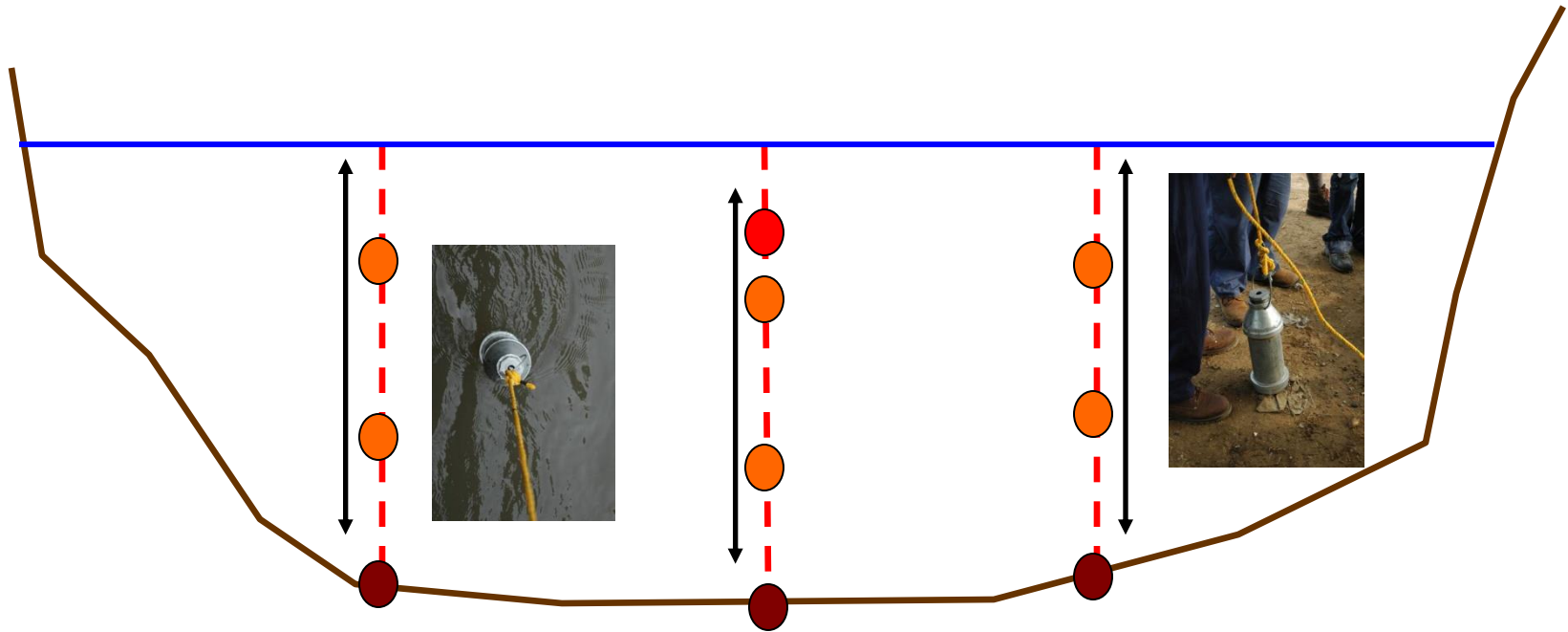
Patógenos

**Sedi-
mentos**



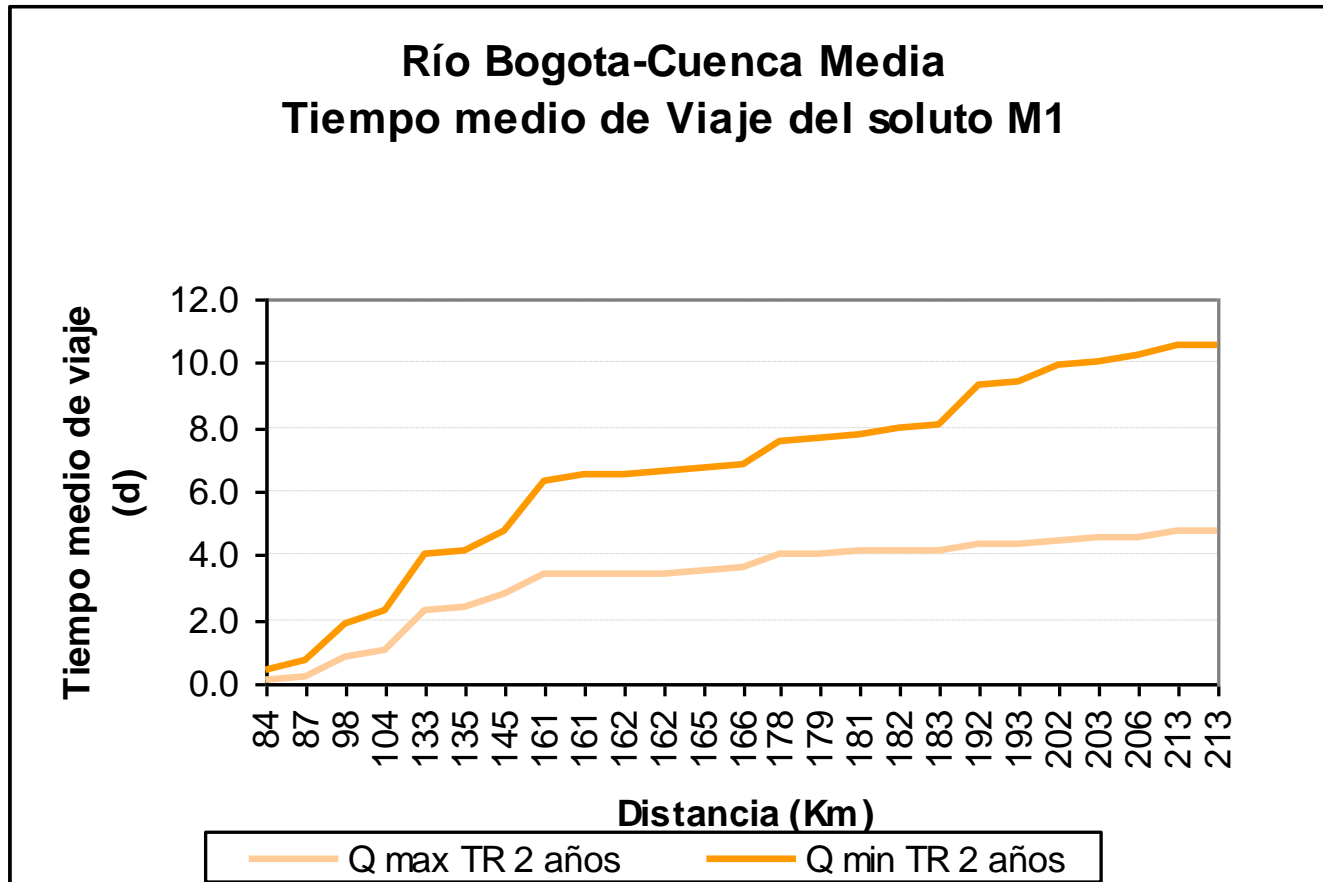
TOMA DE LA MUESTRA

- Siguiendo la masa de agua
- Integrada en la sección transversal

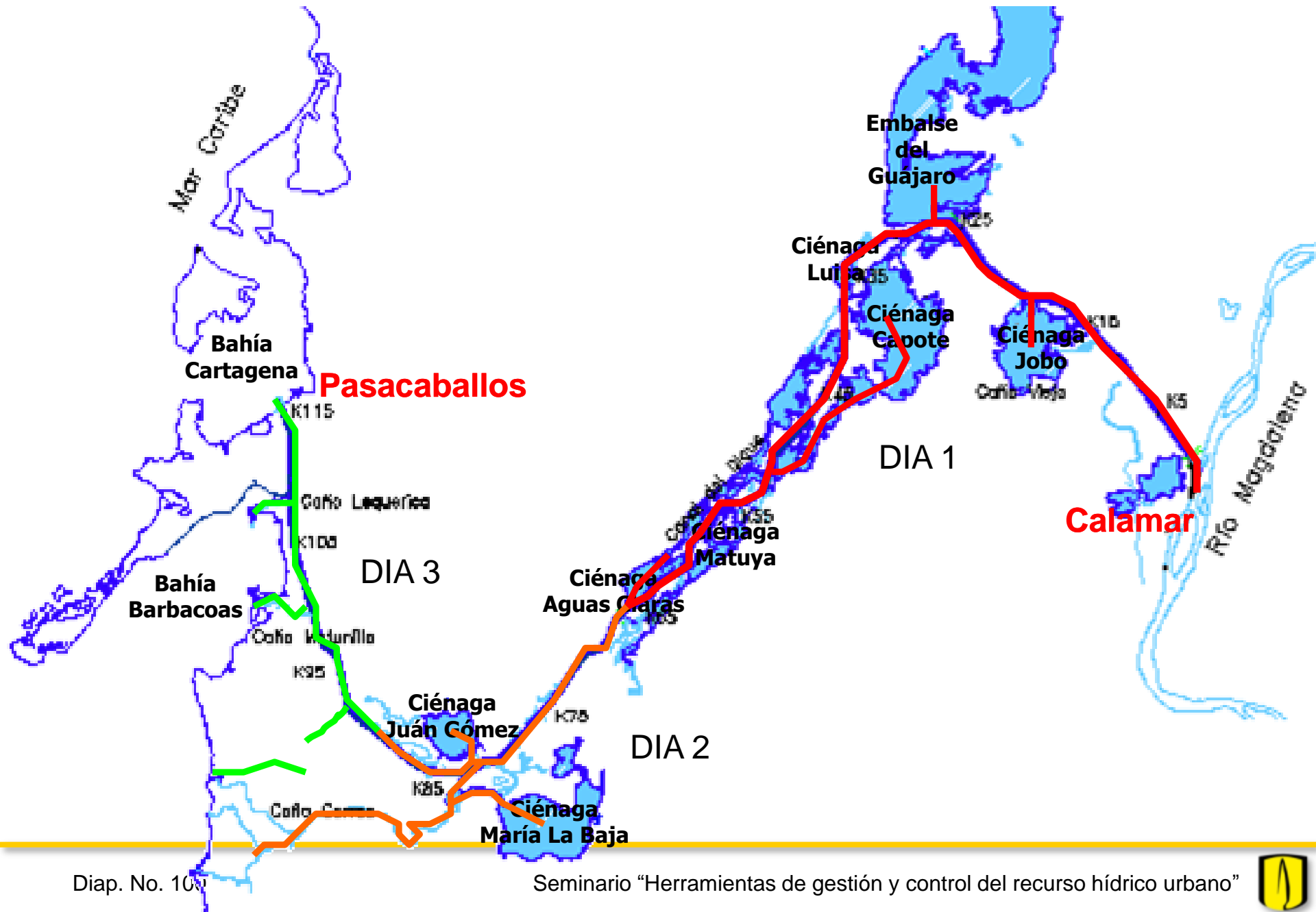


MODELO DE TRANSPORTE

Ejemplo TIEMPOS DE VIAJE CUENCA MEDIA



CAMPAÑA DE MEDICIONES



AFOROS

Aforos - Uninorte



TOMA DE MUESTRAS Y EQUIPOS

Toma de muestras y equipos



TOMA DE MUESTRAS Y EQUIPOS

Toma de muestras y equipos



PERSONAL TÉCNICO



EQUIPOS



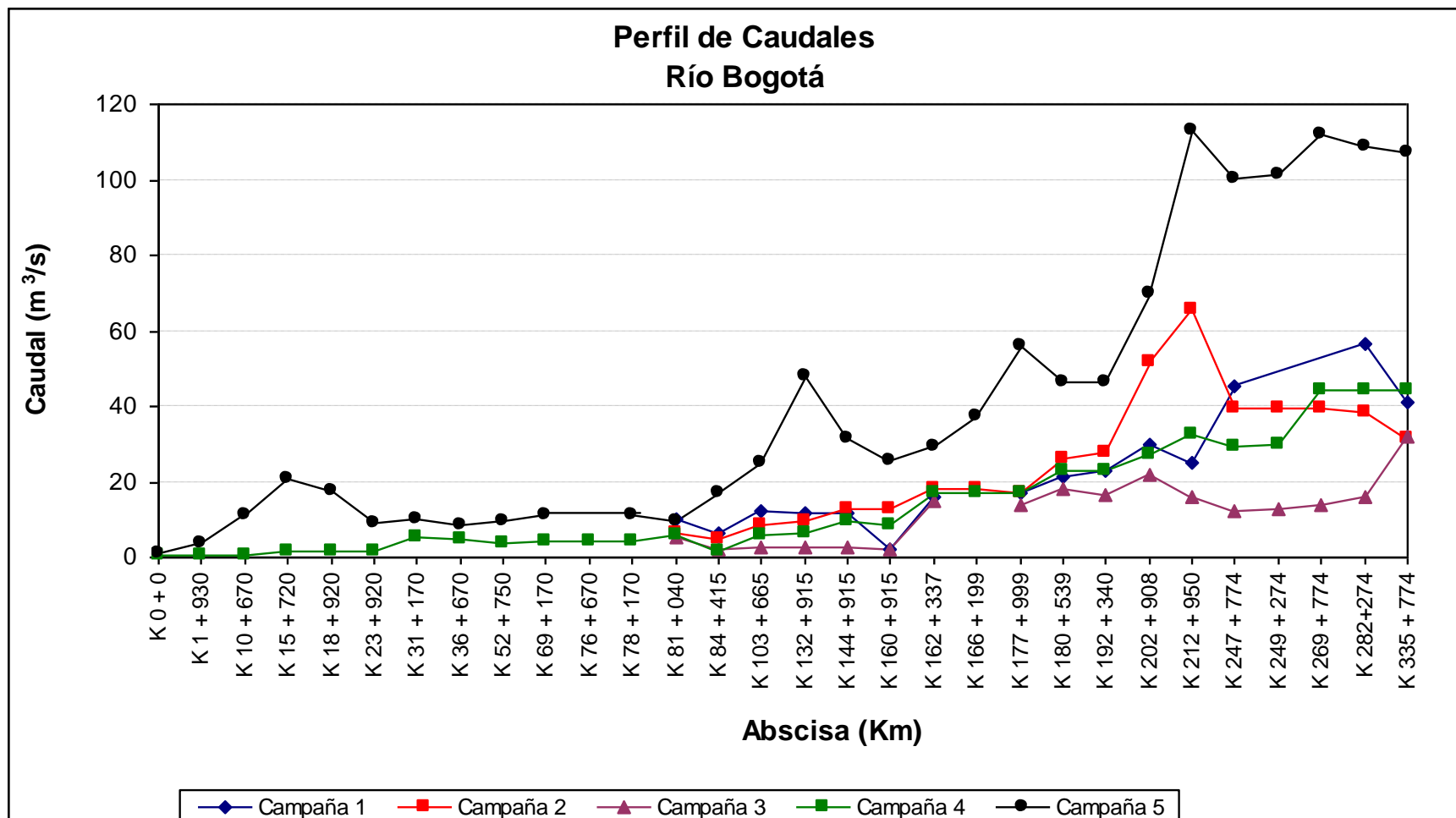
METODOLOGIA PROPUESTA

**6. CAMPAÑAS DE
MEDICIONES Y ANÁLISIS DE
LABORATORIO**

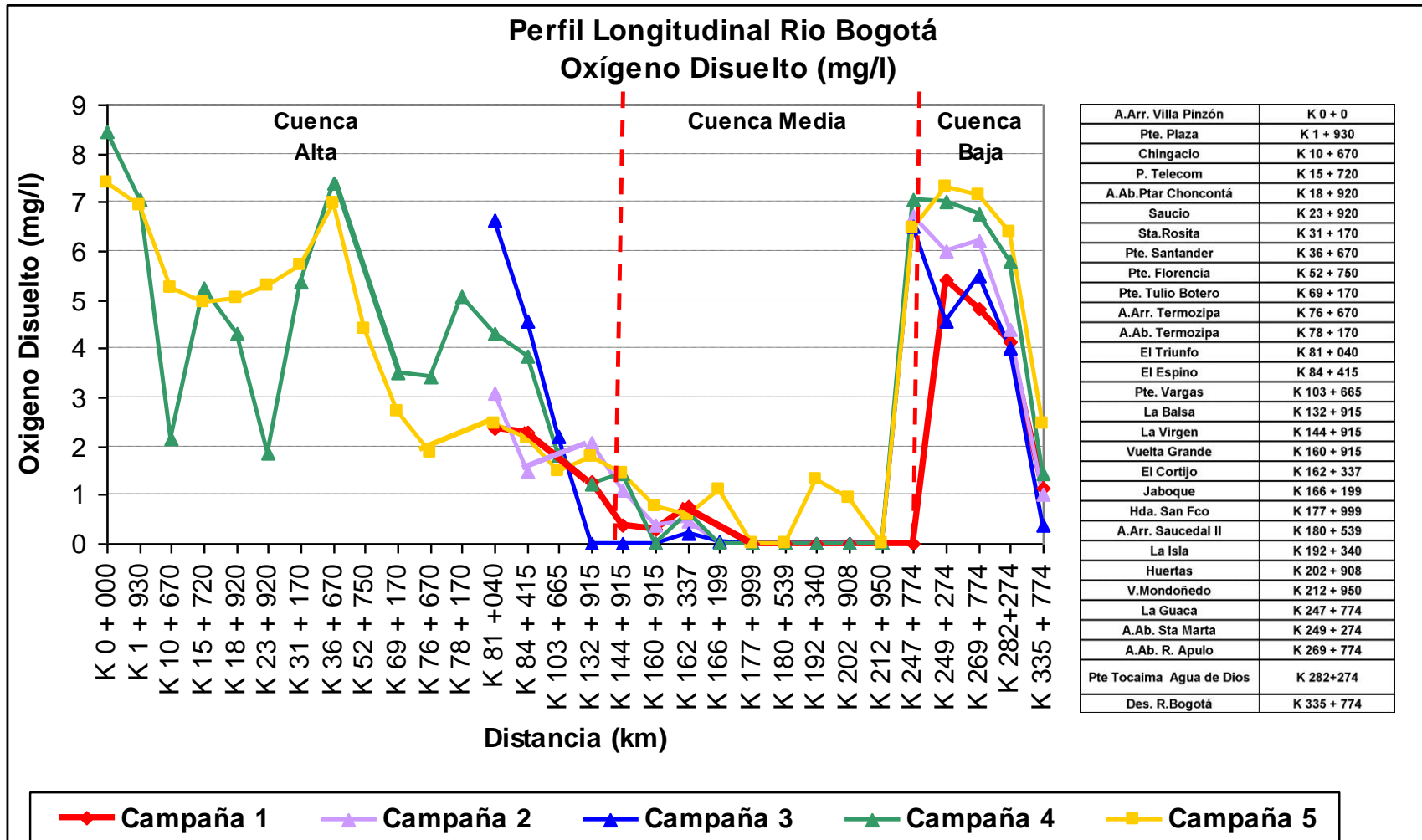
**DATOS PARA
CALIBRACIÓN DEL
MODELO**



CAUDALES CAMPAÑAS 1 - 5

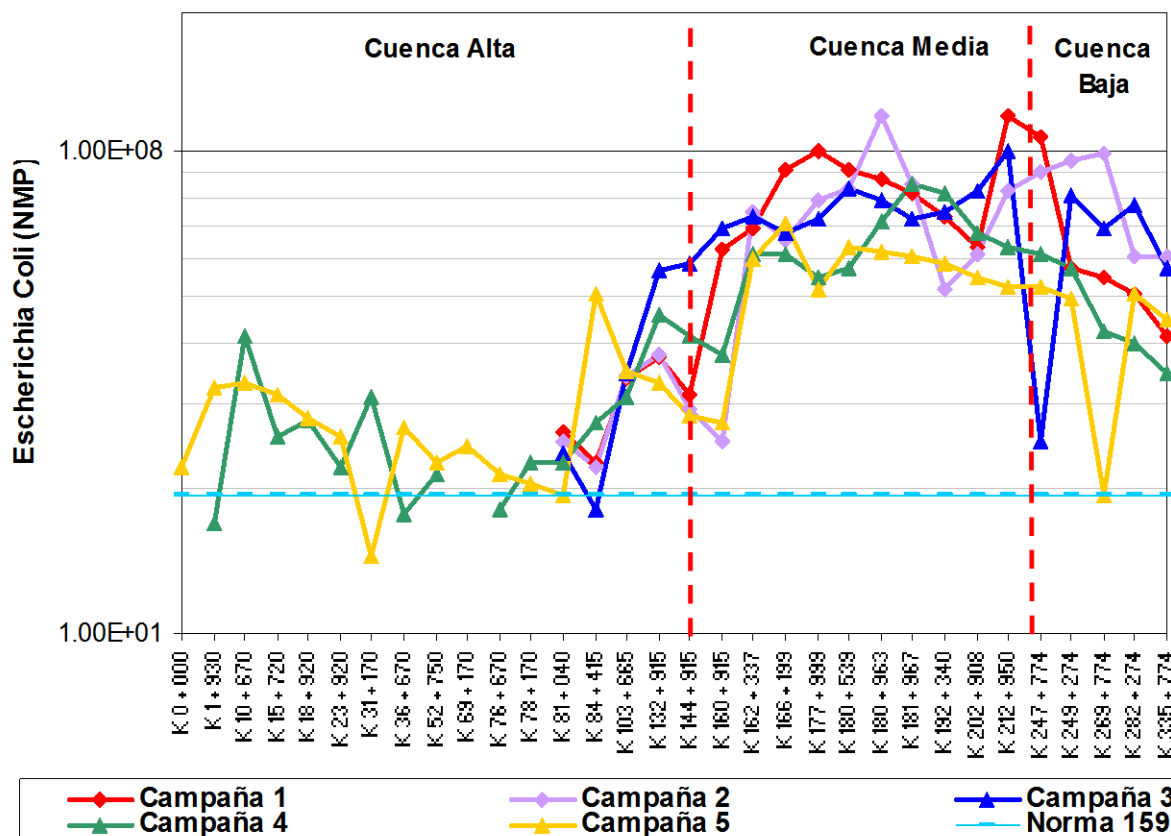


OXIGENO DISUELTO - CAMPAÑAS 1 - 5



ESCHERICHIA COLI

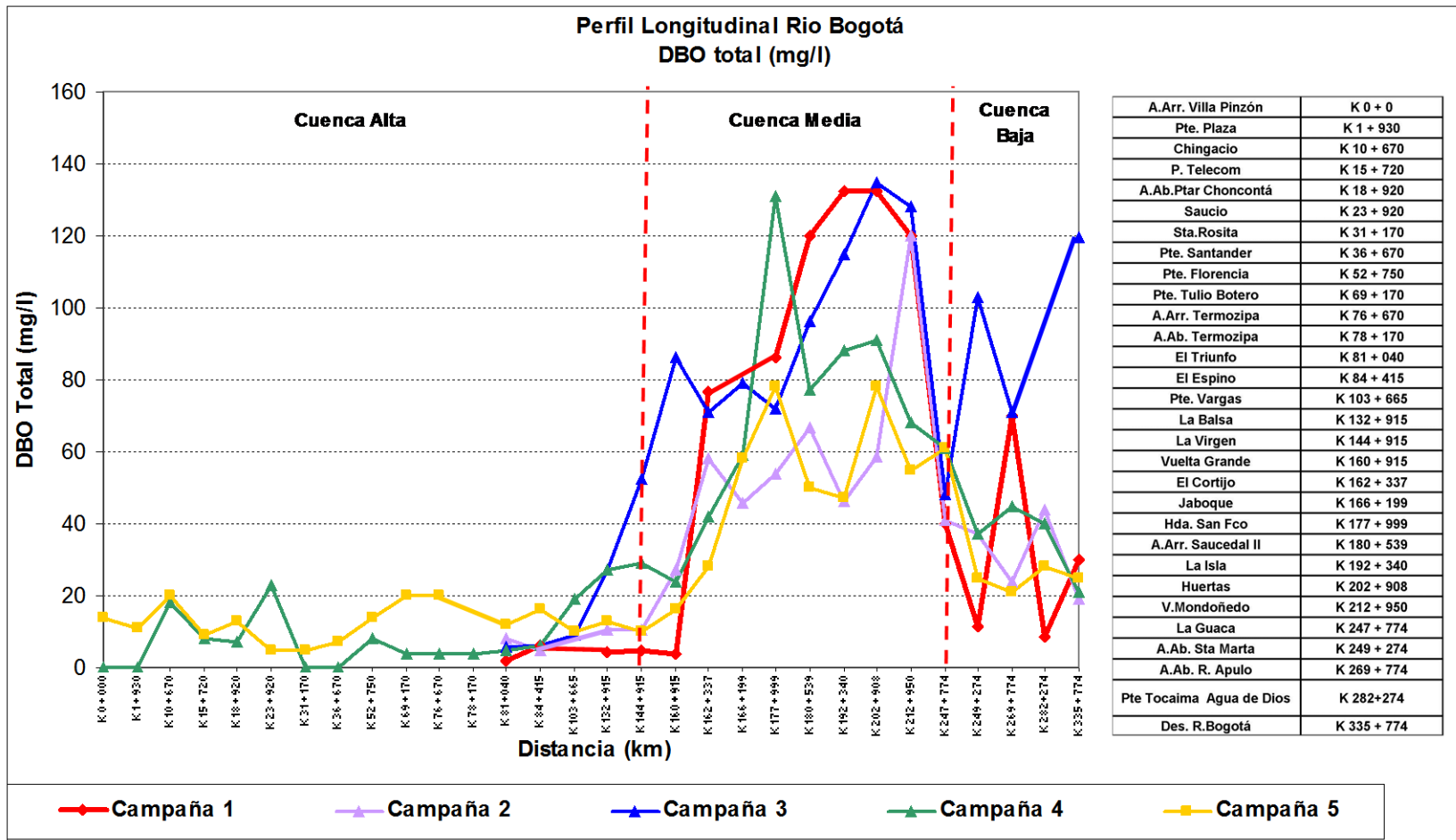
Perfil Longitudinal Río Bogotá
Escherichia Coli (NMP)



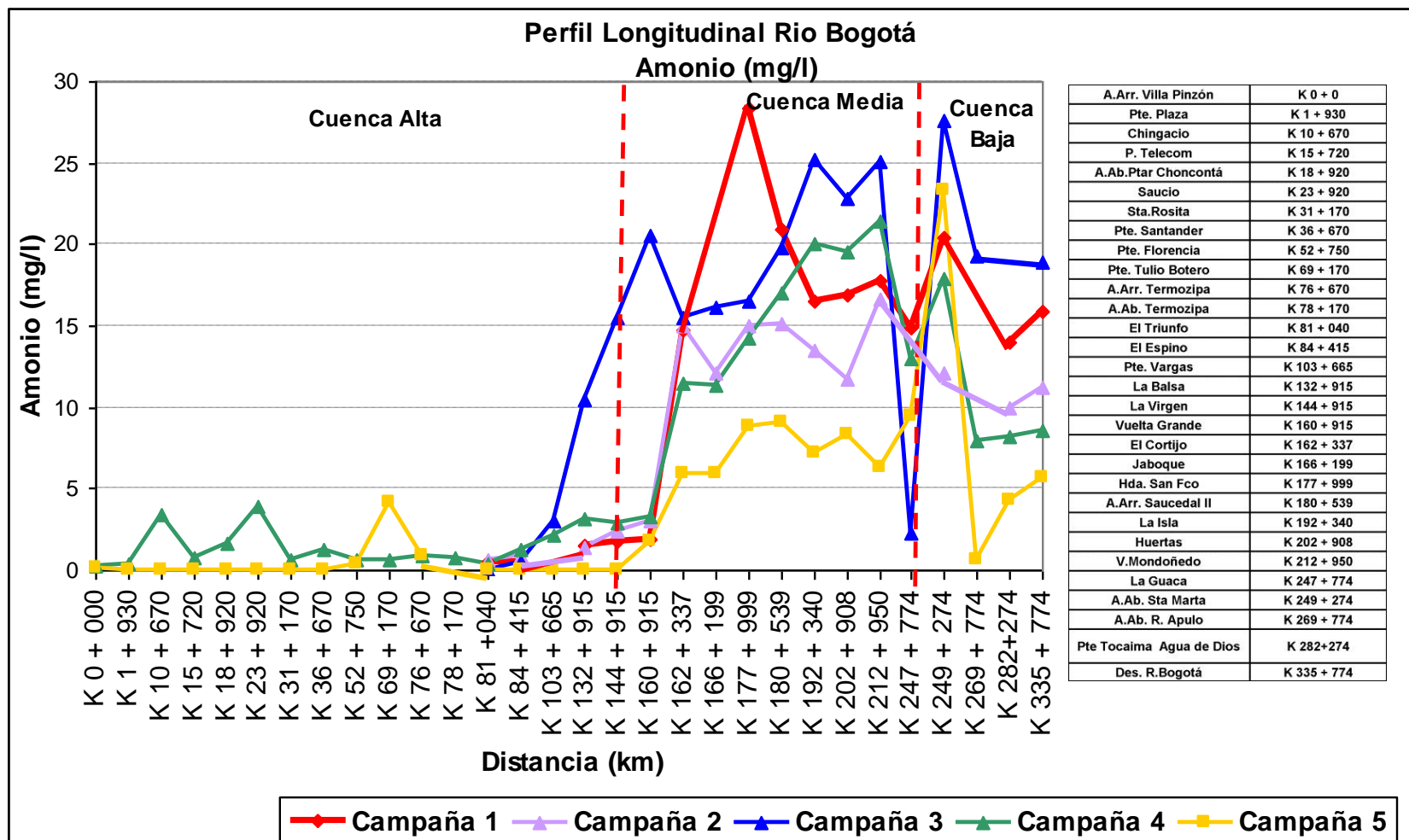
A.Arr. Villa Pinzón	K 0 + 0
Pte. Plaza	K 1 + 930
Chingacio	K 10 + 670
P. Telecom	K 15 + 720
A.Ab.Ptar Choncontá	K 18 + 920
Saucio	K 23 + 920
Sta.Rosita	K 31 + 170
Pte. Santander	K 36 + 670
Pte. Florencia	K 52 + 750
Pte. Tulio Botero	K 69 + 170
A.Arr. Termizipa	K 76 + 670
A.Ab. Termozipa	K 78 + 170
El Triunfo	K 81 + 40
El Espino	K 84 + 415
Pte. Vargas	K 103 + 665
La Balsa	K 132 + 915
La Virgen	K 144 + 915
Vuelta Grande	K 160 + 915
El Cortijo	K 162 + 337
Jaboque	K 166 + 199
Hda. San Fco	K 177 + 999
A.Arr. Saucedal II	K 180 + 539
B.Saucedal II	K 180 + 963
B.Patio Bonito II	K 181 + 967
La Isla	K 192 + 340
Huertas	K 202 + 908
V.Mondoñedo	K 212 + 950
La Guaca	K 247 + 774
A.Ab. Sta Marta	K 249 + 274
A.Ab. R. Apulo	K 269 + 774
Pte Tocaima Agua de Dio	K 282+274
Des. R.Bogotá	K 335 + 774



