

**INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD
DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA
RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES)**

CONVENIO MARCO N° 7961 DE 12-06-2012

“Desarrollar proyectos de investigación ambiental en las temáticas de interés prioritario para la CORPORACIÓN y la UTS Y EN General para la Región Nororiental de Santander, de conformidad con el Plan de Investigación Ambiental de la CDMB”.

CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08 DE 29-06-2011

“Aunar esfuerzos entre la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga – CDMB y las Unidades Tecnológicas de Santander –UTS para estudiar la Capacidad de Autopurificación de la Microcuenca río Frío, determinando el comportamiento hidrodinámico del río y modelando la calidad del agua”.



Autor:

*Jorge Virgilio Rivera G
Tecnólogo Químico
Administrador de Empresas
M.Sc Gestión y Auditorías Ambiental.*

Dirigido a:

*Ing. Carlos Torres
Subdirección de Planificación y Territorio
CDMB*

Identificación:

*INFORME 5. INFORME FINAL DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CANEYES)
AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO –*

Lugar y fecha de emisión:

Bucaramanga, 10-12 - 2012.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 2 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
1. INFORMACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO	9
2. INFORMACIÓN FISICOQUÍMICA DEL RÍO FRÍO	12
3. INFORMACIÓN HIDROGEOMÉTRICA DEL RÍO FRÍO	15
3.1 ÁREAS TRÁNSVERSALES DE LOS TRAMOS DEL RÍO FRÍO	16
3.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN – CDL	19
3.2.1 CDL Cabecera (Truchera)	19
3.2.2 CDL Tramo San Ignacio	19
3.2.3 CDL Tramo Judía	19
3.2.4 CDL Tramo Esperanza	20
3.2.5 CDL Tramo Botánico	20
3.2.6 CDL Tramo Pórtico	20
3.2.7 CDL Tramo Callejuelas	20
3.2.8 CDL Tramo Caneyes	20
4. CINÉTICA DE DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA	23
4.1 TASA DE DESOXIGENACIÓN	23
4.2 TASA DE NITRIFICACIÓN	26
4.3 TASA DE REAIREACIÓN	28
4.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN	30
5. MODELAMIENTO DE LA AUTOPURIFICACIÓN EN EL RÍO FRÍO	31
6. CONCLUSIONES	47
7. RECOMENDACIONES	49
8. BIBLIOGRAFÍA	50

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 3 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1. Ubicación de la Microcuenca Río Frío	9
Figura N° 2. Ubicación de las Estaciones en el río Frío	10
Figura N° 3. Discretización de los Tramos, Fuentes Puntuales afluentes y efluentes en el río Frío	11

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 4 De 50 Rev: 1
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Algunas Características meteorológicas e hidrológicas río Frío	10
Tabla N° 2. Estaciones de monitoreo del río Frío	11
Tabla N° 3. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío	12
Tabla N° 4. Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonacea DBOC (rápida, lenta y última) y el Carbono Orgánico Total – COT del río Frío	12
Tabla N° 5. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío	13
Tabla N° 6. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío	13
Tabla N° 7. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío	13
Tabla N° 8. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío	14
Tabla N° 9. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío	14
Tabla N° 10. Cotas de la microcuenca Río Frío	15
Tabla N° 11. Geografía de la microcuenca Río Frío	15
Tabla N° 12. Sistema Hidrogeométrico del río Frío	16
Tabla N° 13. Sistema Hidrogeométrico del río Frío	19
Tabla N° 14. Comportamiento del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en la Microcuenca Río Frío	21
Tabla N° 15. Constantes empíricas para Curva de Gastos Microcuenca Río Frío	22
Tabla N° 16. Valores típicos de tasas de descomposición de la DBO en diferentes niveles de tratamiento	24
Tabla N° 17. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia	24
Tabla N° 18. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia	26
Tabla N° 19. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia	27
Tabla N° 20. Regresión lineal de la Ka en la Microcuenca Río Frío	28
Tabla N° 21. Tasas de Reaireación utilizando Ecuaciones Estocásticas	30
Tabla N° 22. Tasas de Reaireación utilizando Ecuaciones	30

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 5 De 50 Rev: 1
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Área Transversal de la estación de Cabecera (Truchera)	16
Gráfica 3. Área Transversal de la estación (Judía)	17
Gráfica 4. Área Transversal de la estación (Esperanza)	17
Gráfica 5. Área Transversal de la estación (Jardín Botánico)	17
Gráfica 6. Área Transversal de la estación (Pórtico)	18
Gráfica 7. Área Transversal de la estación (Callejuelas)	18
Gráfica 8. Área Transversal de la estación (Caneys)	18
Gráfica 9. CDL río Frío	21
Gráfica N° 10 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad del río para un 50% DBO sedimentable, representada para un rango de velocidad de sedimentación (v_s)	25
Gráfica N° 11 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad	25
Gráfica N° 12 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad	29
Gráfica N° 13 Descripción del Modelado de Autopurificación del río frío (Mayo 2012)	33
La hidrodinámica del río se ilustra con base al tiempo de viaje, la velocidad y el flujo del río Frío.	34
Gráfica N° 14 Tiempo de viaje del río Frío desde (Truchera – Caneys)	34
Gráfica N° 15 Comportamiento de la velocidad media del río Frío	34
Gráfica N° 16 Modelado del Flujo en el río Frío	35
Gráfica N° 17 Modelado de la Reaireación del río Frío	35
Gráfica N° 18 Modelado de la Temperatura del Río Frío	36
Gráfica N° 19 Modelado de la Conductividad del río Frío	36
Gráfica N° 20 Modelado del OD y el Porcentaje de Saturación	37
Gráfica N° 21 Modelado de la DBOC lenta	37
Gráfica N° 22 T Modelado de la DBOC rápida	38
Gráfica N° 23 Modelado de la DBOC última	38
Gráfica N° 24 Modelado de la DBO del bento	39
Gráfica N° 25 Modelado del Nitrógeno Orgánico	39
Gráfica N° 26 Modelado del Nitrógeno Amoniacal	40
Gráfica N° 27 Modelado de la acumulación de nitratos	40
Gráfica N° 28 Modelado del Fósforo Orgánico	41
Gráfica N° 29 Modelado del Fósforo Inorgánico	41
Gráfica N° 30 Modelado de la Alcalinidad	42
Gráfica N° 31 Modelado del Potencial de Hidrógeno, pH	42
Gráfica N° 32 Modelado del comportamiento de los Patógenos (E- Coli), usando Unidad Formadora de Colonia por cada 100 mL de muestra	43
Gráfica N° 33 Modelado del Nitrógeno Total (NTK + N orgánico)	43
Gráfica N° 34 Modelado del Fósforo Total (P orgánico + P inorgánico)	44
Gráfica N° 35 Modelado del Nitrógeno Total Kjeldahl (N amoniacal + Nitratos + Nitritos)	44
Gráfica N° 36 Modelado de los Sólidos Suspendidos Totales	45
Gráfica N° 37 Modelado de los Sólidos Suspendidos inorgánicos (SST- SS orgánicos)	45
Gráfica N° 38 Modelado de los o Detritos (Materia orgánica particulada o muerta MOP)	46

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 6 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

RESUMEN

El informe de cinética, se enfoca en el comportamiento de la desoxigenación, reaeración, nitrificación y sedimentación del río (26,6 Km). Se aclara que la longitud total de la microcuenca es de 30.5 Km, pero para la modelación se tomaron 26.6 Km desde la confluencia de la quebrada el Silencio en la estación la truchera, ubicada en el Corregimiento de la Corcova en el Municipio de Floridablanca.