DBO₅ TOTAL



AMONIO



Campañas 1 y 2 de mediciones de calidad del agua y aforos RM



Oxígeno Río
Bogotá

Parámetros de campo y toma de
muestras



Campañas No 1 y 2 de mediciones de calidad del agua y aforos



Bogotá



Cambao

Coello

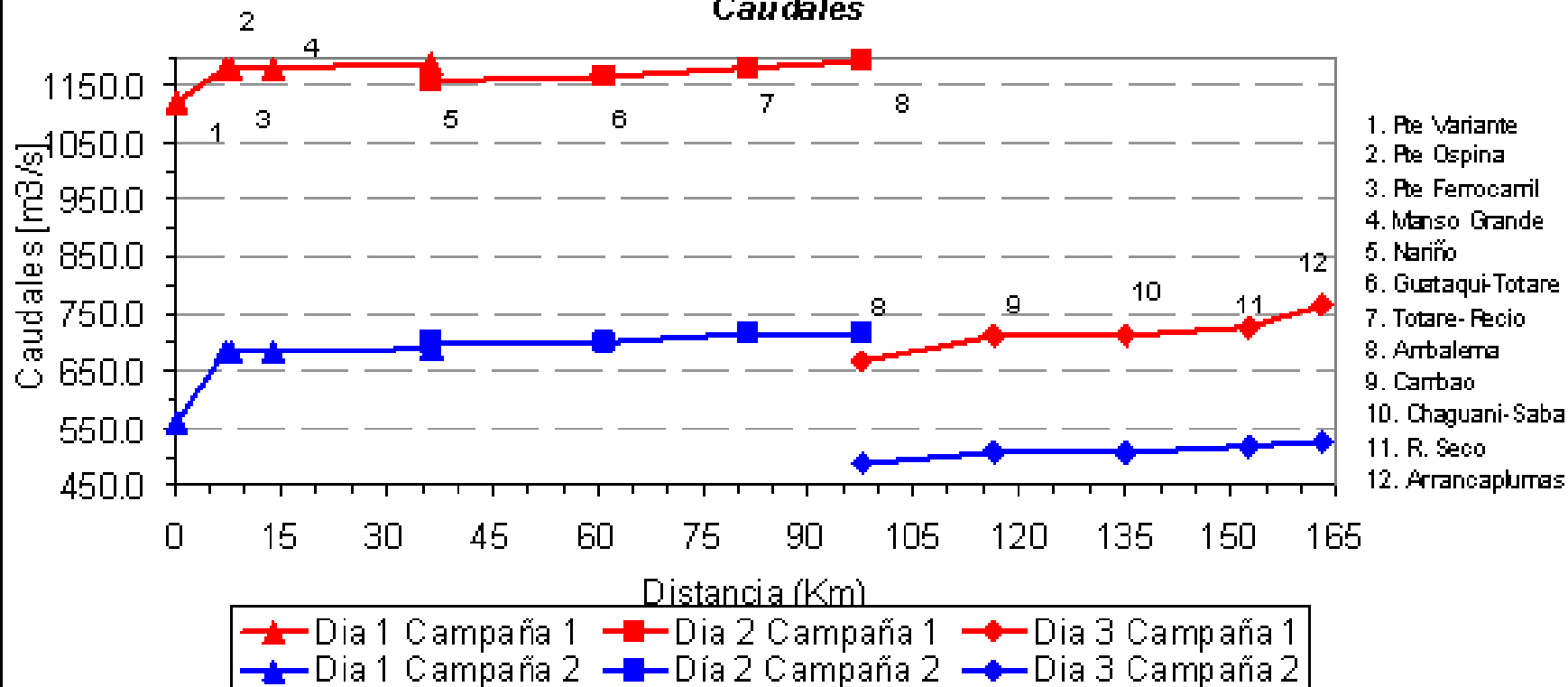
Aforos

Arrancaplumas

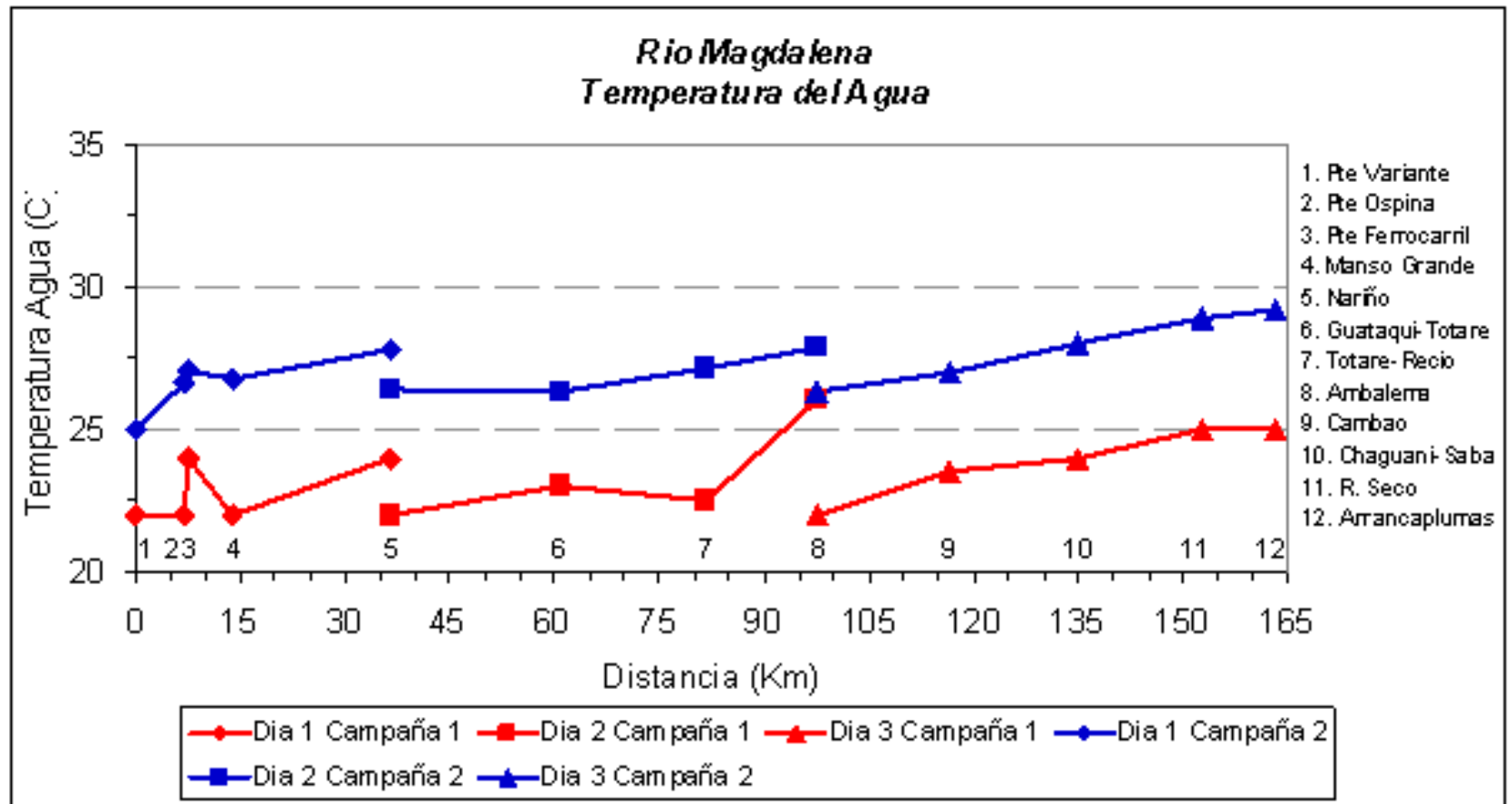


Campañas No 1 y 2 Caudales

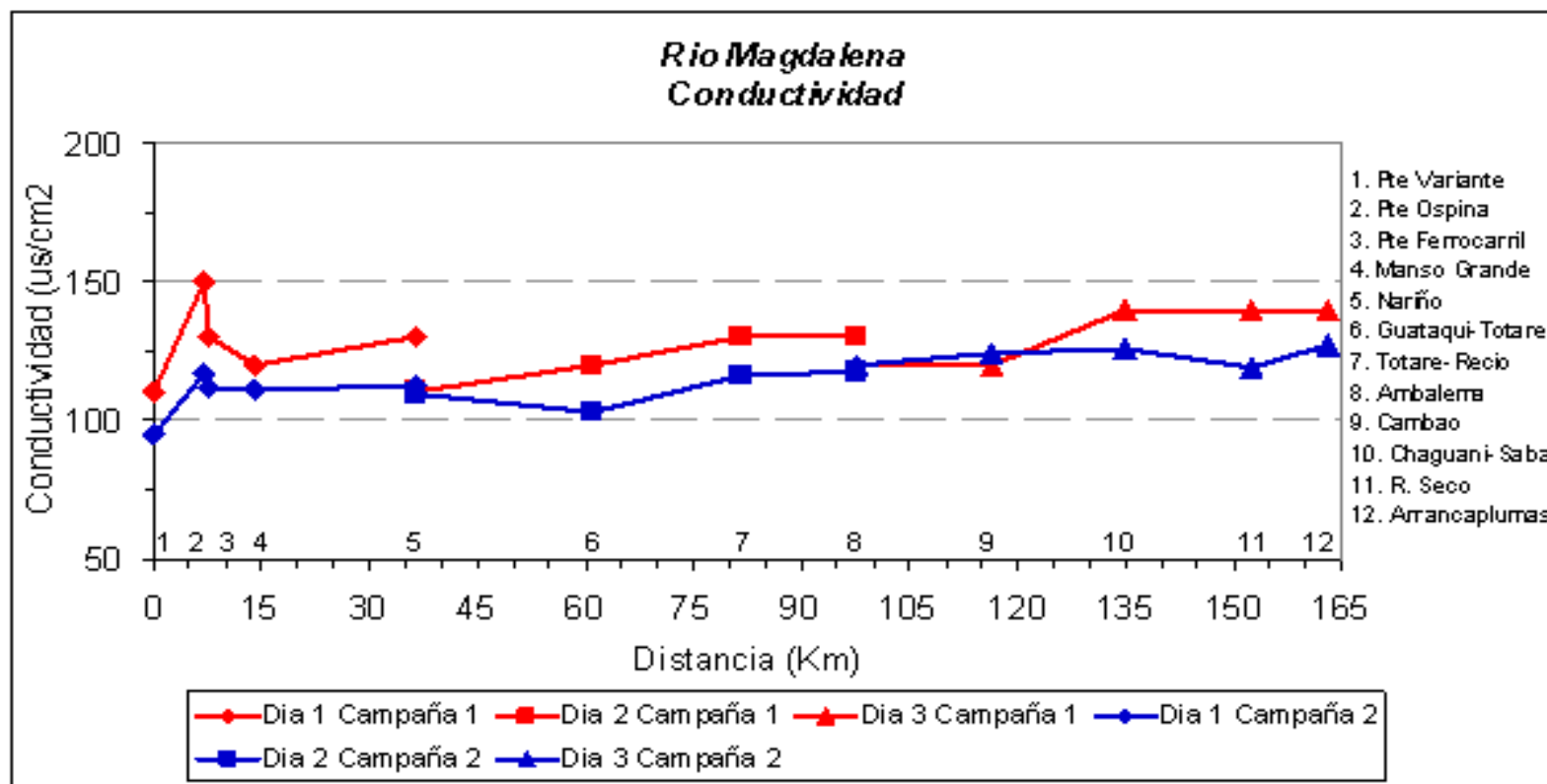
Rio Magdalena - Campañas 1 y 2
Caudales



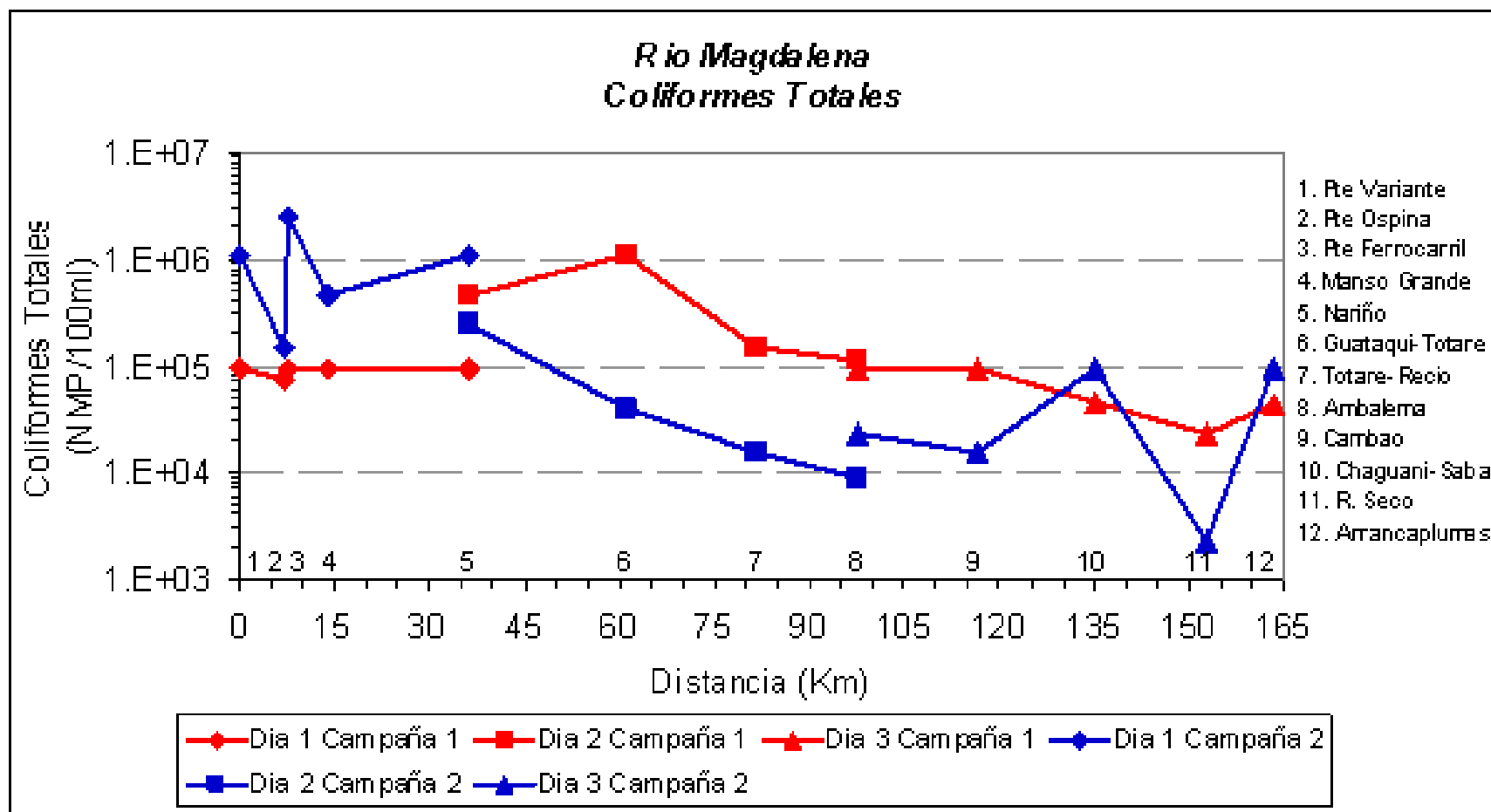
Campañas 1 y 2 - Temperatura



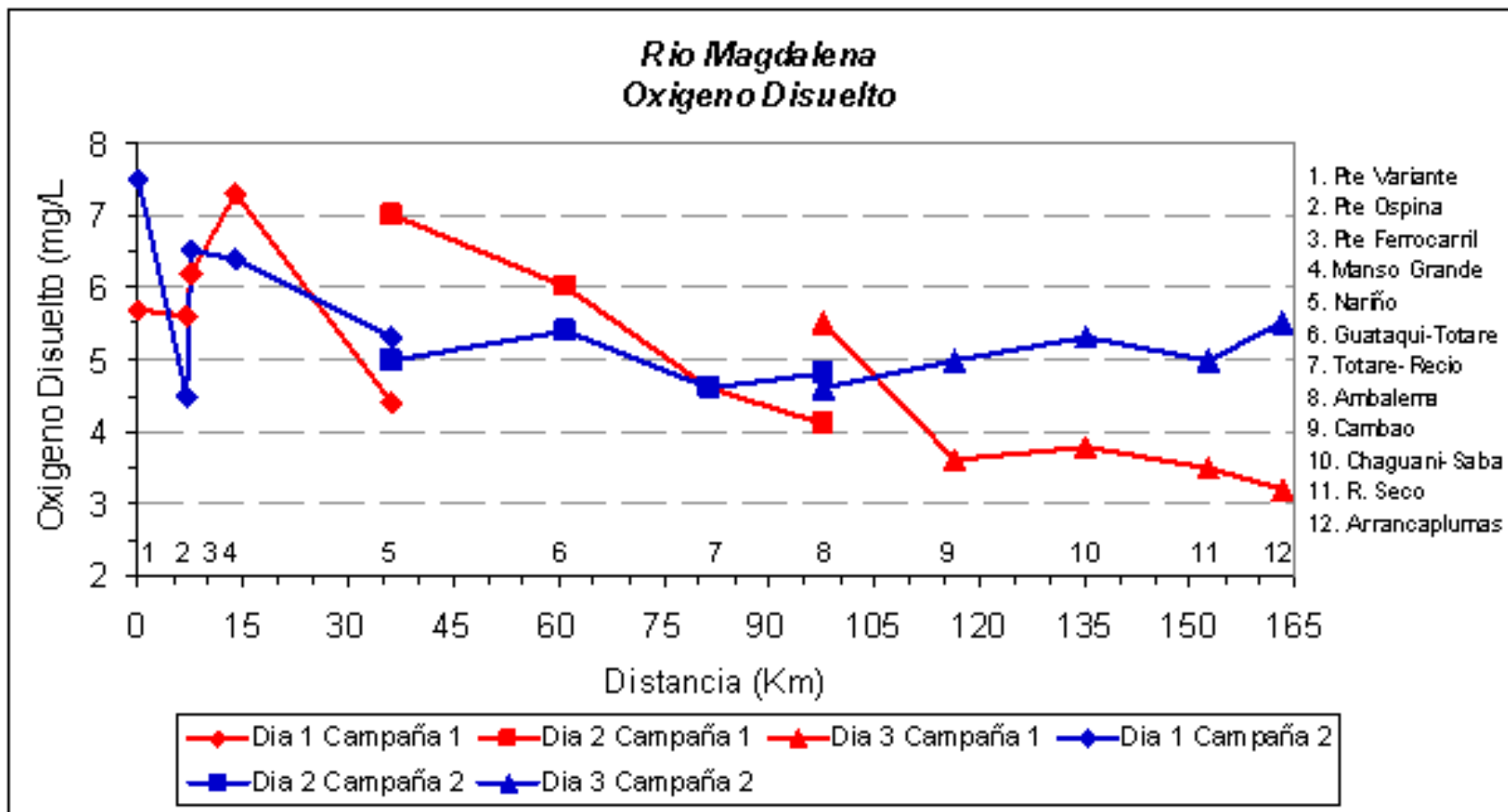
Campañas 1 y 2 - Conductividad



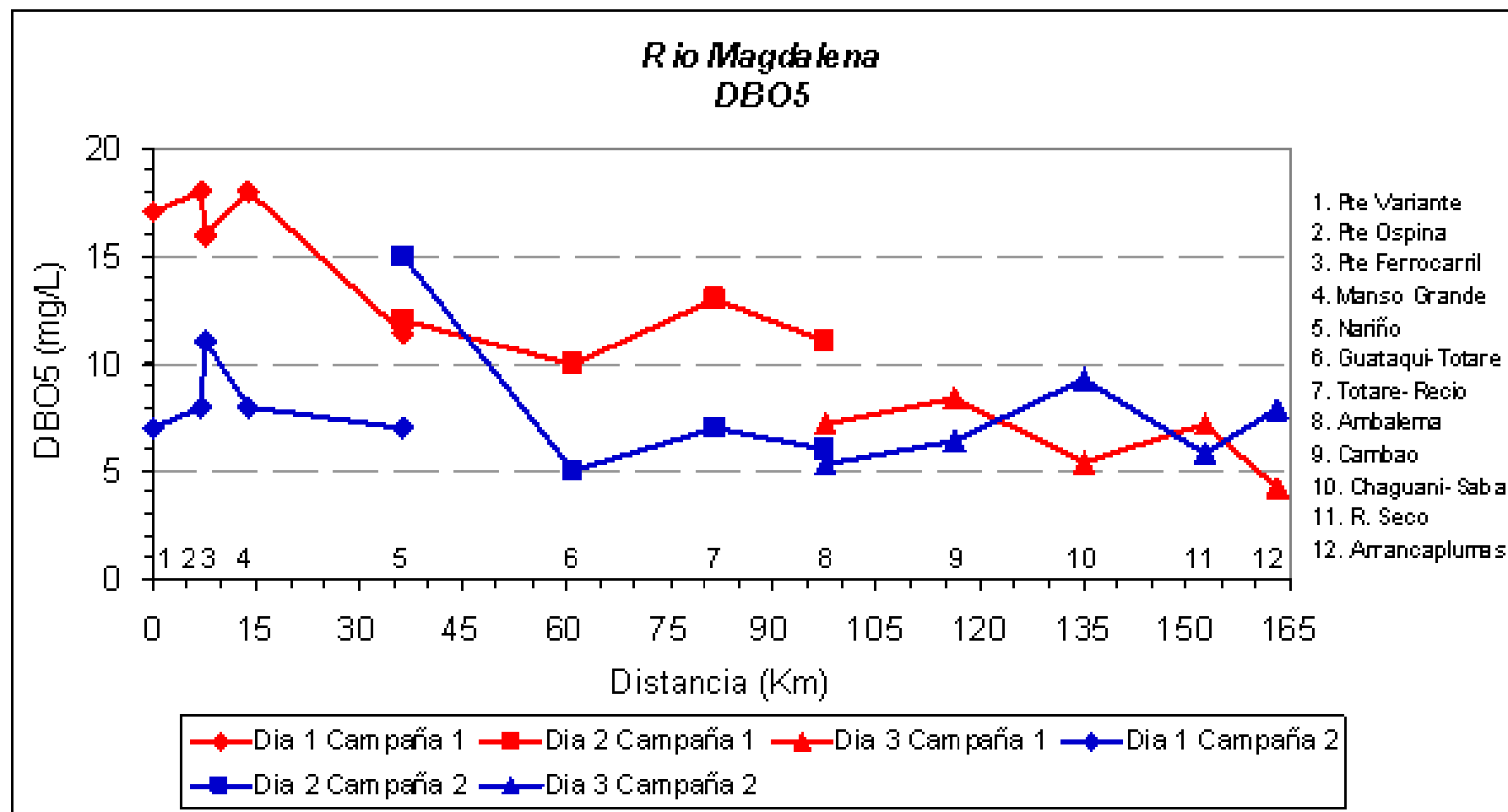
Campañas 1 y 2 – Coliformes Totales



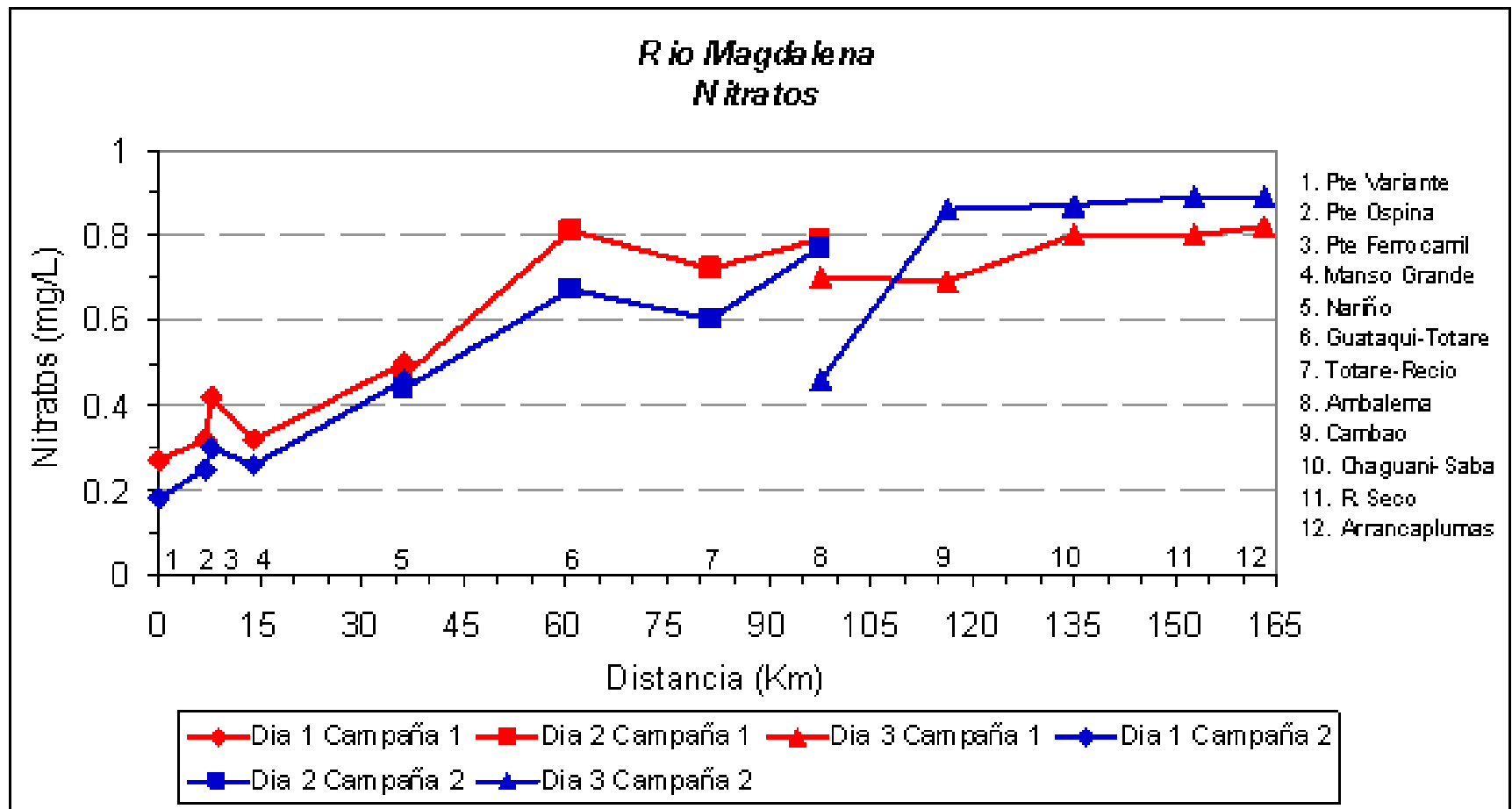
Campañas 1 y 2 – Oxígeno Disuelto



Campañas 1 y 2 – DBO



Campañas 1 y 2 Nitratos



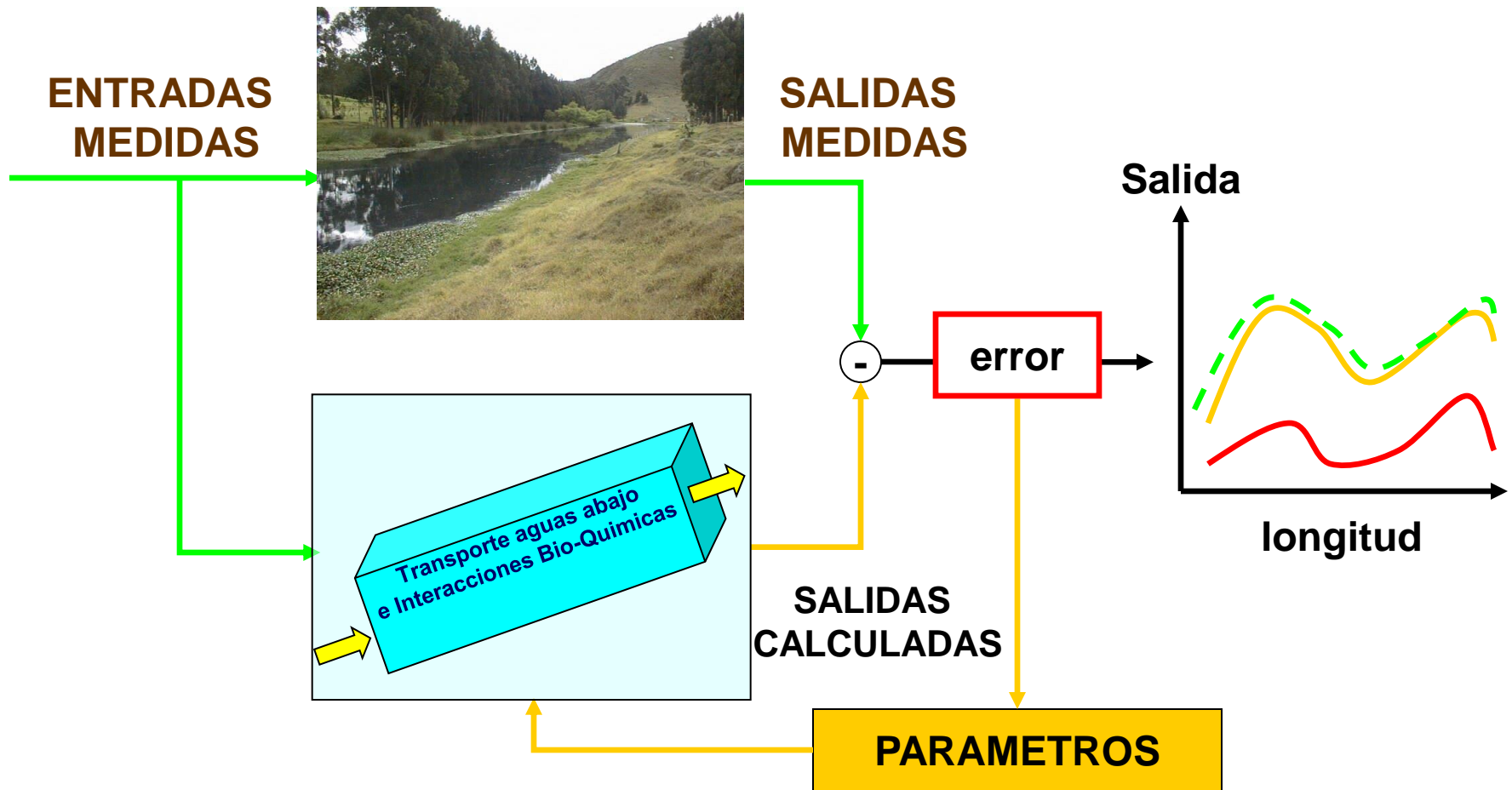
METODOLOGIA PROPUESTA

7. CALIBRACION Y VERIFICACION DEL MODELO

**MODELO CALIBRADO Y
VERICADO
PREDICTIVO (LISTO
PARA REALIZAR
SIMULACIONES DE
ESCENARIOS)**



CALIBRACION



CALIBRACIÓN

Son muchos los procesos que interactúan y las heterogeneidades espaciales y temporales que se desconocen

Se requiere mayor atención en el proceso de calibración y más cuidado en la proposición de soluciones determinísticas

Se ha vuelto una práctica común incluir límites de confianza con los resultados de los modelos

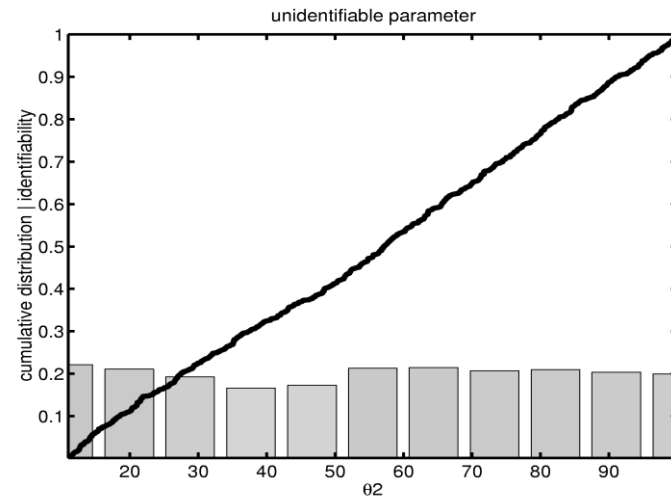
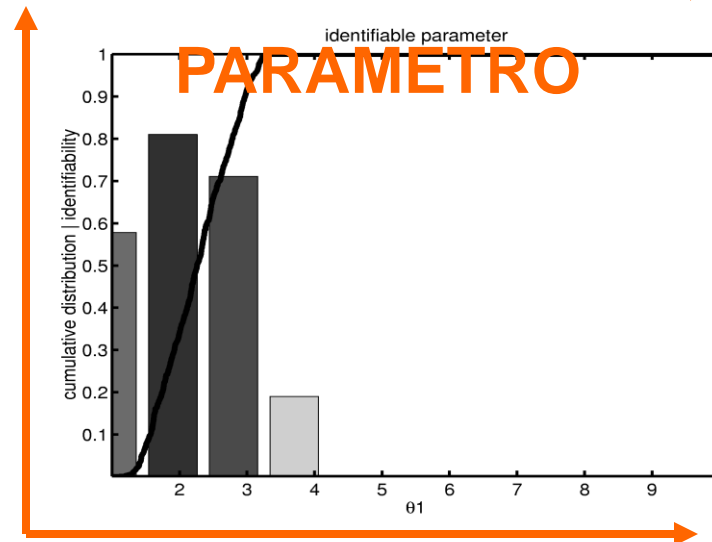
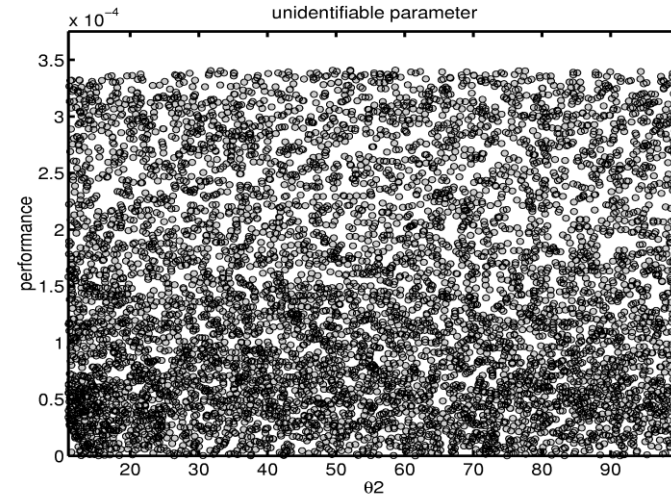
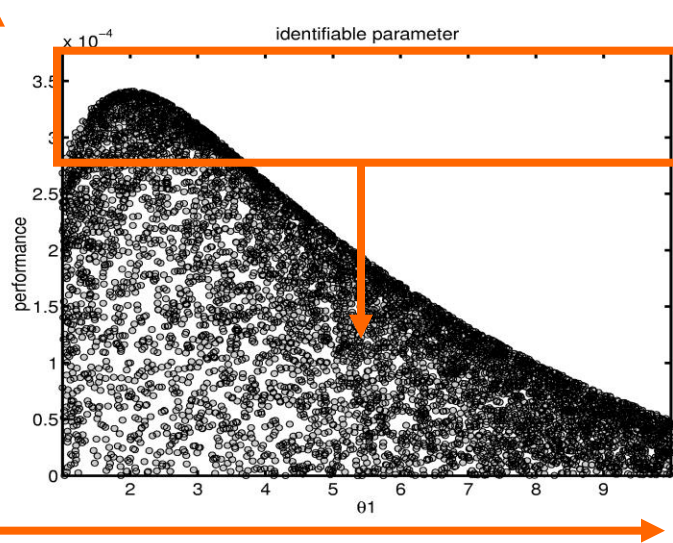