La investigación se enfoca en la experimentación del comportamiento de la cinética de autpurificación, basada en la desoxigenación, reaeración, nitrificación, decaimiento de patógenos y la sedimentación del río Frío. Se aclara que la longitud total de la microcuenca es de 30.5 Km, pero para el efecto de la modelación de autpurificación se tomaron 26.6 Km, es decir, desde la confluencia de la quebrada el Silencio en la estación la truchera, ubicada en el Corregimiento de la Corcova en el Municipio de Floridablanca hasta la confluencia con la subcuenca río de Oro. En la investigación de estudio el comportamiento hidrodinámico de la capacidad de auto purificación del río, tipo montaña, teniendo en cuenta el comportamiento del oxígeno disuelto a causa de procesos de desoxigenación y reaeración en la columna de agua y el material béntico del río.

El comportamiento hidrodinámico de los constituyentes que participan en la autodepuración de la carga contaminante, requiere de inspecciones, monitoreos y ensayos de laboratorio, para establecer comparaciones y correlaciones entre las variables que se involucran en el fenómeno del autpurificación. Éstas correlaciones se aplican para ajustar un modelo dinámico unidimensional denominado QUAL2K v2.07, el cual permite simular y predecir el comportamiento del cauce, el tiempo de viaje y el fenómeno de autpurificación del río Frío. La modelación, permite, conocer, predecir, mitigar y controlar la contaminación generada por la carga contaminante producida en las diferentes fuentes puntuales domésticas como: el bypass del alcantarillado de Floridablanca, el vertido tratado de la PTAR, el vertido angelina y los vertidos difusos que se encuentra posiblemente a las afueras de los (2) asentamientos urbanos por donde pasa el río, conocidos como: Floridablanca y Girón. La captación clandestina de agua del río, y los vertidos sin registrar hacen que desbalancea la masa hidráulica del cuerpo de agua, convirtiéndose en otra alteración hidráulica que se analizó mediante estudio con un trazador conservativo.

La degradación de la materia orgánica, se evalúa determinado la tasa de descomposición de la DBOC, definida por la evaluación de pérdida en el río, la cual oscila entre 0.02 y 0.58 d⁻¹, los factores que pueden influir son: la geografía, la dinámica del cause y la cantidad de vertido que cae al río. La reaeración, depende específicamente de la cantidad de aire atmosférico, la temperatura y las condiciones de flujo. El rango obtenido en río fue de 0.29 a 1.48 d⁻¹, la tasa obtenida por la ecuación de Texas es la más cercana a la obtenida por correlación del oxígeno en el río y oscila entre 3.3 y 8.6 d⁻¹. Se modela con la ecuación de Owens y presenta un reaeración con un rango entre 3 y 9 d⁻¹. La tasa nitrificación,

la sedimentación y el decaimiento de los patógenos. La nitrificación, es un proceso más complejo debido a las diferentes especies de nitrógeno que se forman o se consumen durante la reacción, es decir la conversión de nitrógeno orgánico a nitrato, donde se consume el oxígeno del río a medida que se forma el nitrato. El inconveniente es la cantidad remanente de oxígeno y la cantidad que se gana, es decir si la tasa de desoxigenación es mayor que la reaeración la autpurificación no puede suceder. Las tasa de amonificación para el río Frío oscila entre 0.0 a 0.32 d⁻¹, la tasa de conversión de amonio a nitrato oscila entre 0.0 y 0.87 d⁻¹. Se realizaron iteraciones para validar la s ecuaciones de simulación de la nitrificación establecido por Chapra, 1997), pero no arroja una convergencia con la concentración evaluada en campo, se logró establecer de acuerdo al modelo QUAL2K v 2.03 las tasas ideales de oxidación del nitrógeno orgánico y el amonio en el canal hidráulico río Frío. La mortalidad de patógenos, depende de la cantidad de patógenos y la tasa de mortalidad, a su vez depende de

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 7 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

la cantidad e oxígeno disuelto que quede en la columna de agua durante el recorrido del río hasta donde exista un nuevo vertido. La tasa converge en 1 d^{-1} . La sedimentación orgánica e inorgánica en el canal hidráulico de estudio definido como la micro cuenca río Frío, depende en gran medida del tamaño de partícula orgánica es decir si se logra degradar o hidrolizar rápidamente o por el contrario es muy lenta, recalcitrante. La sedimentación depende directamente de la profundidad del río, en nuestro caso es muy baja (H promedio de 0.6 m), en el cual se genera una tasa elevada de sedimentación (0.1 m.d^{-1}). Es importante aclarar que existe una velocidad de sedimentación de los sólidos inorgánicos (2.8 m.d^{-1}) y otra la velocidad de sedimentación de la DBOC que es aproximadamente de 0.1 m.d^{-1} .

La importancia de estudiar la autopurificación del río Frío, radica en levantar la información necesaria para evaluar el comportamiento del oxígeno disuelto del río, ya que el río posee la capacidad de autopurificarse, simplemente ésta opción es muy difícil que se presente sino se tiene una custodia del grado de contaminación y la cantidad de vertido que entra al río. La opción más viable es estudiar la capacidad de autopurificación que puede tener el cuerpo hídrico y de esta manera definir la cantidad de carga orgánica que puede ser incorporada al canal para su dilución o depuración natural sin que afecte aguas abajo ni las vertientes superiores. En nuestro caso se ve altamente afectada la subcuenca río de Oro, ya que la DBOC entera que trae el río Frío es 180 mg L^{-1} y la filtrada es de 140 mg L^{-1} , esto indica la DBOC particulada tan solo es de 40 mg L^{-1} , es decir el 78% sería materia orgánica disuelta.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUECNA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 8 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

INTRODUCCIÓN

La contaminación en los ríos de cabecera del Área Metropolitana de Bucaramanga, (Suratá, Lato, Tona, Oro y Frío), correspondiente a los Municipios de: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta y Lebrija, se ha convertido en una situación incómoda en los últimos 20 años aproximadamente. La falta de cultura ambiental, el desarrollo industrial y el aumento poblacional en el área metropolitana (1 millón), (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2005); permiten el incremento del impacto a éstos cuerpos receptores que a su vez son fuentes potables para más de un 80% de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, C.D.M.B.