Es necesario y honesto hacer un análisis de incertidumbre



MEDIDA DE IDENTIFIABILIDAD

COMPORTAMIENTO

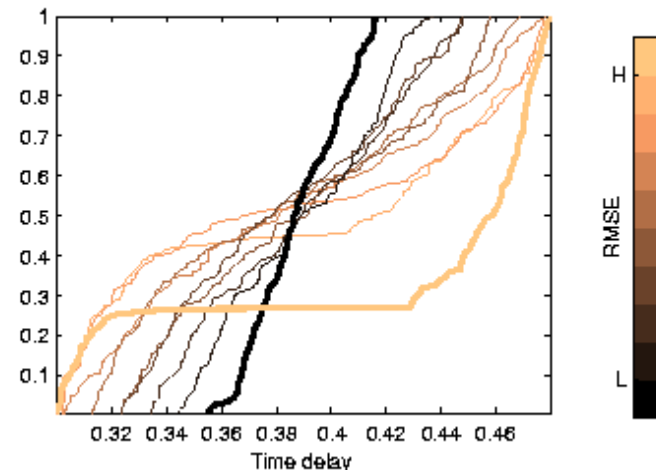
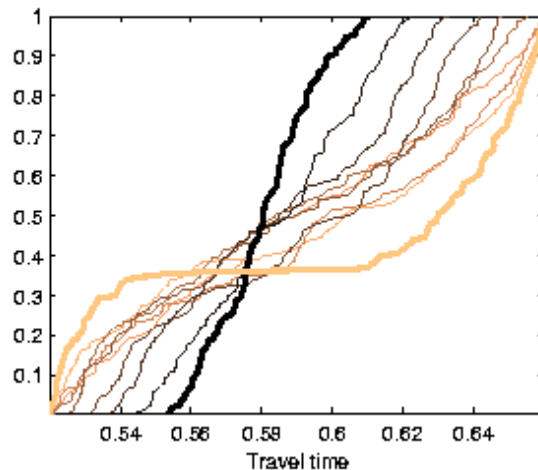
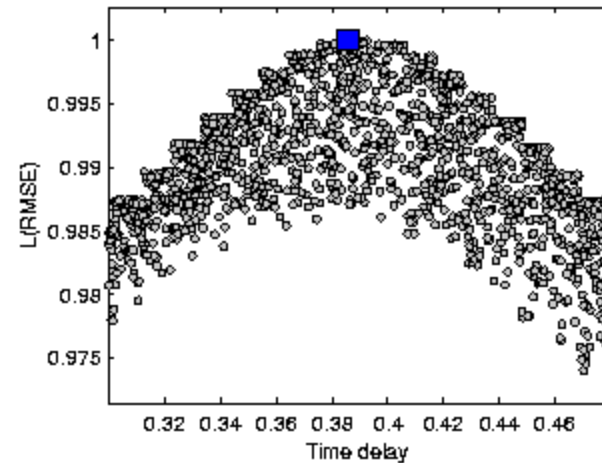
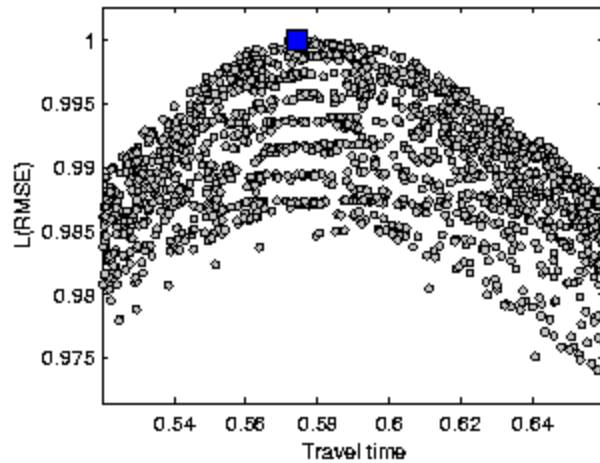


PARAMETRO

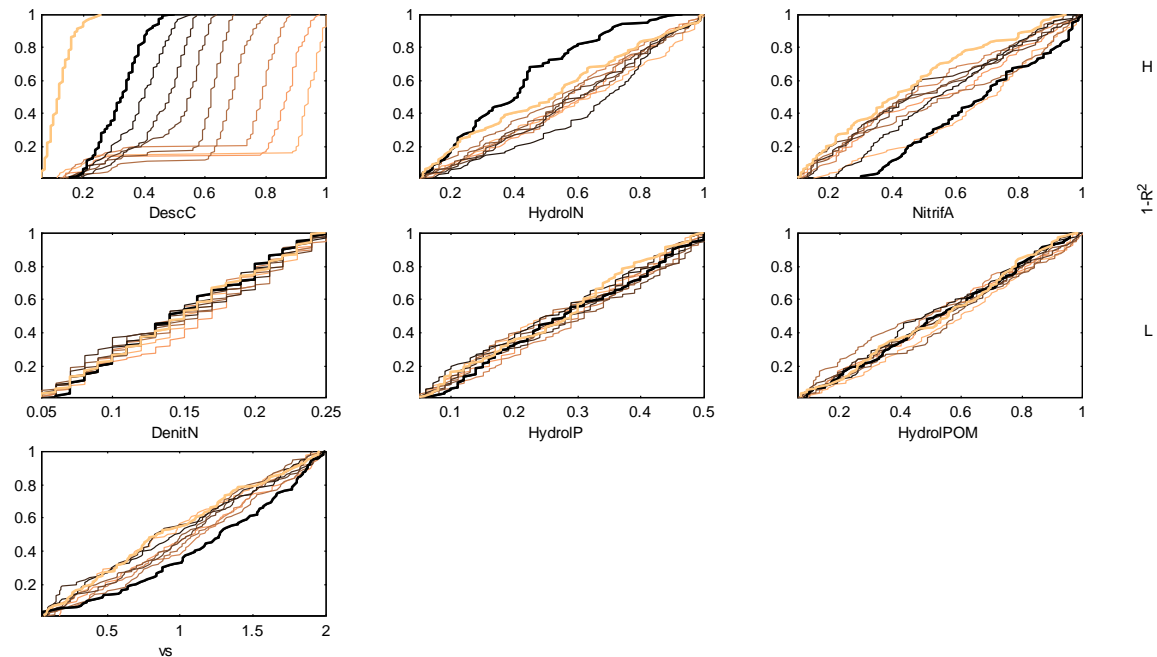
PARAMETRO



Identificación y sensibilidad modelo de 2 parámetros



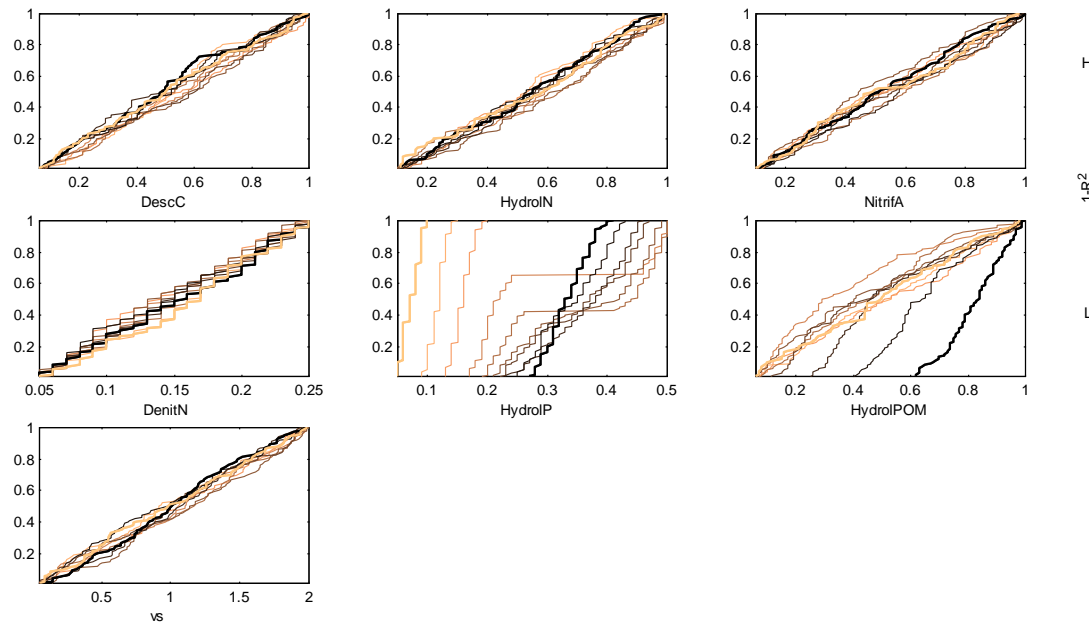
SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA - GLUE



Función objetivo
para OD



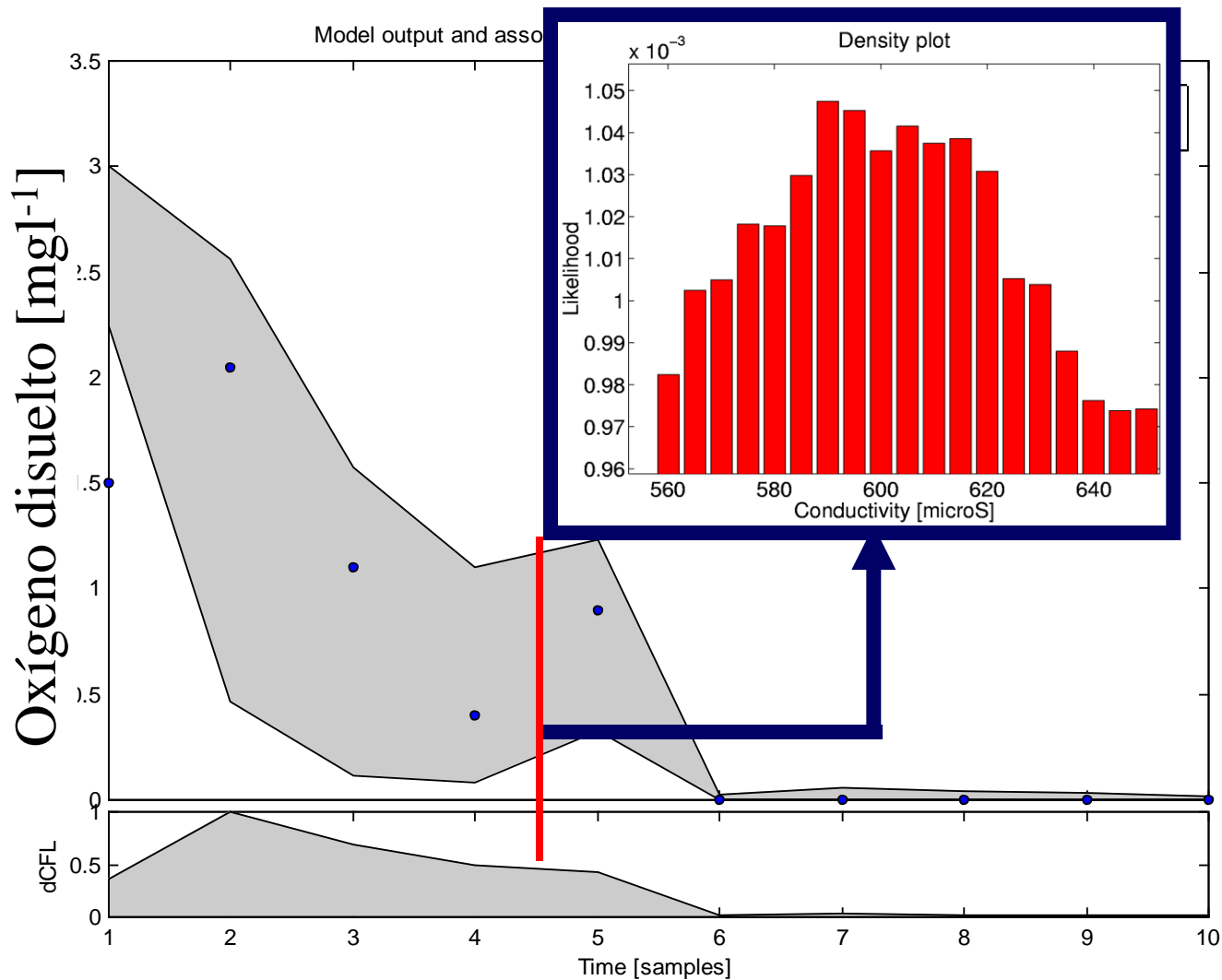
SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA - GLUE



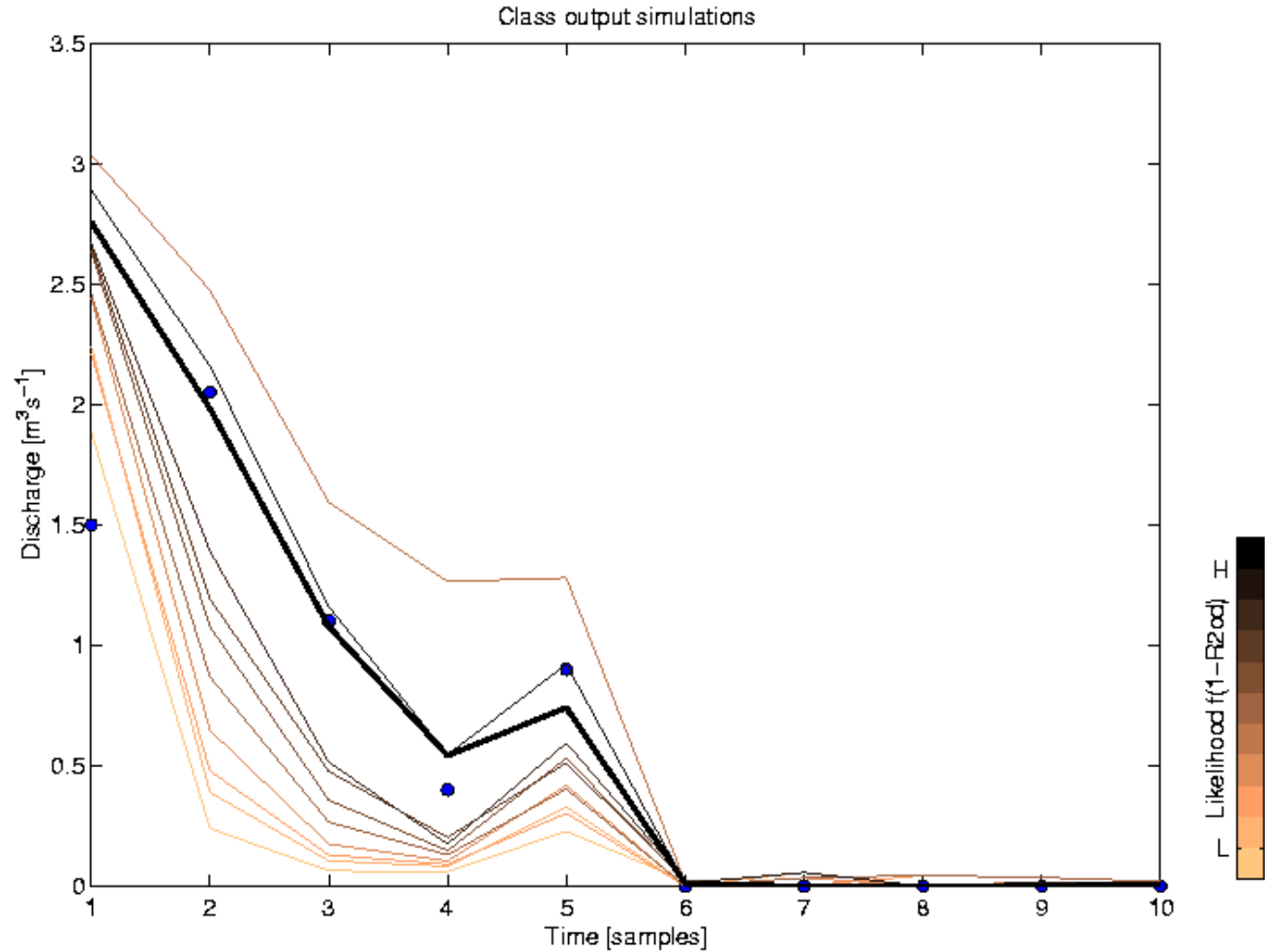
Función objetivo
para SRP



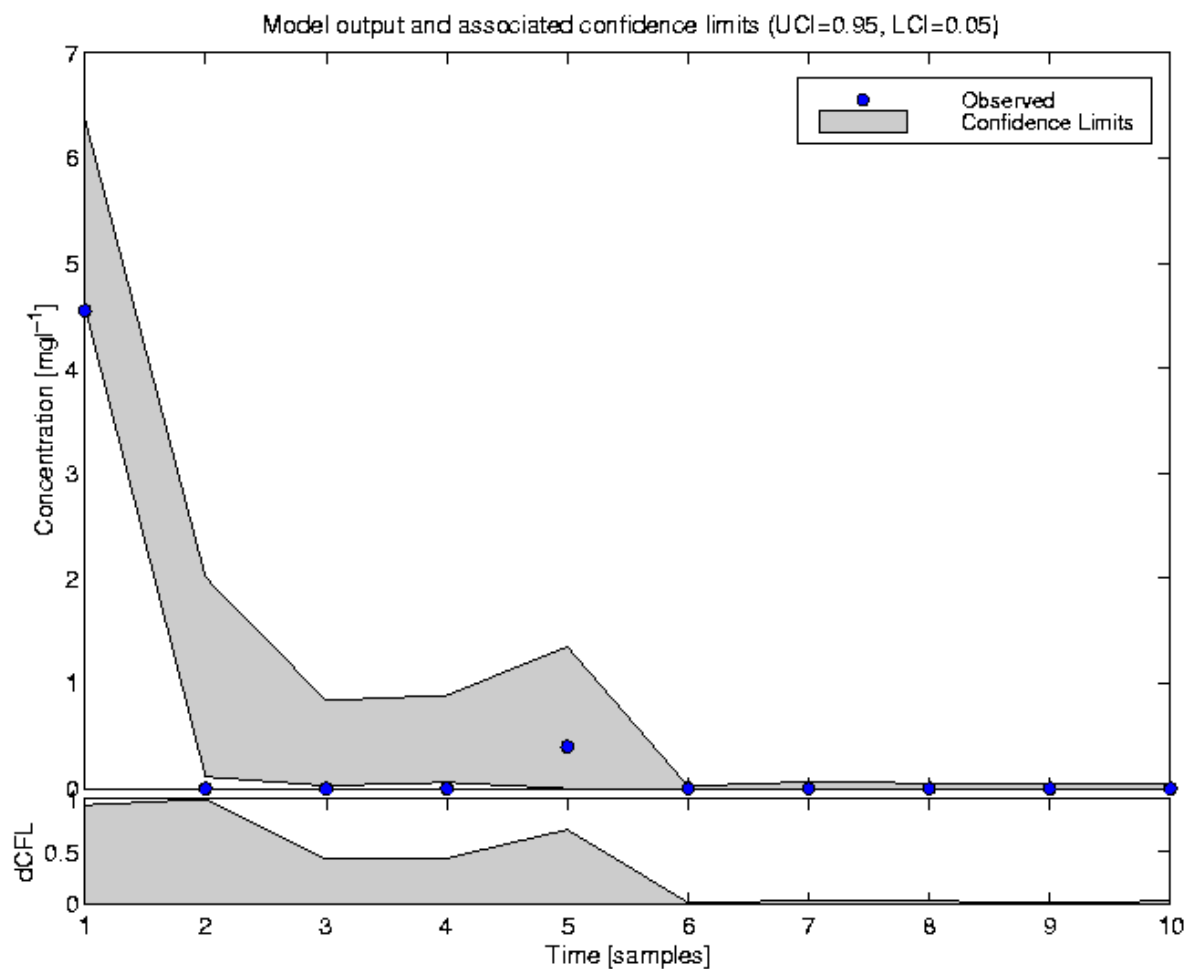
Banda de incertidumbre GLUE



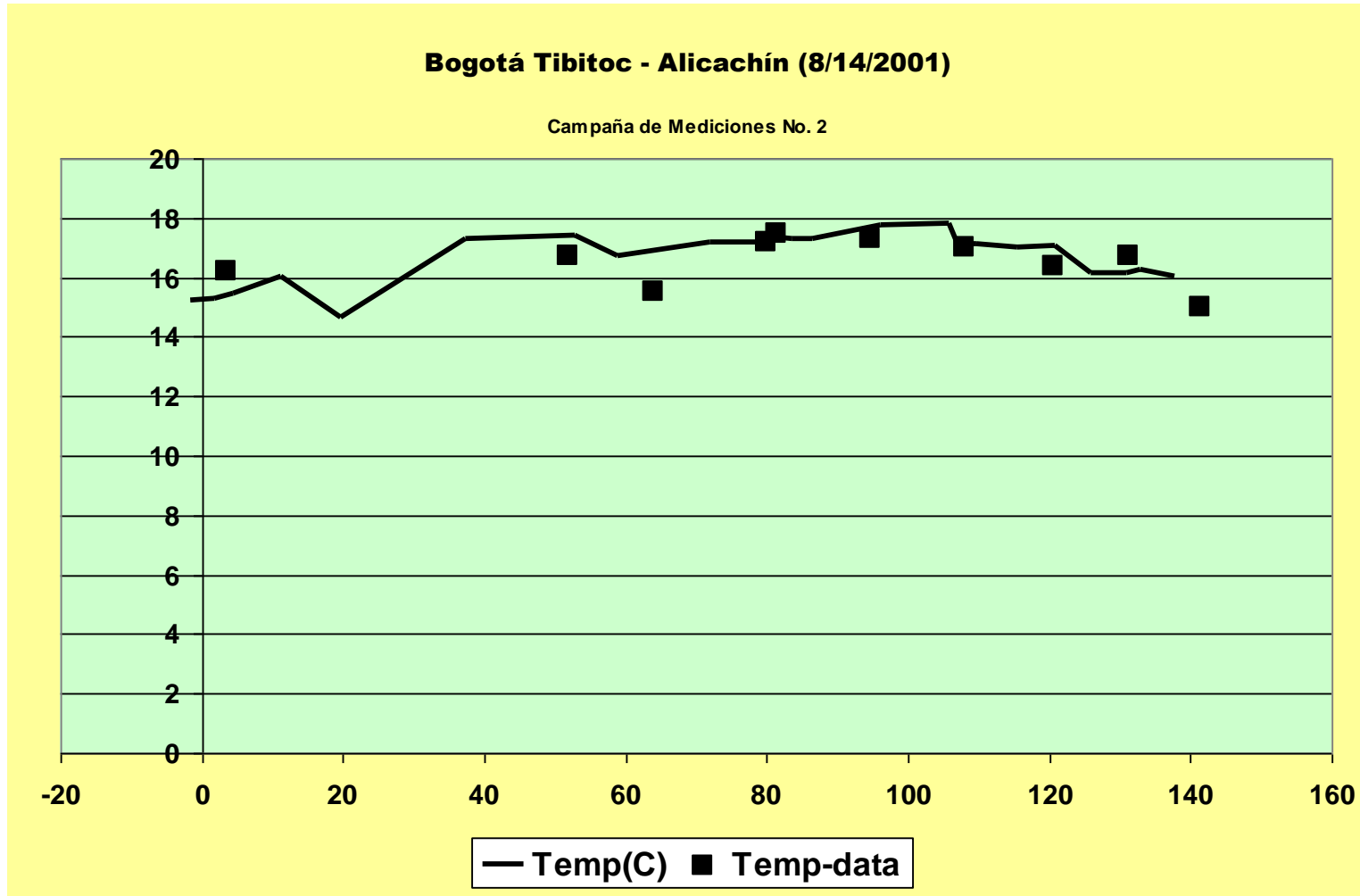
CALIBRACIÓN



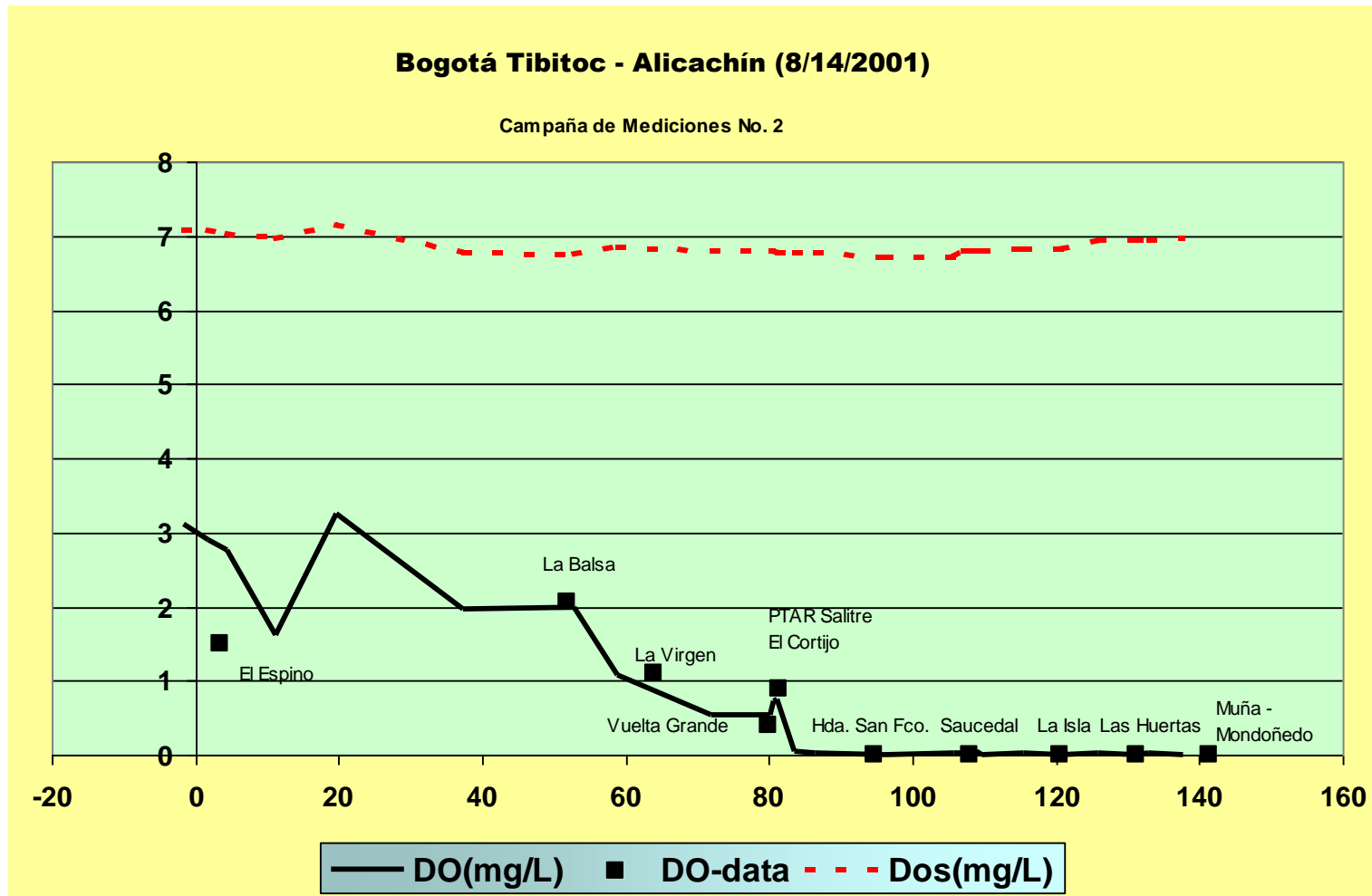
VERIFICACIÓN



TEMPERATURA CAMP - 2



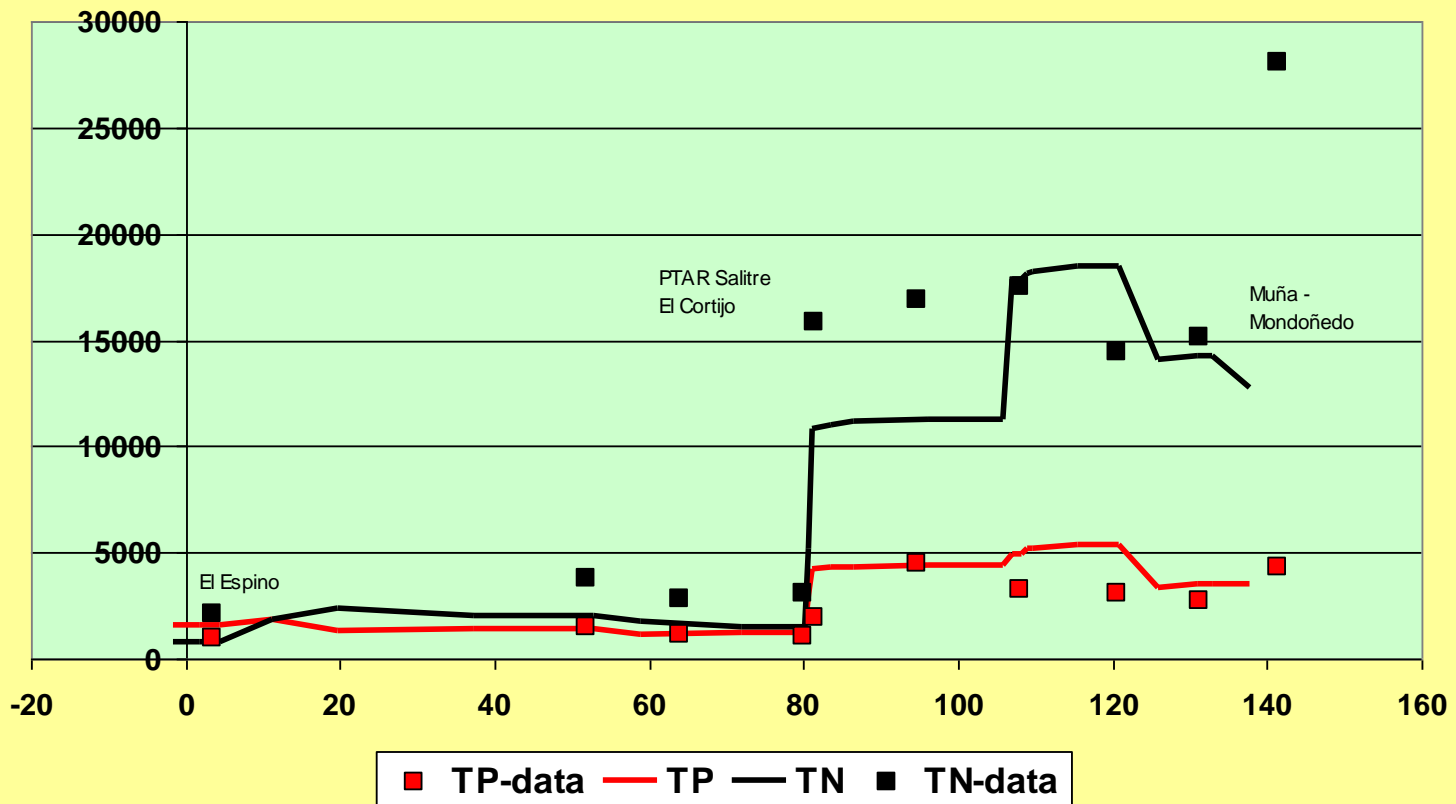
OXIGENO DISUELTO CAMP - 2



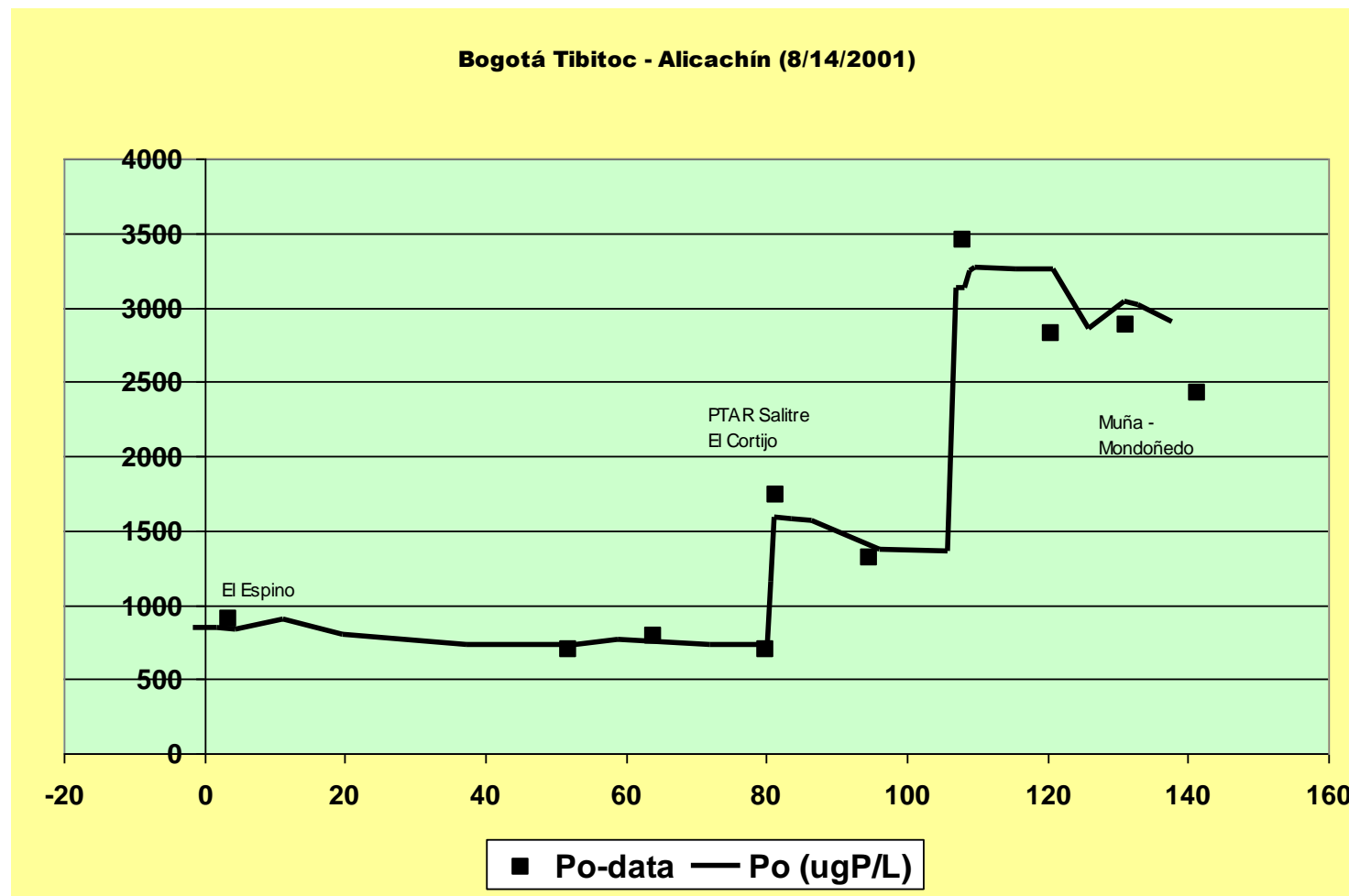
TN Y TP CAMP - 2

Bogotá Tibitoc - Alicachín (8/14/2001)

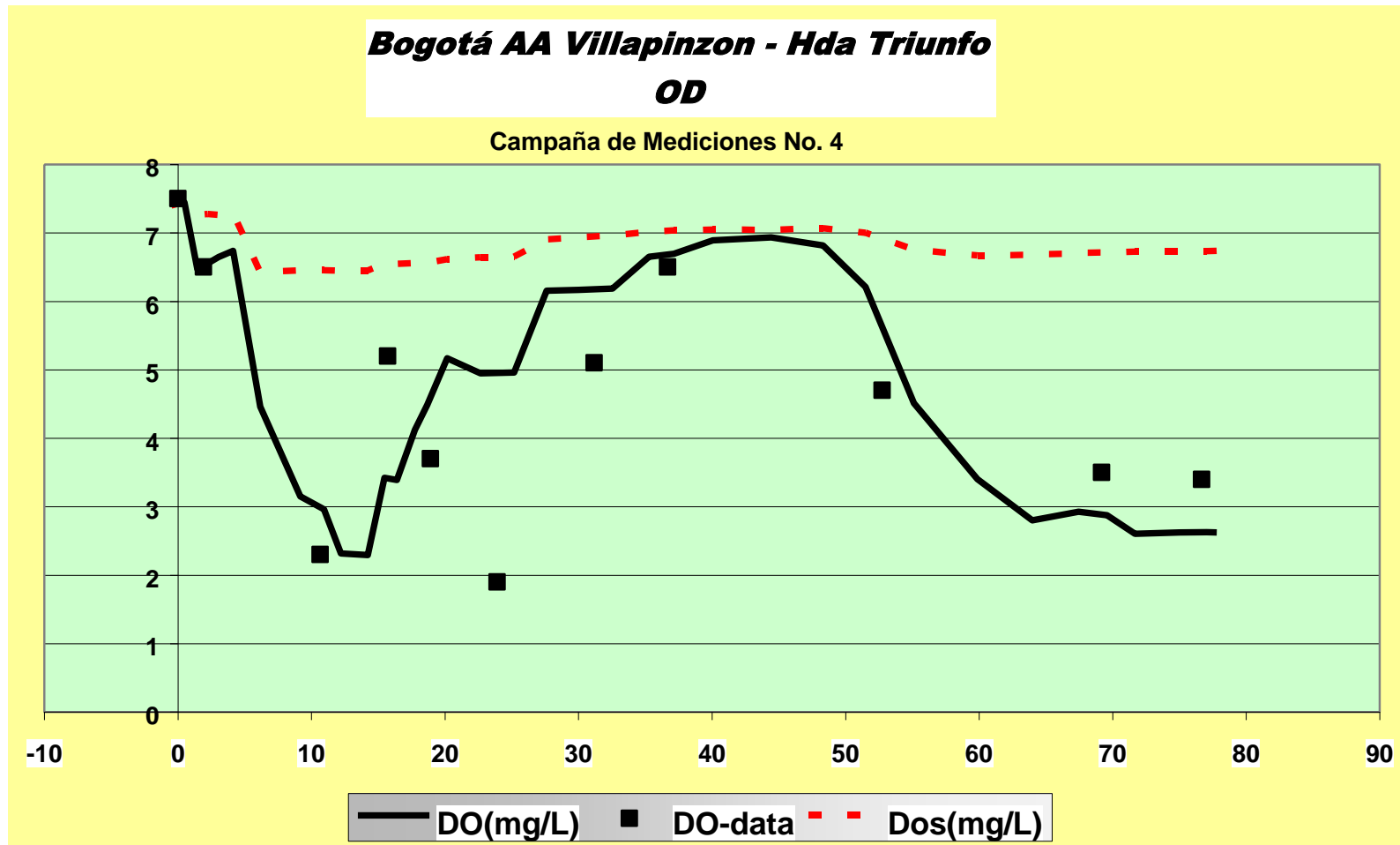
Campaña de Mediciones No. 2



FOSFORO ORGANICO CAMP - 2

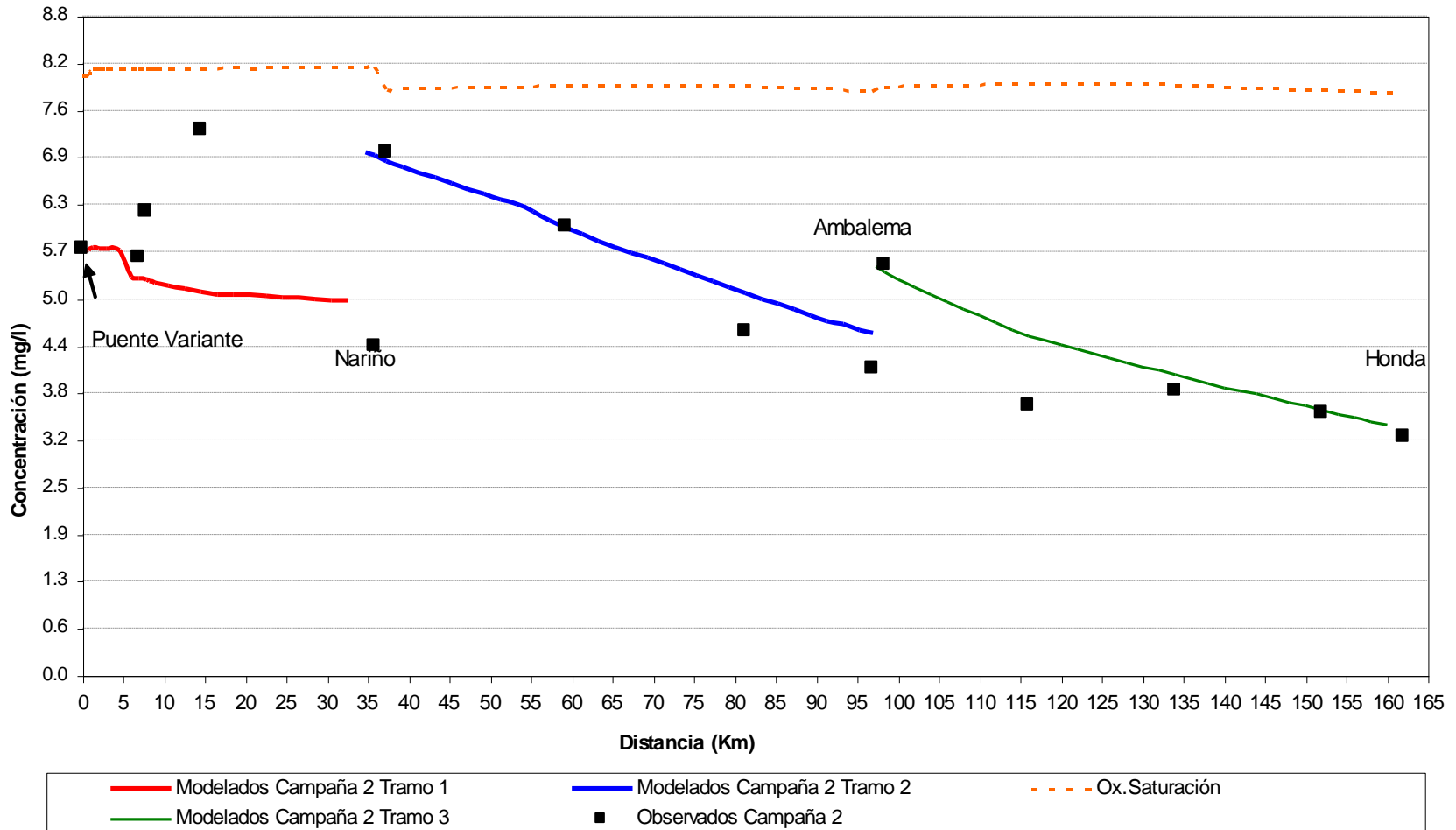


VERIFICACION CAMPAÑA 4 CUENCA ALTA



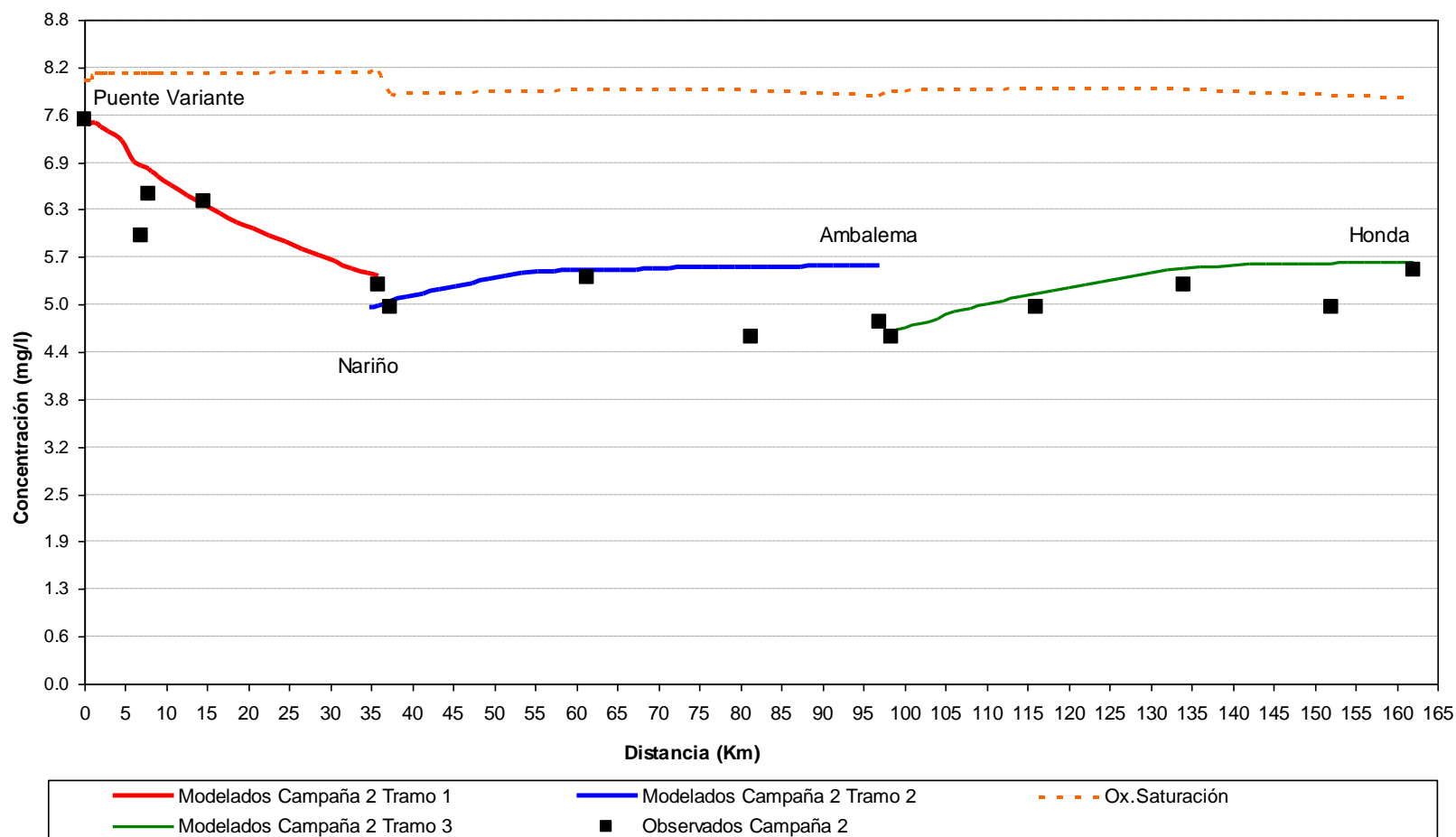
Oxígeno disuelto C1 RM

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN CAMPAÑA1 Río Magdalena Girardot - Honda Oxígeno Disuelto