La predicción del comportamiento de la calidad del agua requiere de la modelación de fenómenos como: autpurificación, mineralización, eutrofización, acidificación o el calentamiento del agua, entre otros. De acuerdo con el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), la modelación de los procesos de impacto al recurso agua sería una de las estrategias más viables en el proceso de sostenibilidad del recurso.

La microcuenca del río Frío no cuenta con ninguno de los estudios anteriormente mencionados y necesita con urgencia conocer la verdadera situación de la calidad del agua para tomar medidas ambientales definitivas con el fin de mitigar el impacto que está generando a la Población de Floridablanca, Girón y la Subcuenta del río de Oro. El acelerado crecimiento demográfico de Bucaramanga, Floridablanca y Girón, a su vez, el aumento de industrias y actividades agrícolas, han ocasionado un deterioro al medio ambiente y los cuerpos de agua aledaños, debido a que las aguas de desecho que se generan en estos sectores son vertidas directamente al río Frío sin ningún tratamiento previo con excepción de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales (PTAR Río Frío). La cual solo trata el 5% de las aguas de Bucaramanga y el 80% de las de Floridablanca. Según, (RIVERA, 2011), en un estudio realizado mediante la modelación de la calidad del agua a la zona baja del río Frío, recibe altas cargas de contaminación doméstica e industrial definida por fuentes puntuales y difusas de la PTAR vertidos crudos tales como: By pass del alcantarillado de Floridablanca, angelina y vertidos difusos en Girón, concluyendo que, 61.9 ton.d⁻¹ de carga orgánica vertidas por 383,000 habitantes de Floridablanca y Bucaramanga, acumulan en el río 16.85 ton.d⁻¹ generando cambios en el balance del oxígeno disuelto como resultado del aumento del carbono y nitrógeno orgánico, de esta manera, el río no alcanza a diluir ni depurar la carga orgánica contaminante, impactando a la subcuenca río Oro.

De acuerdo con lo anterior se debe concluir que la contaminación del río Frío, se podrá controlar si se estudia la forma como se contamina el agua en todo el trayecto del río, determinando la capacidad depurativa en un estudio denominado "Evaluación de autpurificación de río Frío" en el cual se estudia la cinética de desoxigenación, reaireación, nitrificación, sedimentación y decaimiento de patógenos, descritos en este informe de tasa de desoxigenación.

El estudio de la autpurificación se define en (7) estaciones ubicadas desde la cabecera (truchera) zona alta con las estaciones: San Ignacio, Judía, Esperanza; la zona media con las estaciones: Jardín Botánico, Pórtico y la zona baja con las estaciones: Callejuelas y Caneyes, con un trayecto e 26,6 Km y un tiempo de viaje de 11.7 horas.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUECNA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 9 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

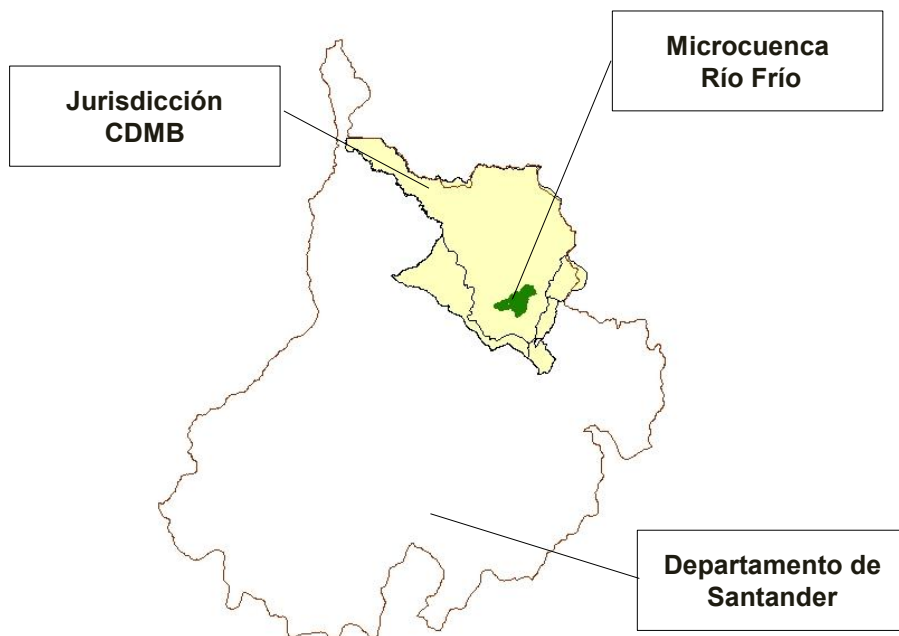
1. INFORMACIÓN DE LA MICROCUECNA RÍO FRÍO

El río Frío está ubicado en el Municipio de Floridablanca en los corregimientos de: San Ignacio, La Judía, Alto de Mantilla y la parte alta de Alsacia – Malabar. Se caracterizan por ser zonas boscosas donde se lleva a cabo el proceso de condensación e infiltración que origina las zonas de acumulación. La parte baja se encuentra entre la estación el pósito y Caneyes, confluencia con la subcuenca río de Oro.

La micro cuenca río Frío tiene una longitud aproximada de 30,5 Km nace en el cerro de la judía a una altura 2032 msnm, en la zona alta de aproximadamente (15 Km) de longitud presenta una elevada pendiente y buena calidad de agua (7,8 ppm OD), está custodiada por la CDMB y es la reserva hídrica del Municipio de Floridablanca.

La zona media de aproximadamente 12 Km, pasa por Floridablanca donde el oxígeno decrece (6,7 ppm OD) pero se mantiene la calidad como agua segura, en ésta zona, se realizan captaciones para la Planta de potabilización de Floridablanca y para uso agrícola; es importante, resaltar que el caudal se disminuye porque la PTAP capta un 60% de la micro cuenca, permitiendo una baja dilución de la carga contaminante que recibe de la PTAR. En el kilómetro 26 aproximadamente, hasta la confluencia con el río de Oro, en donde se encuentra el mayor impacto de carga orgánica hay en la zona un tributario denominado quebrada Aranzoque a unos 500 m aguas abajo de la PTAR, el cual le permite la dilución parcial de la carga contaminante (450 mg.L-1 DBO), debido a que existen otros (2) vertidos domésticos que continúan desoxigenando el río.