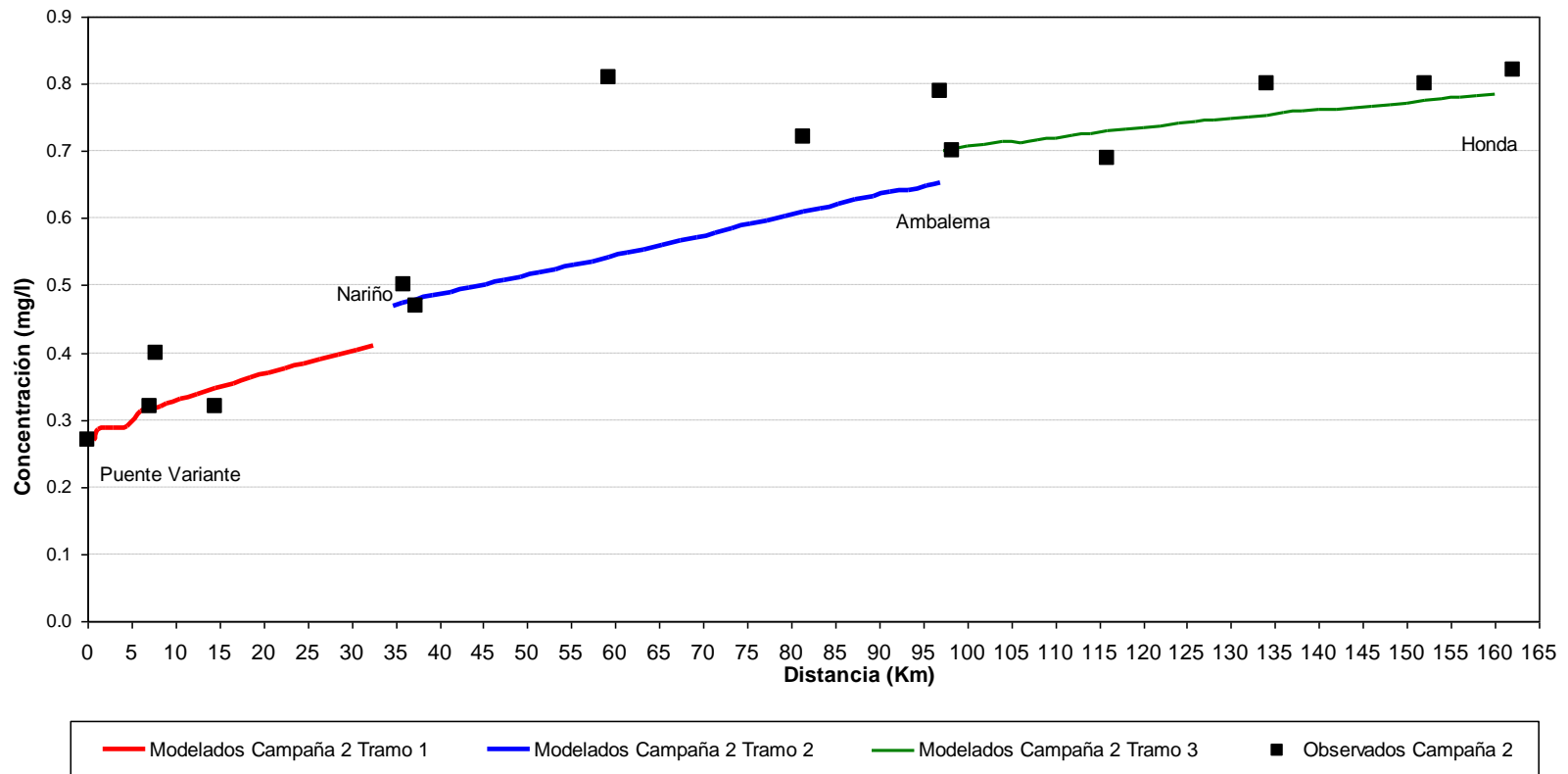
Oxígeno disuelto C2 RM

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN CAMPAÑA 2
Río Magdalena Girardot - Honda
Oxígeno Disuelto



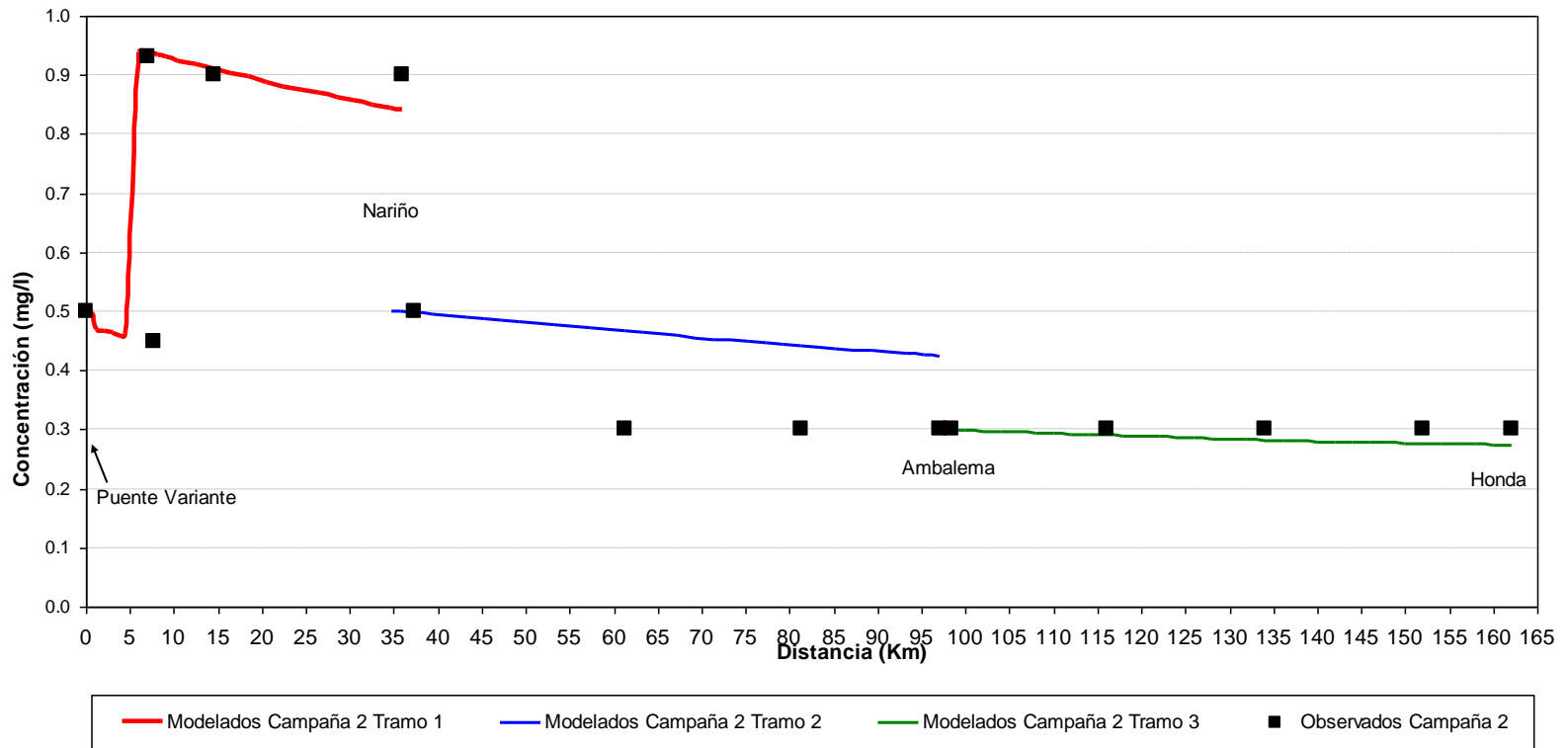
Nitratos C1 RM

RESULTADOS CALIBRACIÓN CAMPAÑA 1
Río Magdalena Girardot - Honda
Nitratos



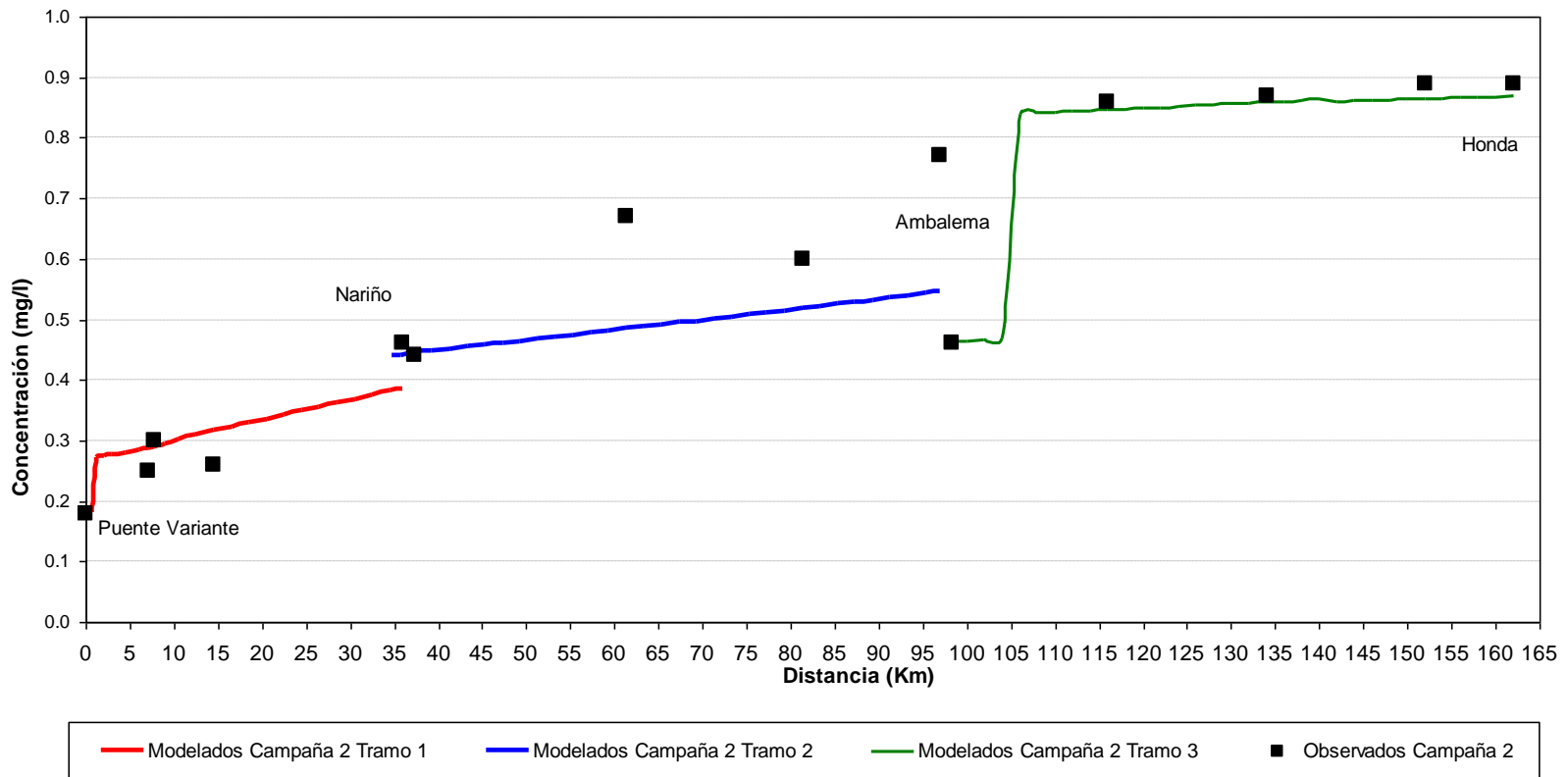
Amonio C2 RM

RESULTADOS CALIBRACIÓN CAMPAÑA 2 Río Magdalena Girardot - Honda Amonio



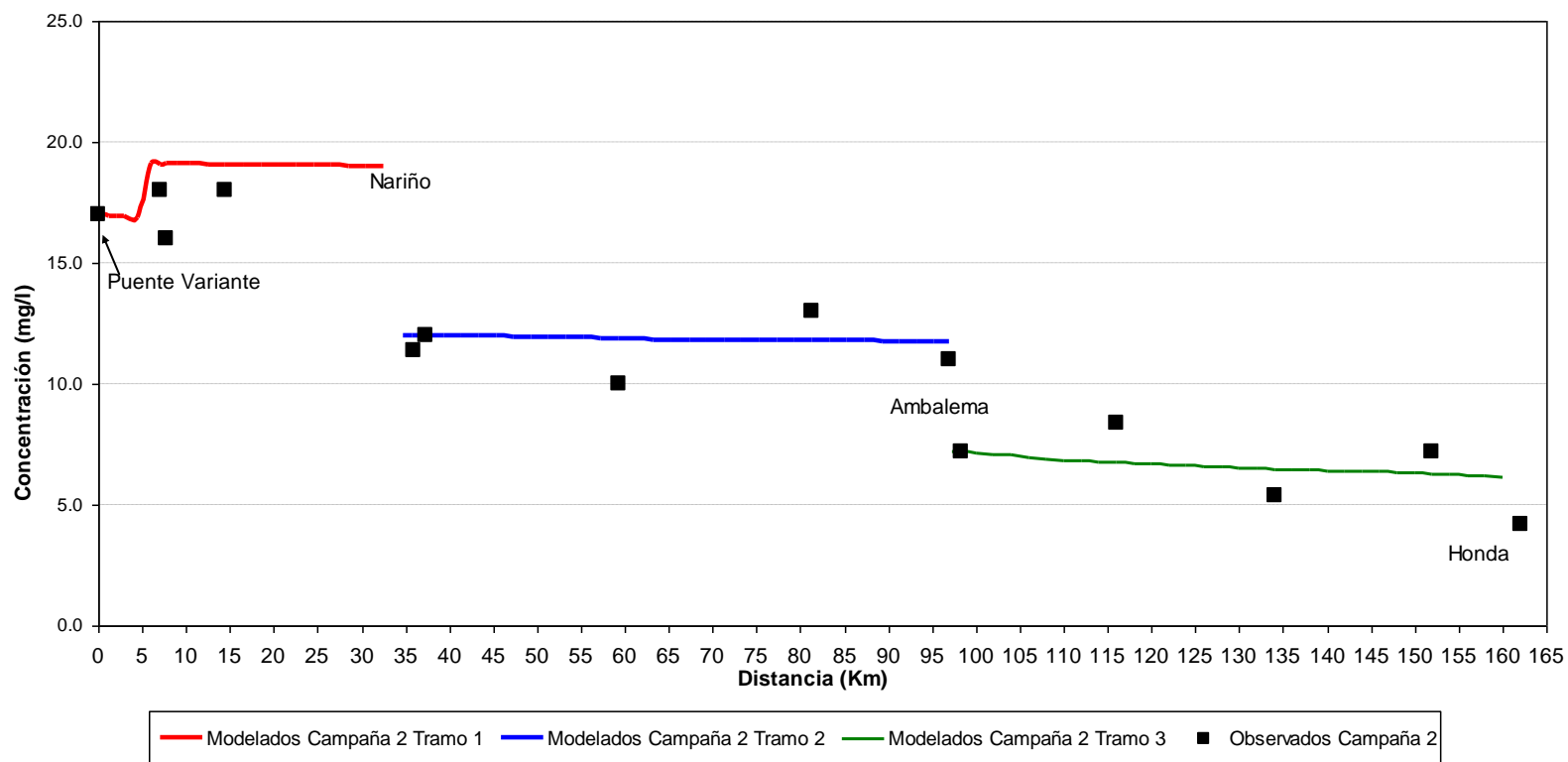
Nitratos C1 RM

RESULTADOS CALIBRACIÓN CAMPAÑA 2 Río Magdalena Girardot - Honda Nitratos

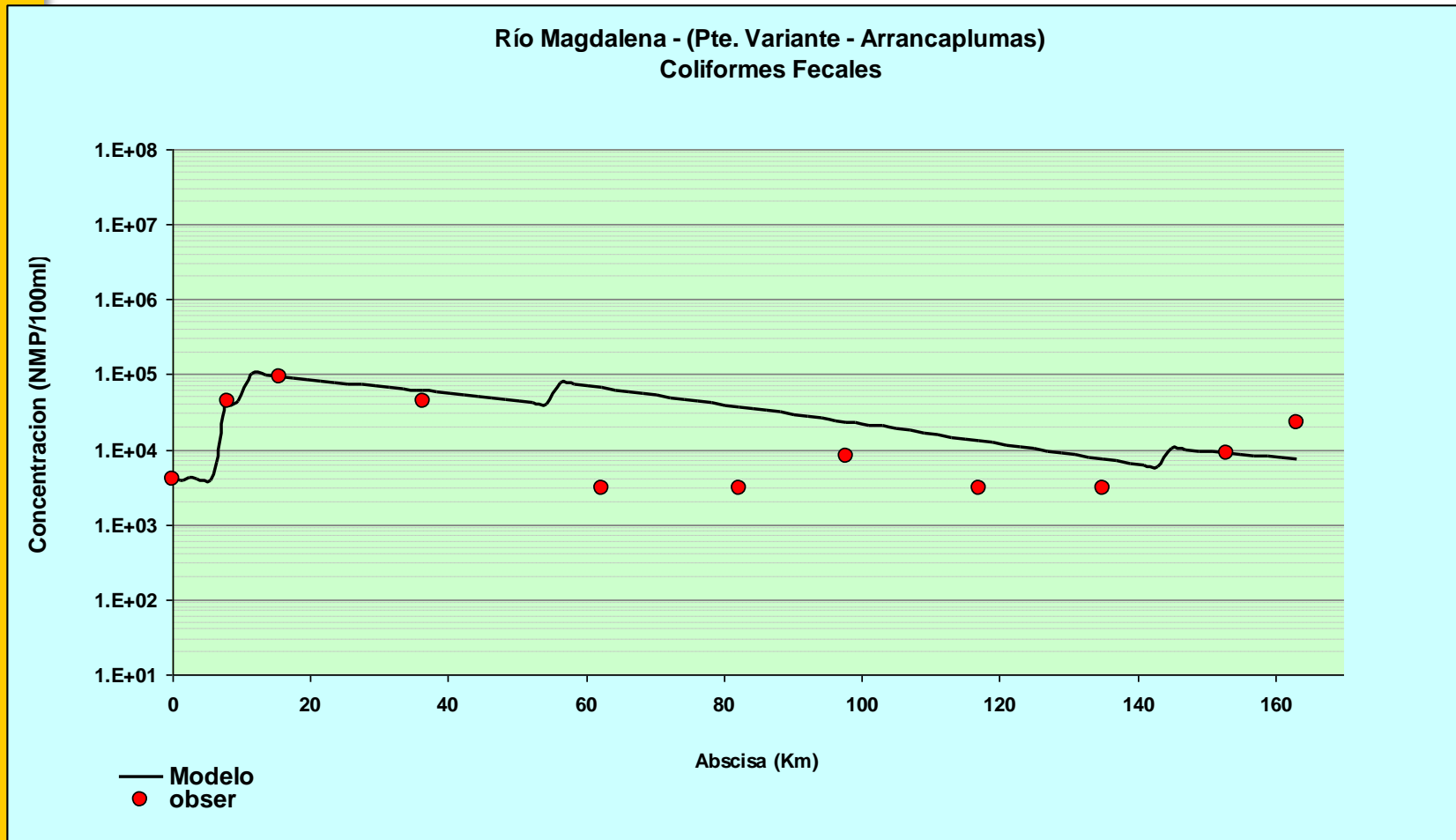


DBO C1 RM

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN CAMPAÑA 1 Río Magdalena Girardot - Honda DBO

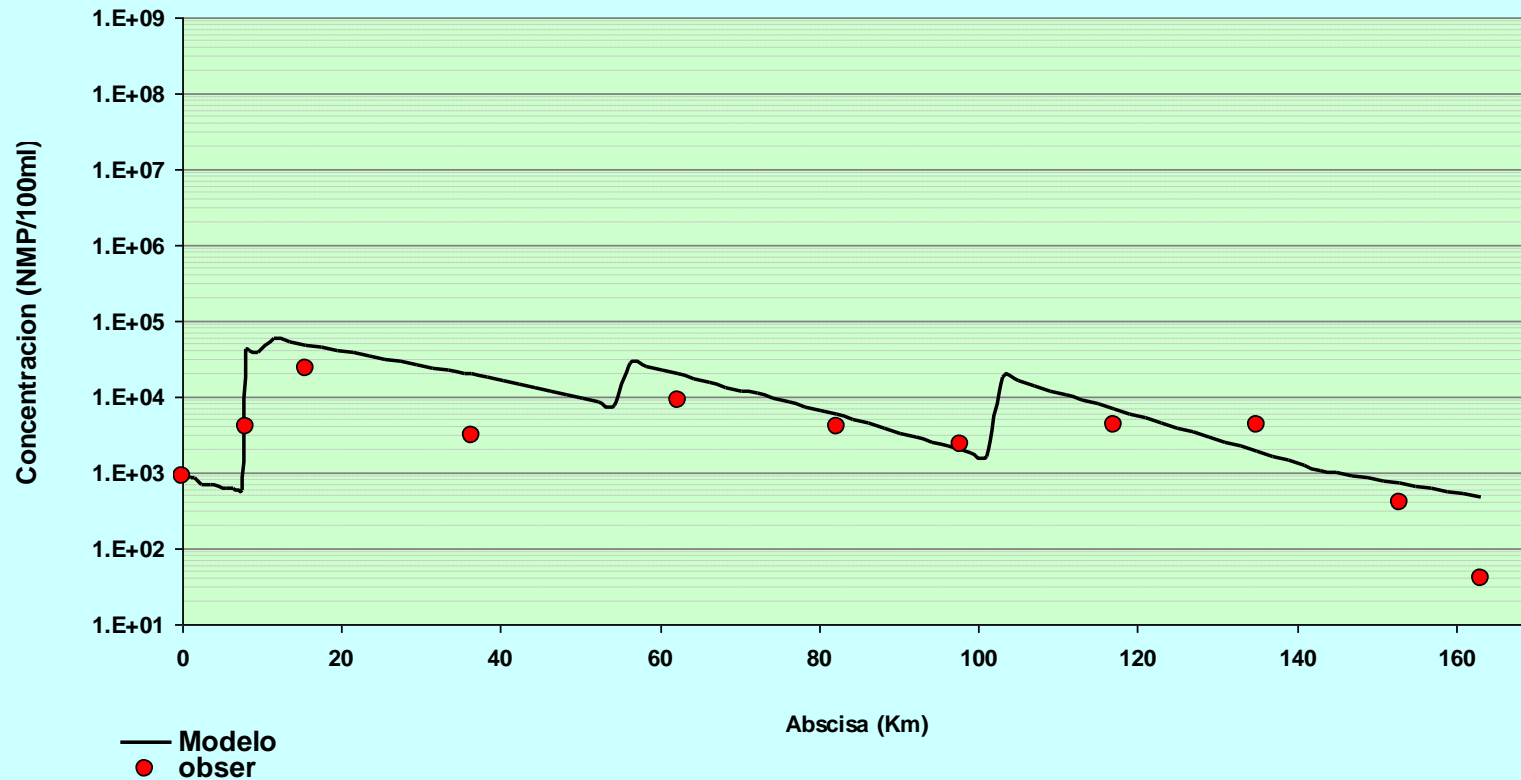


Coliformes Fecales C1 - RM

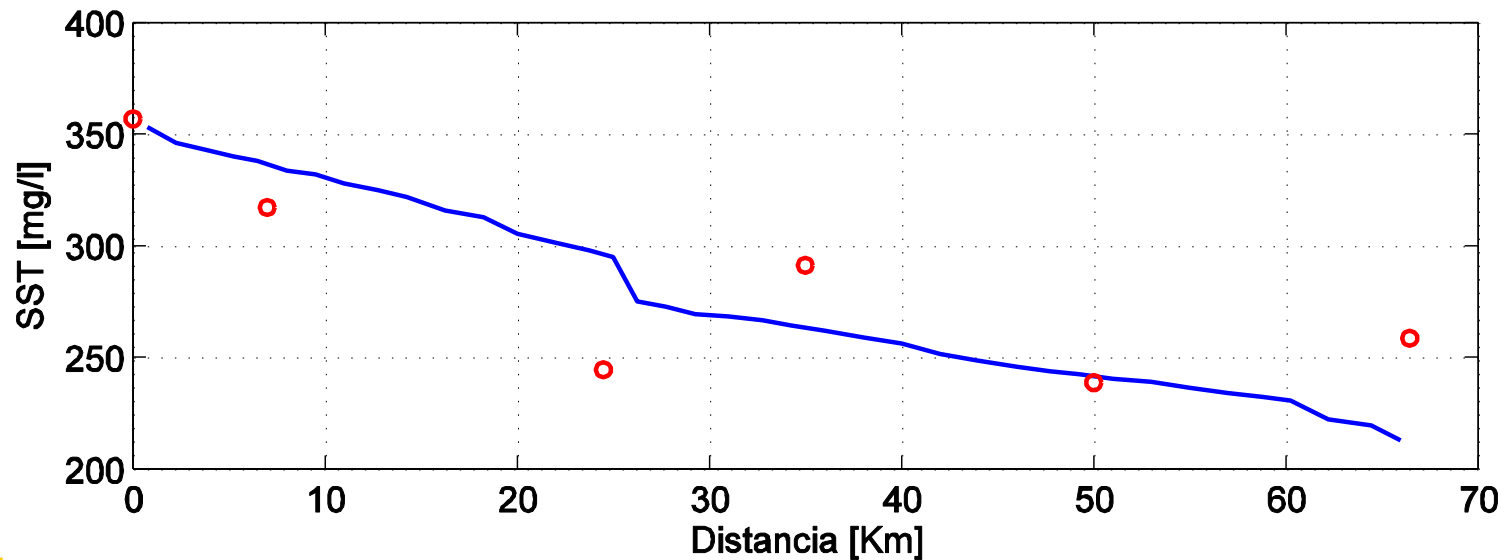
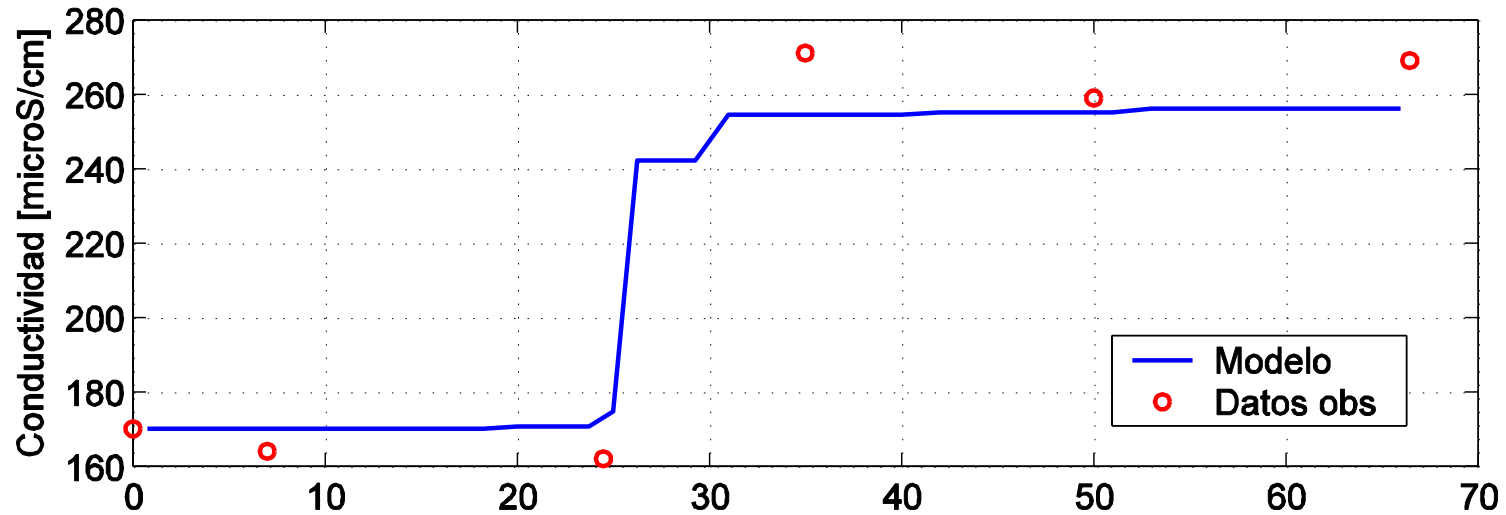


Coliformes Fecales C2 - RM

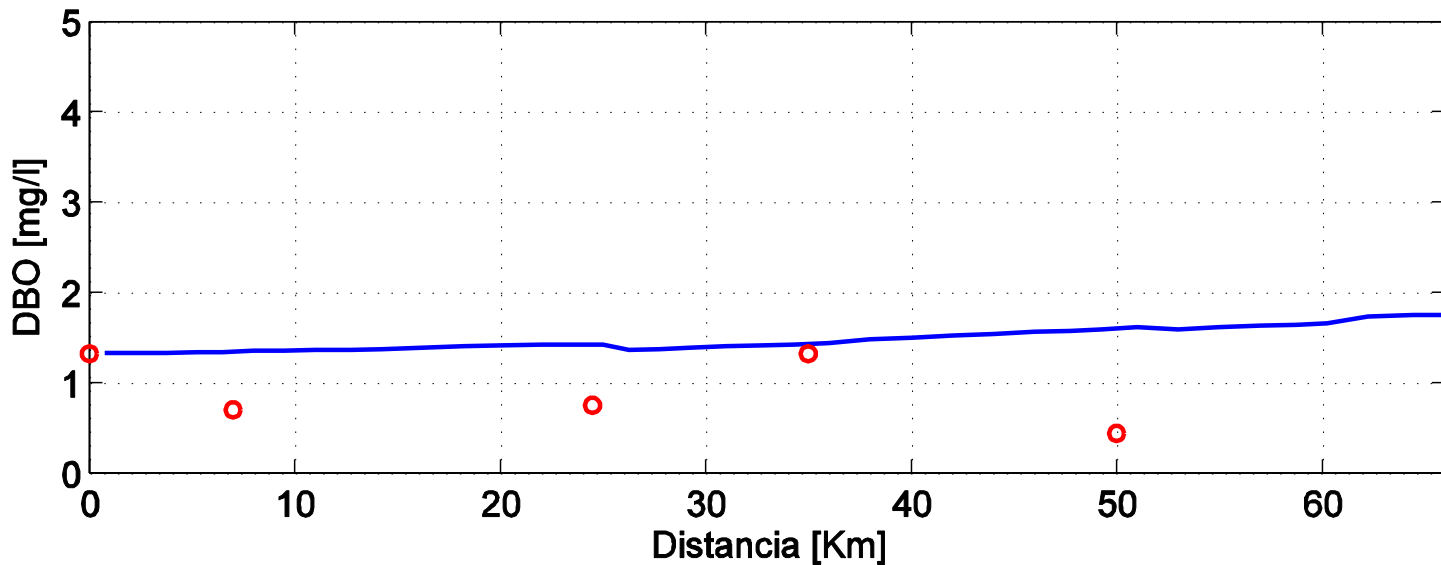
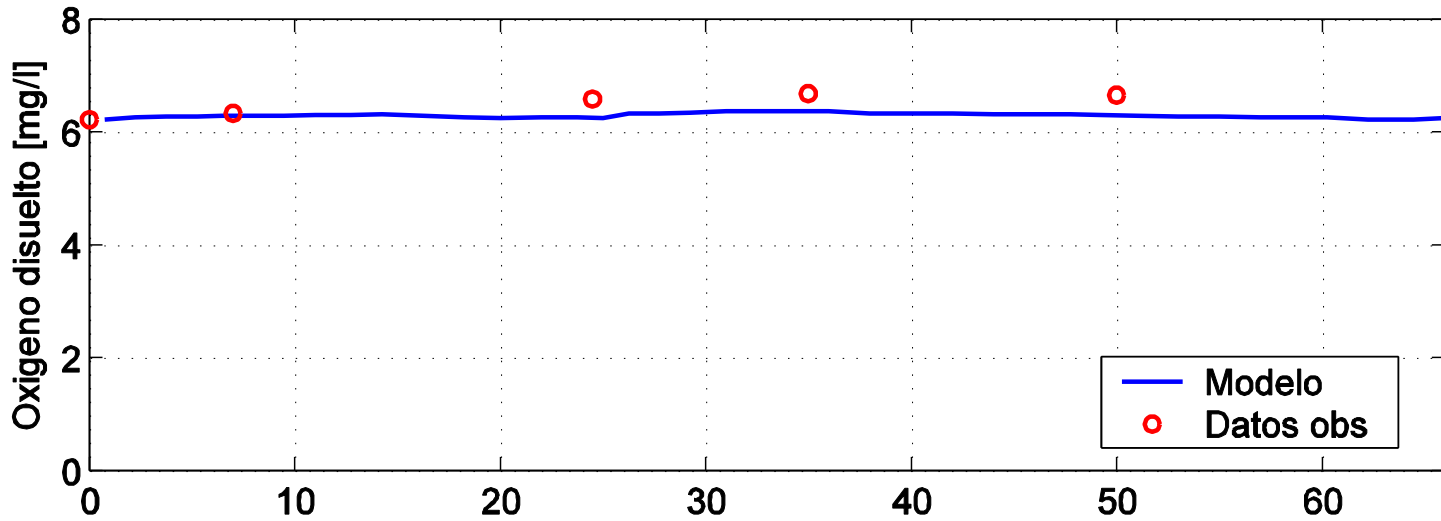
Río Magdalena - (Pte. Variante - Arrancaplumas)
Coliformes Fecales