Figura N° 1. Ubicación de la Microcuenca Río Frío



Fuente: Autor

Tabla 1. Algunas Características meteorológicas e hidrológicas río Frío

Parámetro Medio	Unidad	Medida
Altitud	msnm	2200 - 785
Precipitación	mm	120 (60 – 160)
Temperatura	°C	24.5 (12 – 32)
Humedad	%	82
Vientos	m/s	1.8 al Norte
Radiación Solar	Horas	1.700
Longitud de micro cuenca	Km	30.5
Caudal medio	m ³ / s	1.8 - 2.2

Fuente: IDEAM, CDMB

Figura N° 2. Ubicación de las Estaciones en el río Frío

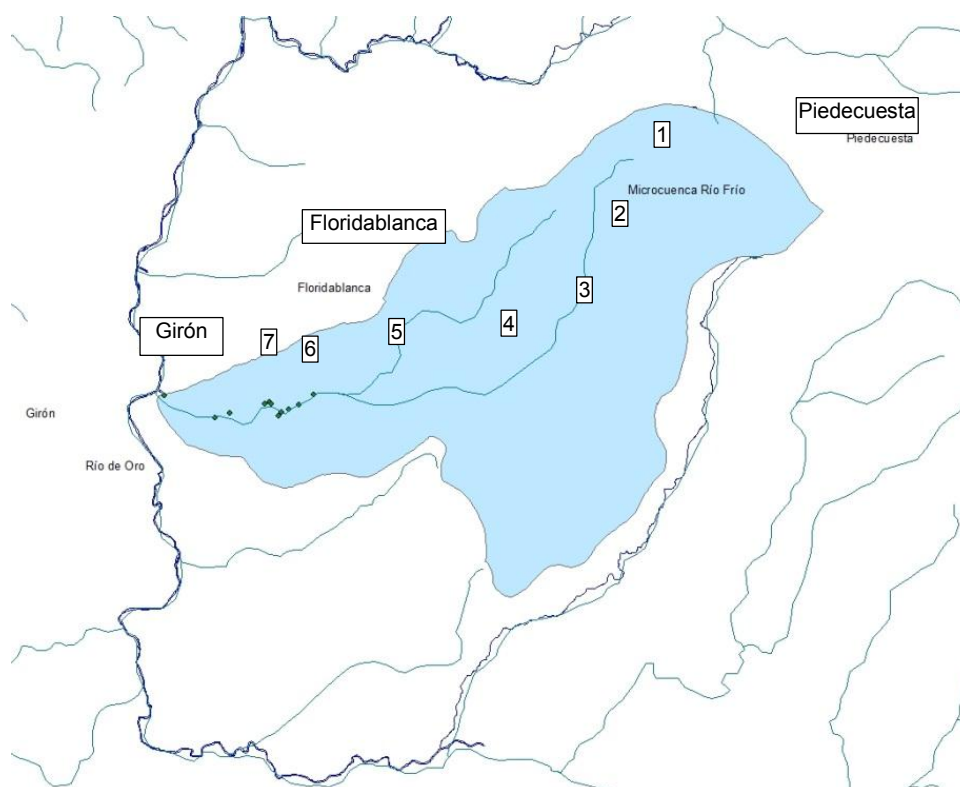
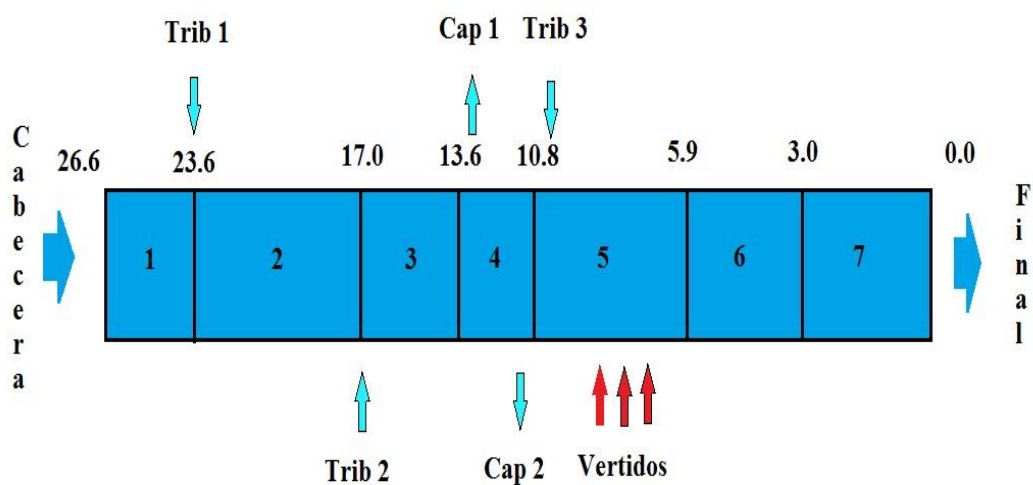


Tabla N° 2. Estaciones de monitoreo del río Frío

N°	Tramos	Abcisado
1	Ignacio	K26+6 - K23+6
2	Judía	K23+6 - K17+0
3	Esperanza	K17+0 - K13+6
4	Botánico	K13+6 - K10+9
5	Pórtico	K10+9 - K5+9
6	Callejuelas	K5+9 - K3+0
7	Caneyes	K3+0 - K0+0

Fuente: Autor

Figura N° 3. Discretización de los Tramos, Fuentes Puntuales afluentes y efluentes en el río Frío



	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 12 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

2. INFORMACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL RÍO FRÍO

La información recogida de campo se hace por medio el monitoreo realizado el 25 de Mayo de 2012, en el cual la CDMB participa en el proceso de la recolección de muestras y análisis de laboratorio.

Los resultados arroja por el Laboratorio de la CDMB (Acreditado por el IDEAM) se analizan y se procesan para generar los datos de entrada al modelo QUAL2K Ver.2.07, dichos resultados se ilustran en las siguientes tablas.

Tabla N° 3. Resultados del Oxígeno disuelto, % de Saturación y DOS del río Frío

TRAMO	OD	Saturación	DOS
	(mgO ₂ /L)	%	(mgO ₂ /L)
Ignacio	8,73	80,3	0,1
judía	8,12	78,3	1,0
Esperanza	8,10	78,0	1,0
Botánico	7,76	76,3	2,0
Pórtico	6,92	75,3	2,0
Callejuelas	3,16	42,3	15,0
Caneyes	1,80	38,3	12,0

Tabla N° 4. Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonacea DBOC (rápida, lenta y última) y el Carbono Orgánico Total – COT del río Frío

TRAMO	DBOCs	DBOCf	CBODCu	COT
	(mgO ₂ /L)	(mgO ₂ /L)	(mgO ₂ /L)	mgC/L
Ignacio	0,00	15,95	15,95	5,90
judía	0,00	26,66	26,66	9,86
Esperanza	0,00	19,23	19,23	7,11
Botánico	0,00	12,38	15,92	5,89
Pórtico	0,00	14,68	17,87	6,61
Callejuelas	4,20	115,10	147,40	54,50
Caneyes	23,70	137,30	189,10	69,90

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 13 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 5. Resultados del Oxígeno disuelto , % de Saturación y DOS del río Frío

TRAMO	<i>Norg (ugN/L)</i>	<i>NH4 (ugN/L)</i>	<i>NO3 (ugN/L)</i>	<i>NT (ugN/L)</i>	<i>NTK</i>
	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>ugN/L</i>
Ignacio	710	30	660	1.403	740
judía	710	30	640	1.387	740
Esperanza	700	40	670	1.415	740
Botánico	760	50	670	1.488	810
Pórtico	1.030	1.690	750	3.575	2.720
Callejuelas	2.000	23.400	160	25.634	25.400
Caneyes	1.650	22.150	120	23.937	23.800

Tabla N° 6. Resultados del Oxígeno disuelto , % de Saturación y DOS del río Frío

TRAMO	<i>Porg (ugN/L)</i>	<i>Pinogr (ugP/L)</i>	<i>PT (ugP/L)</i>
	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>
Ignacio	40	20	60
judía	60	30	90
Esperanza	40	20	60
Botánico	70	60	130
Pórtico	110	310	420
Callejuelas	810	4.590	5.400
Caneyes	1.210	4.180	5.390

Tabla N° 7. Resultados del Oxígeno disuelto , % de Saturación y DOS del río Frío

TRAMO	<i>Phyto (ugA/L)</i>	<i>Detr (mgD/L)</i>	<i>Patógenos (cfu/100 mL)</i>	<i>Alg Fondo (gD/m^2)</i>
	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>
Ignacio	16	0	1.000	12
judía	16	0	1.000	12
Esperanza	16	0	1.000	12
Botánico	16	1	30.000	12
Pórtico	16	1	50.000	12
Callejuelas	12	23	102.000	20
Caneyes	10	25	105.000	15

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 14 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 8. Resultados del Oxígeno disuelto , % de Saturación y DOS del río Frío

TRAMO	<i>Alk (mgCaCO3/L)</i>	<i>pH</i>	<i>Cond (umhos)</i>
	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>
Ignacio	25,9	7,1	59,4
judía	28,6	8,0	64,4
Esperanza	29,6	7,2	68,1
Botánico	35,2	8,0	79,6
Pórtico	65,6	7,3	178,3
Callejuelas	167,0	7,7	557,0
Caneys	177,0	7,0	544,0

Tabla N° 9. Resultados del Oxígeno disuelto , % de Saturación y DOS del río Frío

TRAMO	<i>SSI (mgD/L)</i>	<i>SSV (mgD/L)</i>	<i>SST (mgD/L)</i>
	<i>data</i>	<i>data</i>	<i>data</i>
Ignacio	6,8	4,0	10,8
judía	11,4	4,5	15,9
Esperanza	17,5	4,0	21,5
Botánico	26,7	8,9	35,6
Pórtico	34,0	11,0	45,0
Callejuelas	44,0	72,0	116,0
Caneys	56,0	60,0	116,0

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 15 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

3. INFORMACIÓN HIDROGEOMÉTRICA DEL RÍO FRÍO

La hidrogeometría el río se presenta dividida en tres zonas: una zona alta de alta pendiente y alta rugosidad manning, una segunda de pendiente mediana y una mayor amplitud en el ancho del río y finalmente una zona baja de poca pendiente y ancho muy amplio > 20 m, mayor profundidad.

Tabla N° 10. Cotas de la microcuenca Río Frío

TRAMO	X (km)	Cota Up (m)	Cota Down (m)
Ignacio	3,00	2091	1834
Judía	6,62	1834	1308
Esperanza	3,37	1308	1108
Botánico	2,77	1108	924
Pórtico	4,96	924	770
Callejuelas	2,90	770	715
Caneyes	3,00	715	697

Fuente: Autor

De acuerdo con la información recogida de campo se determinan algunas variables geográficas de la microcuenca.

Tabla N° 11. Geografía de la microcuenca Río Frío

TR	ESTACIÓN	COORDENADAS		X	UBICACIÓN		
		LAT (N)	LONG (E)	Km	UP	DOWN	s
CAB	Truchera	1280857	1116598				
1	San Ignacio	1280580	1114780	3.00	26,62	23,62	0,0857
2	Judía	1276021	1112782	6,62	23,62	17	0,0795
3	Esperanza	1274252	1111654	3,37	17	13,63	0,0593
4	Botánico	1273476	1109245	2,77	13,63	10,86	0,0664
5	Pórtico	1273120	1105215	4,96	10,86	5,9	0,0310
6	Callejuelas	1272617	1102788	2,9	5,9	3	0,0190
7	Caneyes	1273097	1100822	3	3	0	0,0060

El tiempo de recorrido del río se validó con un trazador conservativo, calculando el coeficiente de dispersión y geoposicionamiento.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 16 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 12. Sistema Hidrogeométrico del río Frío

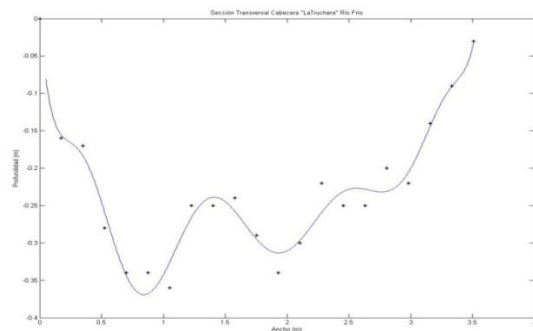
TRAMO	Distancia	U	T_v	T_v
	x(km)	m/s	(d)	(Acumulado)
Ignacio	26,6	0,55	0,063	0,063
judía	23,6	0,54	0,142	0,205
Esperanza	17	0,6	0,065	0,27
Botánico	13,6	0,63	0,051	0,321
Pórtico	10,9	0,64	0,09	0,411
Callejuelas	5,9	0,91	0,037	0,448
Caneyes	3	0,83	0,041	0,489

3.1 ÁREAS TRÁNSVERSALES DE LOS TRAMOS DEL RÍO FRÍO

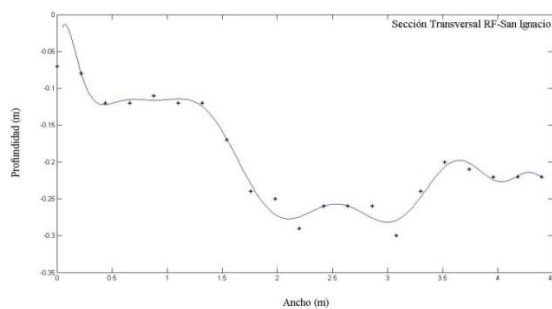
El cálculo del área transversal se logra obteniendo una matriz de [ancho (Bi) – Profundidad (Hi)] en 21 secciones a lo ancho del río (B) en un punto definido de acuerdo a los requisitos descritos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La matriz logra establecer una curva a la cual se le calcula el polinomio que cumple dicho perfil y se determina la integral a l polinomio, generalmente de grado 10 o 12.