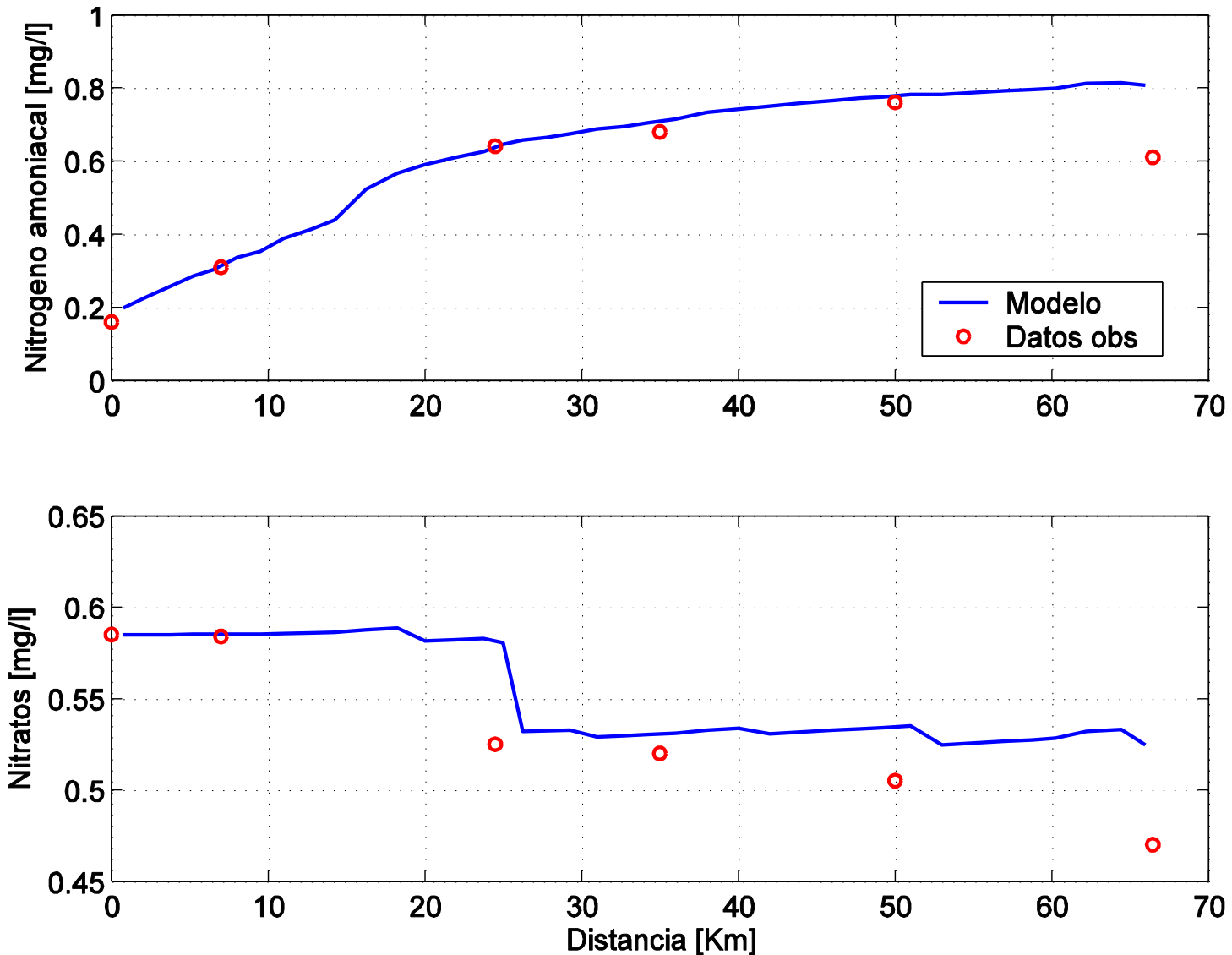
CALIBRACIÓN CONDUCTIVIDAD Y SST



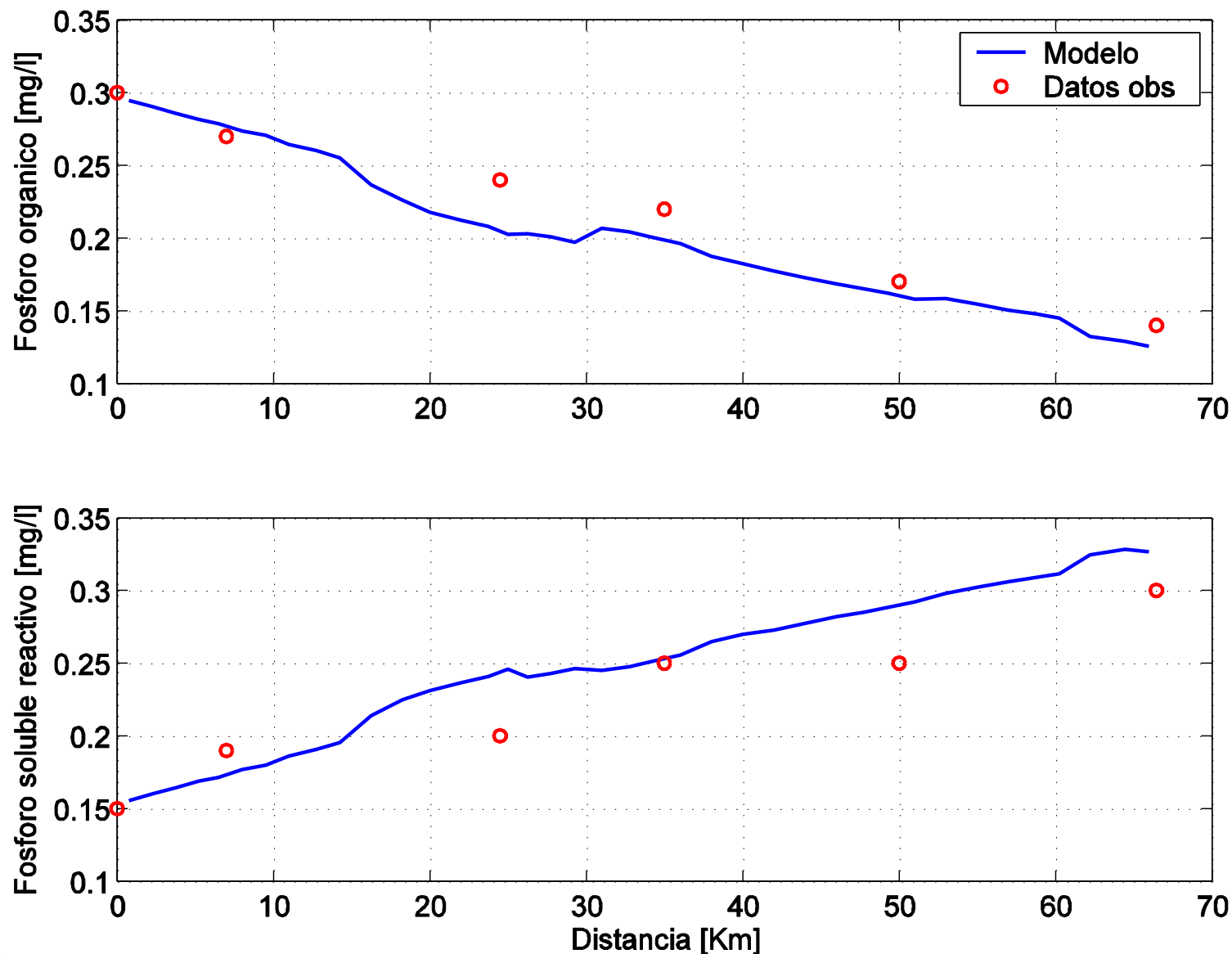
CALIBRACIÓN OXIGENO DISUELTO Y DBO



CALIBRACIÓN NUTRIENTES - NITRÓGENO



CALIBRACIÓN NUTRIENTES – FÓSFORO



METODOLOGIA PROPUESTA

7. SIMULACIONES DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO

**ANALISIS Y
COMPARACION DE
ALTERNATIVAS –
SOPORTE PARA
SELECCIÓN DE
TECNOLOGÍA**



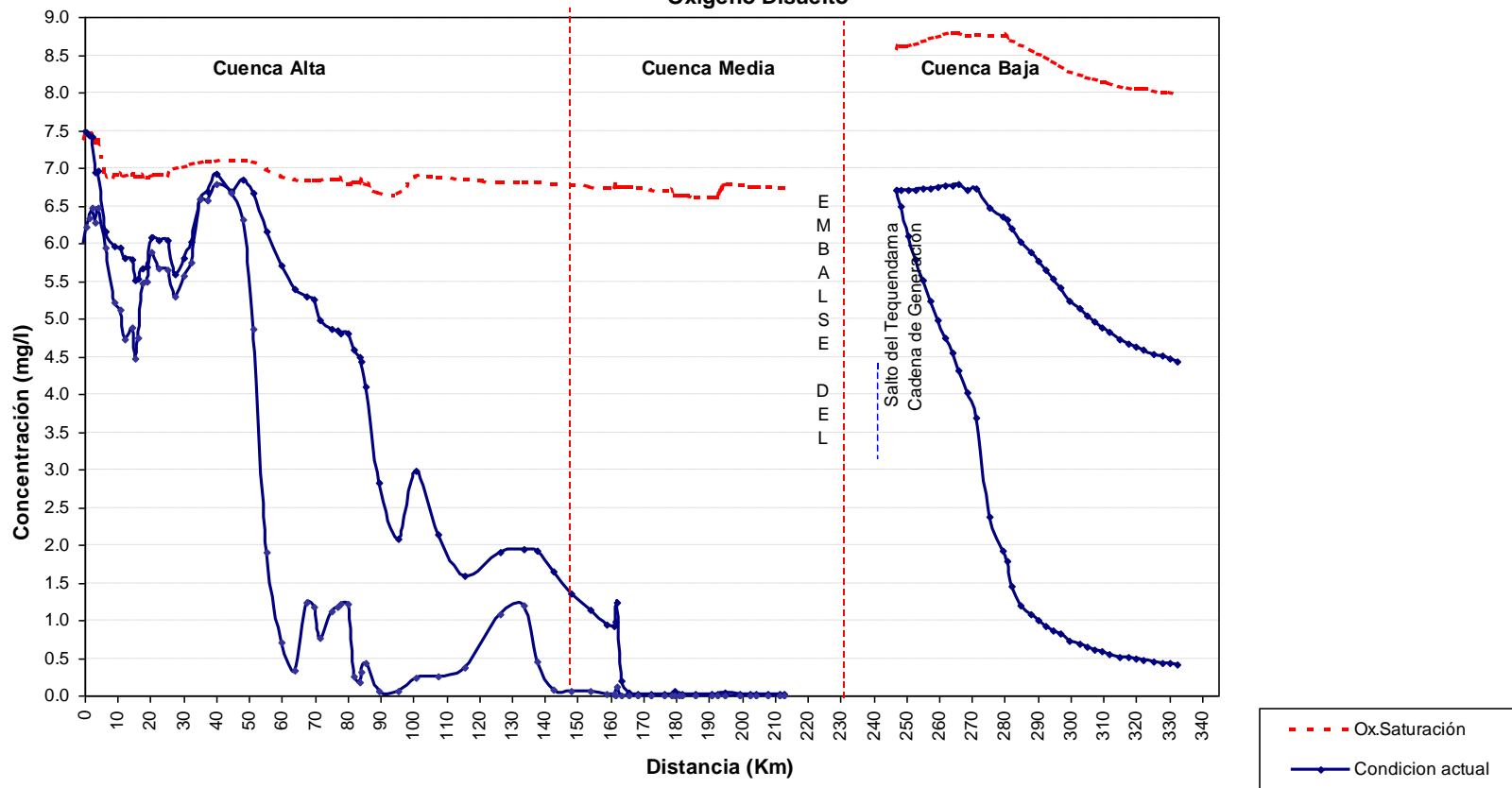
BANDA DE CONFIANZA SITUACION ACTUAL

BANDA DE CONFIANZA CONDICIONES ACTUALES INCERTIDUMBRE EN EL CAUDAL

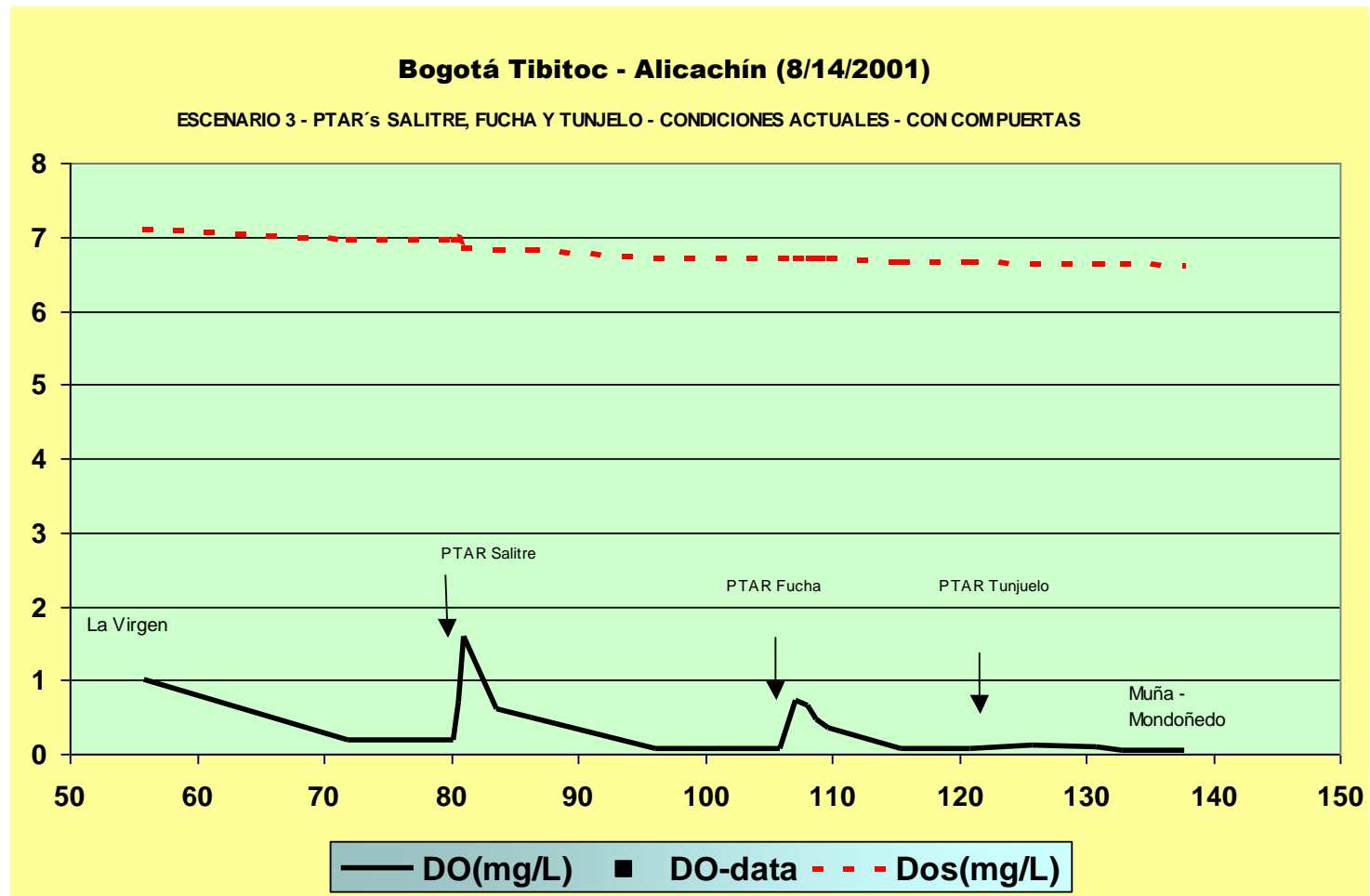
Q min:TR 2 años, Qmax:TR 2 años

R. Bogotá VillaPinzón - Magdalena

Oxígeno Disuelto



POT ACTUAL – OXÍGENO DISUELTO

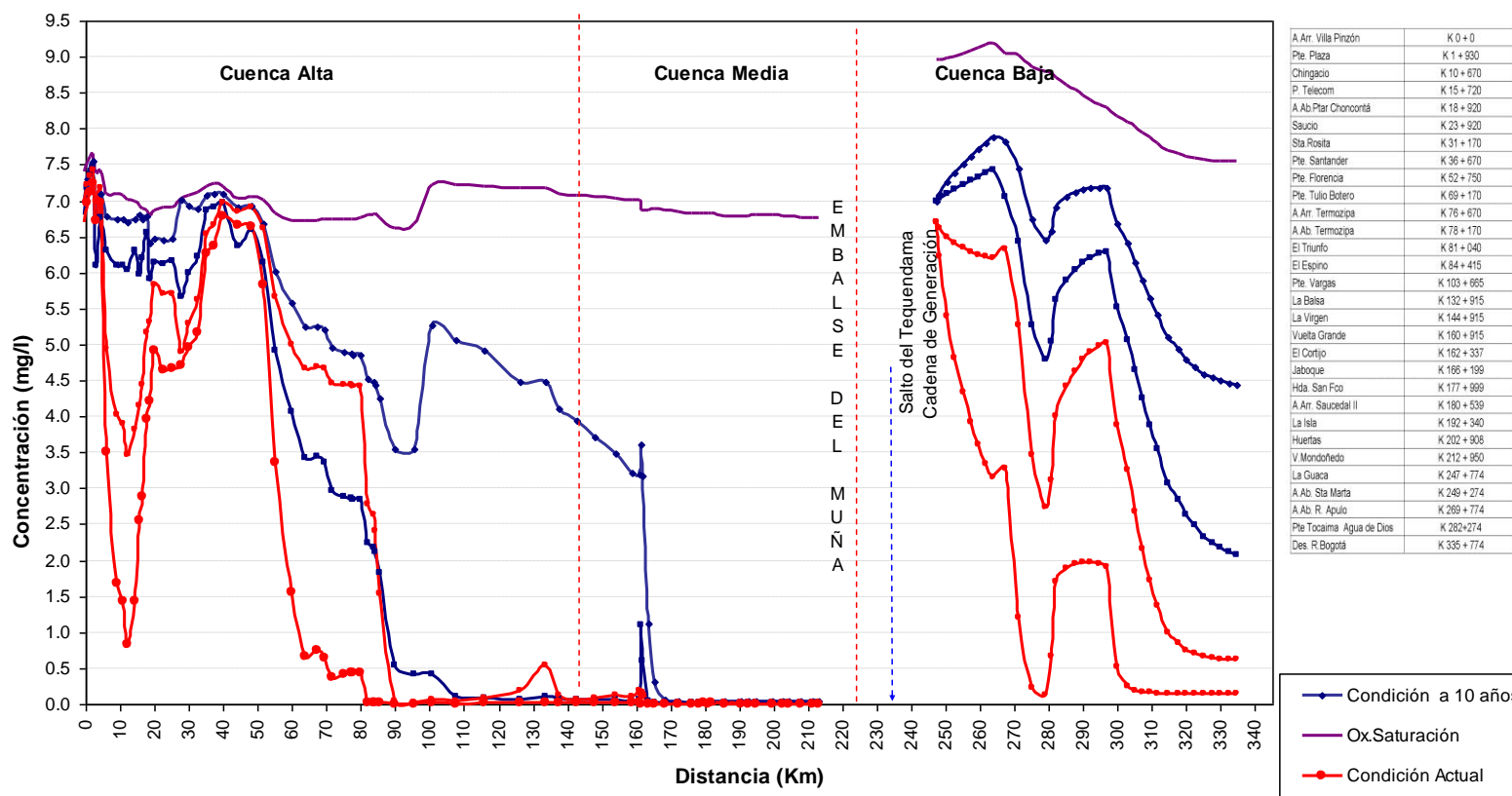


BANDAS DE INCERTIDUMBRE CONDICION ACTUAL Y PROBABLE

ESCENARIO PROBABLE A 10 AÑOS Y ESCENARIO ACTUAL

Condiciones Críticas - Caudales Mínimos

Oxígeno Disuelto



Usos del Agua Cuenca Baja

PRINCIPALES PARAMETROS PARA DETERMINAR EL REUSO DEL AGUA	CALIDAD Y USOS POSIBLES (Por parámetro)						
	SITUACION ACTUAL (AÑO 2002)				SITUACION FUTURA (AÑO 2012)		
	Promedio	Usos	Crítico	Usos	5%	95%	Crítico
Oxígeno disuelto OD (mg/L)	4.4	1_2_3_4_5_6_7. (5)	0.4	1_2_3_4_5_6. (5)	4.9	6.7	1_2_3_4_5_6_7
DBO5 Total (mg/L)	30	1_2_3_4_5_6_7	71	1_2_3_4_5_6_7	22.6	14.3	1_2_3_4_5_6_7
SST (mg/L)	135	1_6_7	220	1_6_7	23.1	18.0	1_2_3_4_5_6_7
PH	7.26	1_2_3_4_5_6_7	7.26	1_2_3_4_5_6_7			1_2_3_4_5_6_7
Flotantes y Espumas	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Grasas y aceites	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Sólidos de fondo	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Olor	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Comp.Amoniacales (mg/L)	15.89	1_2_3_4_5	27.57	1_2_3_4_5			1_2_3_4_5
Cadmio (mg/L)	0	1_2_3_4_5_6_7	0.011	1			1_2_3_4_5_6_7
Cobre (mg/L)	0.02	1_2_3_4_5_6	0.037	1_2_3_4_5_6			1_2_3_4_5_6
Cromo (mg/L)	0.034	1_2_3_4_5_6	0.095	1_2_3_4_5			1_2_3_4_5_6
Niquel (mg/L)	0.027	1_2_3_4_5_6	0.035	1_2_3_4_5_6			1_2_3_4_5_6
Plomo (mg/L)ç	0.036	1_2_3_4_5_6_7	0.044	1_2_3_4_5_6_7			1_2_3_4_5_6_7
Coliformes totales NPM/100ml	9.50E+07	1_2	3.10E+08	1_2			1_2
Coliformes fecales NMP/100 ml)	1.48E+07	1	9.30E+07	1			1

(5): El valor adoptado es tomado del decreto 1594/84

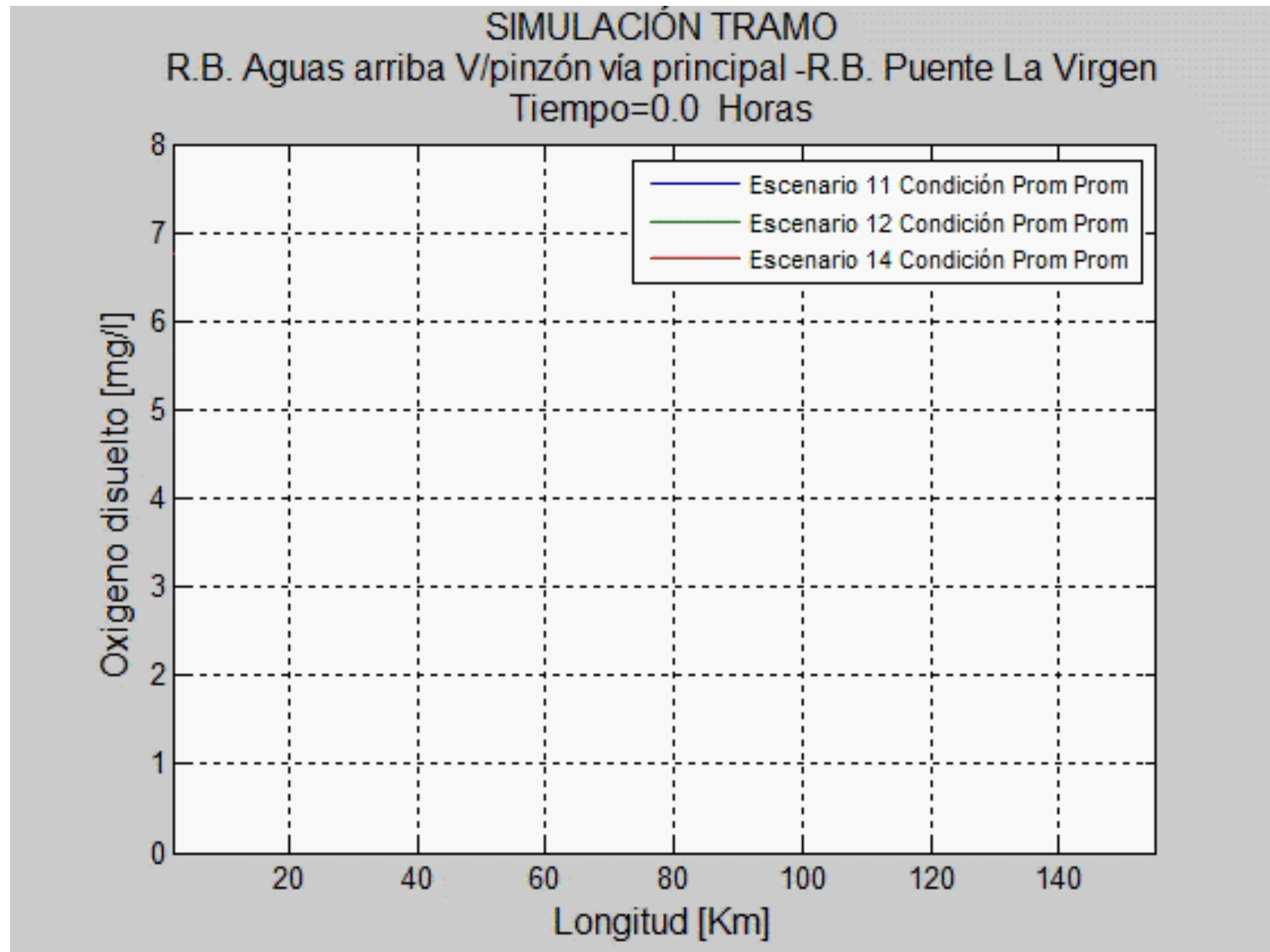
(7): Valor tomado a partir del conocimiento de los expertos a partir de observaciones

MODELO



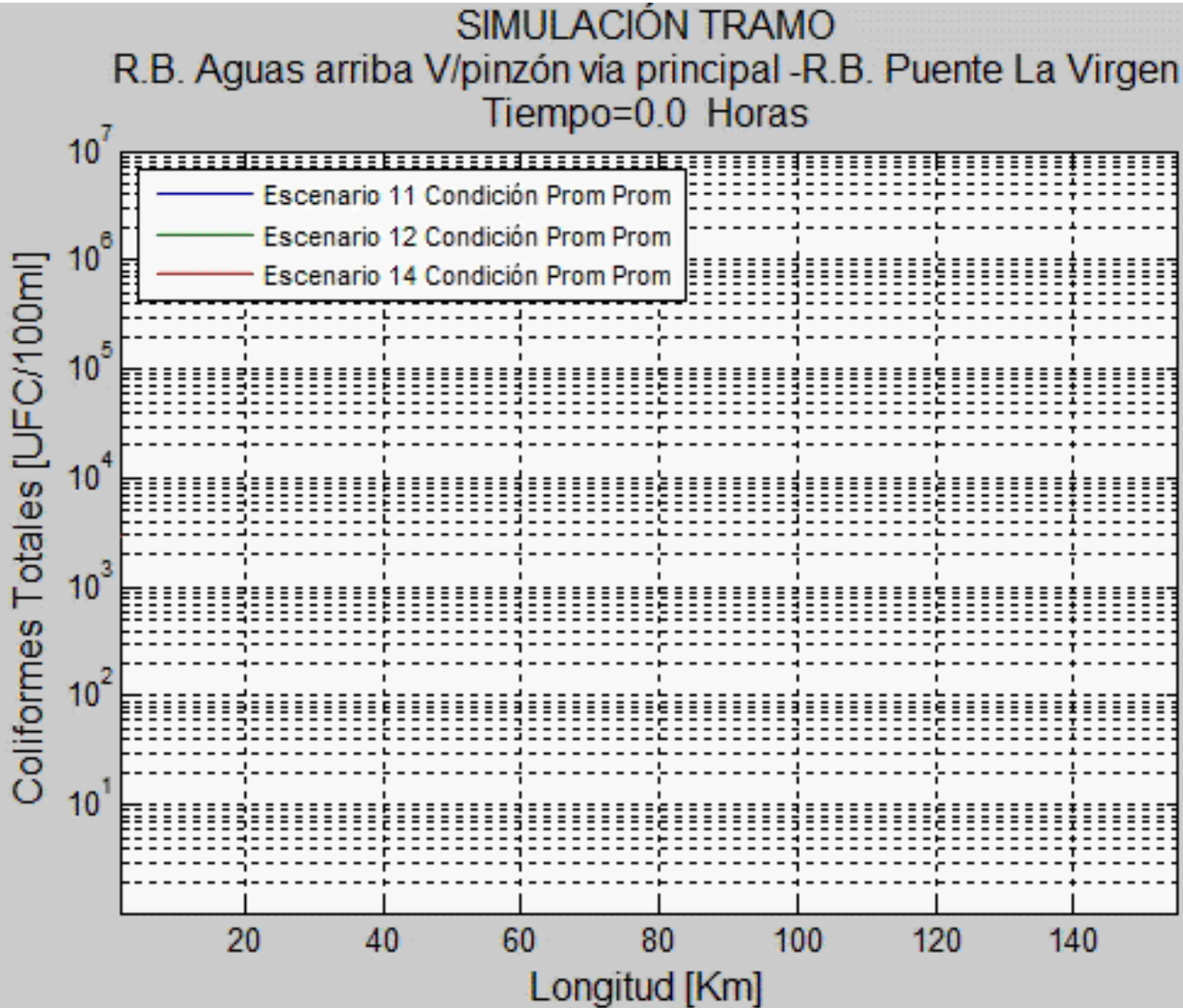
Ejemplo Simulación Escenarios

Simulación de escenarios



Ejemplo Simulación Escenarios

Simulación de escenarios



Marco de modelación propuesto

Resultado de proyectos e investigaciones previas:

- Universidad de los Andes – **EAAB** (2003) “Modelación de la calidad del agua del Río Bogotá”, Informe Final
- Universidad de los Andes – **Acuagyr** (2005), “Modelación de la calidad del río Magdalena y caracterización de las aguas lluvias y residuales de Girardot”, Informe Final
- Universidad Nacional de Colombia – **EAAB** (2010) “Modelación dinámica de la calidad del agua de Río Bogotá”, Productos 1 a 7.
- Camacho, L.A. y Díaz-Granados (2003) “Metodología para la Obtención de un Modelo Predictivo de Transporte de Solutos y Calidad del Agua en Ríos – Caso Río Bogotá” Agua 2003, Cartagena.
- Camacho, L.A., Rodríguez, E.A., Hernández, S. (2012) Metodología y resultados de la modelación dinámica del Río Bogotá. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José de Costa Rica, Sep. 9-12.





Gracias por su atención



la.camacho@uniandes.edu.co