$$At = \int_0^B F(x) \quad (1)$$

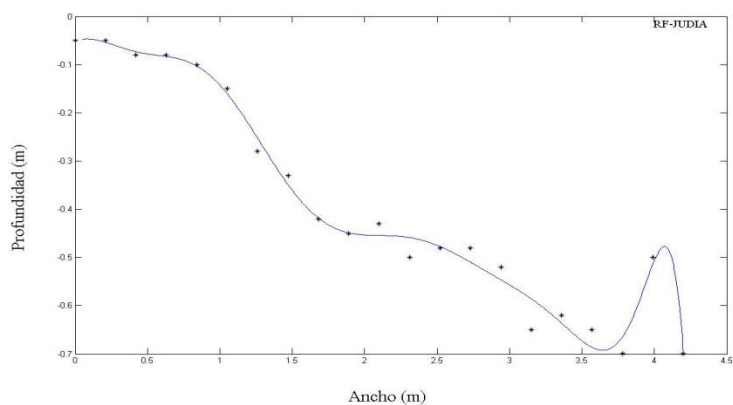
Gráfica 1. Área Transversal de la estación de Cabecera (Truchera)



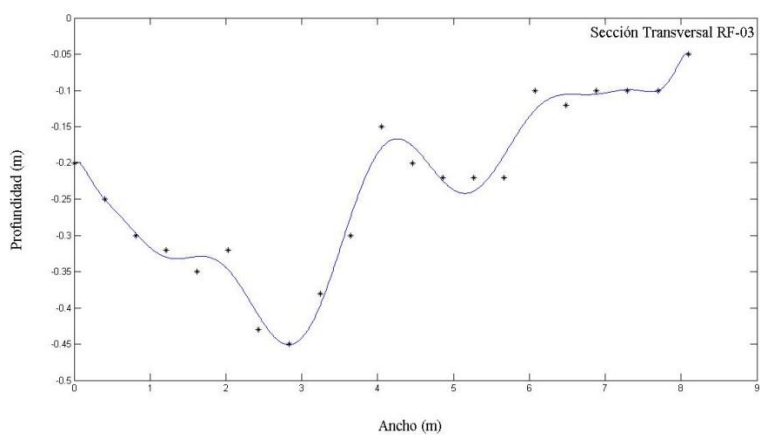
Gráfica 2. Área Transversal de la estación (San Ignacio)



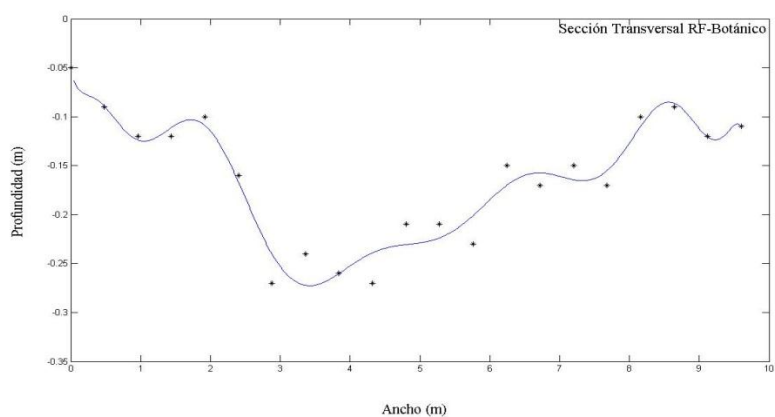
Gráfica 3. Área Transversal de la estación (Judía)



Gráfica 4. Área Transversal de la estación (Esperanza)

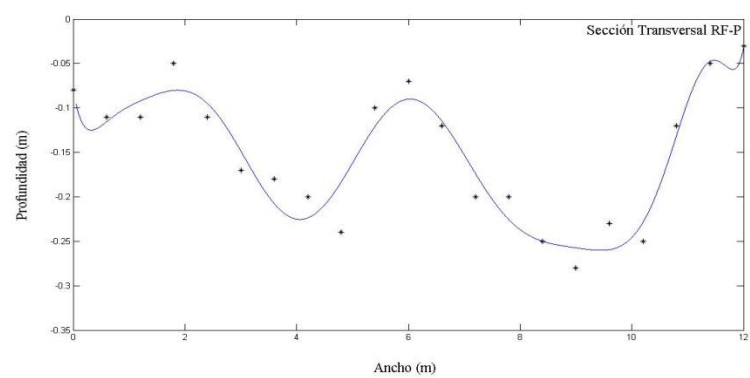


Gráfica 5. Área Transversal de la estación (Jardín Botánico)

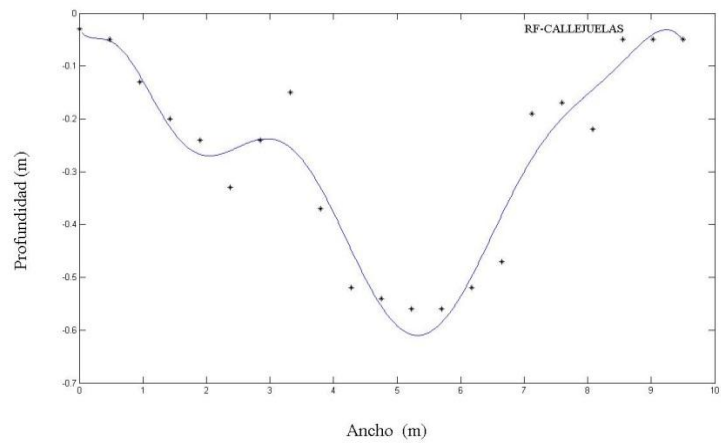


	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 18 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

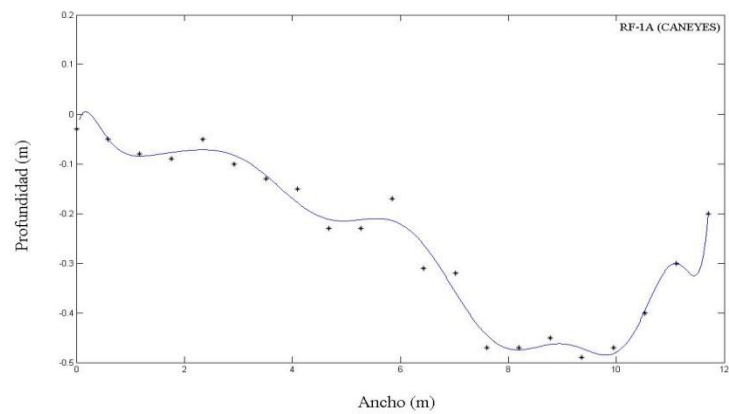
Gráfica 6. Área Transversal de la estación (Pórtico)



Gráfica 7. Área Transversal de la estación (Callejuelas)



Gráfica 8. Área Transversal de la estación (Caneys)



	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 19 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 13. Sistema Hidrogeométrico del río Frío

TRAMO	AT (m ²)
Ignacio	6,38
Judía	6,58
Esperanza	6,55
Botánico	6,90
Pórtico	7,96
Callejuelas	16,45
Caneys	13,53
PROMEDIO	9,19

De acuerdo con las secciones ilustradas anteriormente se puede observar que el área oscila entre 6 y 17 m², esto representa un típico río de montaña con carteras batimétricas heterogéneas.

3.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN – CDL

En esta estación tomada como cabecera de la modelación hidráulica se presenta una dispersión normal típica de un río de montaña.

El proceso para la determinación del CDL, se define de acuerdo al estudio del tipo de trazador que se va a utilizar. Para éste caso es suficiente el uso de un trazador conservativo de NaCl, con inyección instantánea en un segmento de aproximadamente 100 m.

La determinación de la dispersión se define por la varianza de la concentración de sólidos disueltos en el segmento en un lapso de tiempo mientras dura el pico de aumento de los sólidos en el río. De esta manera se calcula la velocidad media, el tiempo de viaje y finalmente el coeficiente de dispersión longitudinal (CDL).

3.2.1 CDL Cabecera (Truchera)

En esta estación se tomaron 83 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (21 mg.L⁻¹) se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.54 m.s⁻¹ y un CDL = 5.86 m².s⁻¹.

3.2.2 CDL Tramo San Ignacio

En este tramo se tomaron 85 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (24 mg.L⁻¹) se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.55 m.s⁻¹ y un CDL = 6.38 m².s⁻¹.

3.2.3 CDL Tramo Judía

En este tramo se tomaron 82 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (27 mg.L⁻¹) se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.54 m.s⁻¹ y un CDL = 6.58 m².s⁻¹.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 20 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

3.2.4 CDL Tramo Esperanza

En este tramo se tomaron 73 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (29 mg.L⁻¹) se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.6 m.s⁻¹ y un CDL = 6.55 m².s⁻¹.

3.2.5 CDL Tramo Botánico

En este tramo se tomaron 80 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (33 mg.L⁻¹) se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.63 m.s⁻¹ y un CDL = 6.90 m².s⁻¹.

3.2.6 CDL Tramo Pórtico

En este tramo se tomaron 80 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (77 mg.L⁻¹) se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.64 m.s⁻¹ y un CDL = 7.96 m².s⁻¹.

3.2.7 CDL Tramo Callejuelas

En este tramo se tomaron 110 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹ y un volumen de 4 L, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (269 mg.L⁻¹) es casi 4 veces más que en el pórtico debido a la carga orgánica que soporta este tramo por la presencia de 3 vertidos doméstico y una fuente de dilución. La información detallada del comportamiento del trazador se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.91 m.s⁻¹, la mayor de todo el río y un CDL = 16.45 m².s⁻¹, también el mayor del perfil longitudinal.

3.2.8 CDL Tramo Caneyes

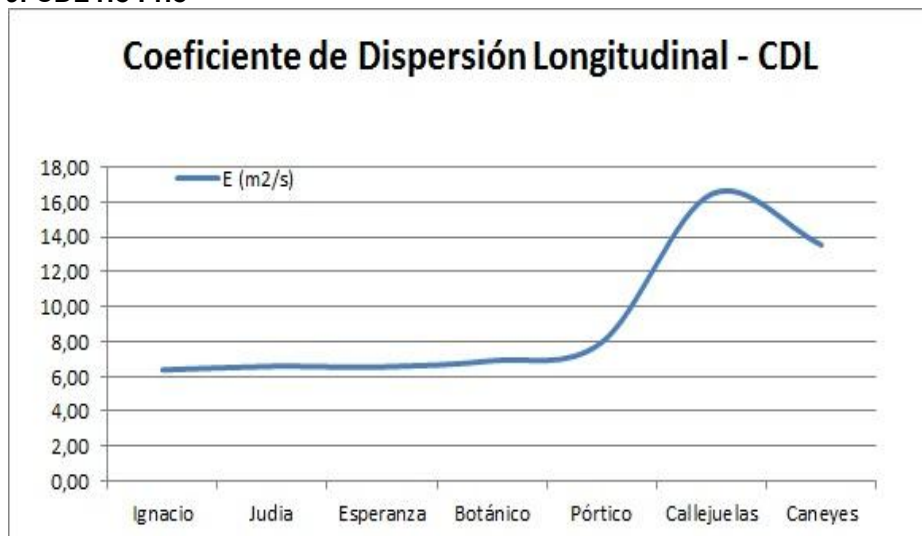
En este tramo se tomaron 100 m de longitud para agregar el trazador con una concentración de 600 g NaCl.L⁻¹ y un volumen de 4 L, el comportamiento de la concentración de sólidos disueltos (267 mg.L⁻¹) es casi 4 veces más que en el pórtico debido a la carga orgánica que soporta este tramo por la presencia de 3 vertidos doméstico y una fuente de dilución. Es evidente que la carga orgánica disuelta no se alcanza a disminuir en el trayecto de casi 3 Km debido a la gran cantidad de desechos que le vierten al río. La información detallada del comportamiento del trazador se encuentra en el anexo en Excel. La prueba arrojó una velocidad de 0.83 m.s⁻¹, disminuye debido a la baja pendiente (0.6%) y un CDL = 13.53 m².s⁻¹, alto debido a la velocidad el flujo, esto hace que el impacto sea mayor.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 21 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 14. Comportamiento del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en la Microcuenca Río Frío

TRAMO	E (m ² /s)
Ignacio	6,38
Judía	6,58
Esperanza	6,55
Botánico	6,90
Pórtico	7,96
Callejuelas	16,45
Caneyes	13,53
PROMEDIO	9,19

Gráfica 9. CDL río Frío



	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 22 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

**Tabla N° 15. Constantes empíricas para Curva de Gastos
Microcuenca Río Frío**

TRAMO	<i>Q</i>	<i>H</i>	<i>U</i>	α	β	<i>a</i>	<i>b</i>
	<i>m³/s</i>	<i>m</i>	<i>m/s</i>				
Ignacio	0,86	0,236	0,55	0,04	0,61	0,36	0,34
judía	0,9	0,48	0,54	0,20	0,37	0,32	0,28
Esperanza	1,92	0,32	0,6	0,01	0,66	0,41	0,22
Botánico	1,44	0,2	0,63	0,03	0,75	0,43	0,17
Pórtico	1,78	0,25	0,64	0,05	0,68	0,44	0,15
Callejuelas	2,42	0,3	0,91	0,09	0,52	0,89	0,00
Caneyes	2,48	0,3	0,83	0,08	0,52	0,75	0,01

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 23 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

4. CINÉTICA DE DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

4.1 TASA DE DESOXIGENACIÓN

La DBO, en un río puede degradarse, si tomamos la dinámica del cuerpo de agua como un reactor que toma aire y se encuentra en constante movimiento, recordemos que la DBO puede ser removida también por sedimentación. La forma de describir matemáticamente la degradación de la DBO en un río sería:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -U \frac{\partial L}{\partial x} - k_r L \quad (2)$$

Donde:

k_r = tasa total de remoción (d^{-1}), la cual se compone de:

$$k_r = k_d + k_s \quad (3)$$

Donde:

k_d = Tasa de descomposición en el río (d^{-1}).

k_s = Tasa de sedimentación removida en el río (d^{-1}).

Se debe reconocer que el experimento con la botella winkler (obtención K_1) representa el mismo proceso de descomposición en el río (K_d) definido por la ecuación (x). Para el cálculo de la tasa de sedimentación k_s , se obtiene de la hidrogeometría del río así:

$$k_s = \frac{v_s}{H} \quad (4)$$

Donde:

v_s = Velocidad de sedimentación de la DBO (md^{-1}).

H = Profundidad del río (m).

En un estado estable sería:

$$0 = -U \frac{dL}{dx} - k_r L \quad (5)$$

Una descarga, se asume que en la localización de la descarga ocurre el punto de mezcla, el cual se puede calcular como sigue:

$$L_0 = \frac{Q_w L_w + Q_r L_r}{Q_w + Q_r} \quad (6)$$

Luego el cálculo de la DBO en el tiempo t , puede ser:

$$L = L_0 e^{-\frac{k_r}{U} x} \quad (7)$$

Donde:

U = velocidad media del río ($m.s^{-1}$)

x = longitud de recorrido entre la descarga y la medición de DBOC.

Así la DBO es reducida por descomposición y sedimentación aguas abajo del vertido en el río definido por la siguiente ecuación:

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 24 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

$$\ln L = \ln L_0 - \frac{k_r}{U} x \quad (8)$$

Si despejamos k_r , nos queda:

$$k_r = \frac{(\ln L_0 - \ln L) * U}{x} \quad (9)$$

Donde x , es la longitud del tramo y U la velocidad media del tramo.

Los valores típicos e K1 para la descomposición DBO en botella se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N° 16. Valores típicos de tasas de descomposición de la DBO en diferentes niveles de tratamiento

Tratamiento	K _r (20°C)	DBOC ₅ /DBOC _U
Sin tratar	0.35 (0.20-0.50)	0.83
Primario	0.20 (0.10-0.30)	0.63
Lodos Activados	0.075 (0.05-0.10)	0.31

Tabla N° 17. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia

	Caudal Per-cápita (m ³ d ⁻¹)	DBOC (mg L ⁻¹)
Colombia	0.14	380
USA	0.57	220
Otros países	0.19	320

Para calcular la DBO₅ debe utilizar la siguiente ecuación:

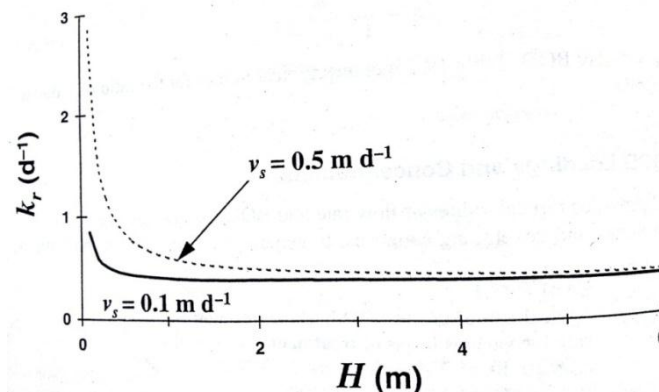
$$L_o = \frac{y_5}{1 - e^{-k_1(5)}} \quad (10)$$

Donde:

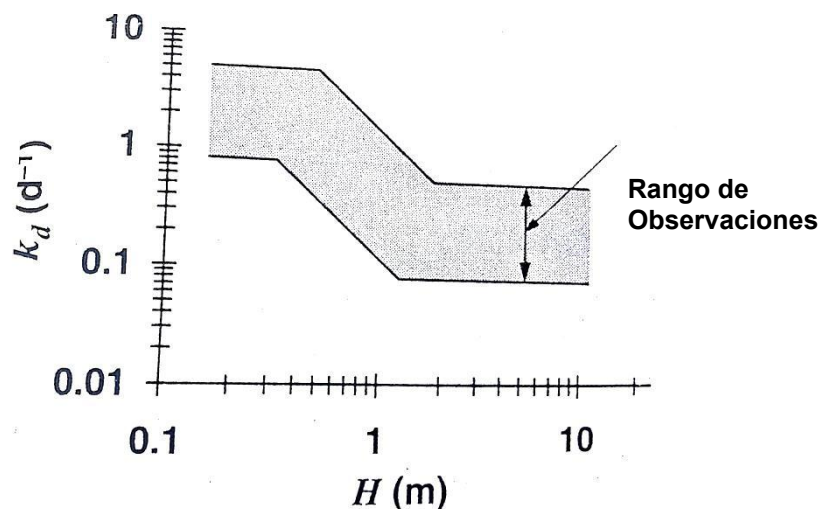
y_5 = es la DBO en el 5° día, en la Tabla N° 8. Se encuentran los valores que relacionan la DBOC₅ con la DBOC_U.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 25 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Gráfica N° 10 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad del río para un 50% DBO sedimentable, representada para un rango de velocidad de sedimentación (v_s)



Gráfica N° 11 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad



Es de esperarse que la tasa de la botella no sea aplica directamente para ríos, porque la botella no representa ambientalmente un río. De hecho solo en ríos profundos y lentos es que converge. En muchos otros ríos, los factores ambientales hacen que se remueva aun más que en la botella. La primera causa de este incremento son la sedimentación y los efectos del bento.

La Sedimentación. Es un efecto relativo, de hecho para en aguas residuales con fracciones de sólidos orgánicos significativos. La tasa de remoción total en el río es una combinación entre sedimentación y descomposición, mostrado en la ecuación (xx). Quedando entonces.

$$k_r = k_d + \frac{v_s}{H} \quad (11)$$

Usando algunas velocidades de sedimentación, se puede observar en la gráfica (3) que el efecto de la sedimentación puede ser particular y significativo para aguas residuales crudas, poco profundas (< 1 m).

Efectos del Lecho: Todos las otras cosas, igualmente son atacadas por bacterias, las cuales son más efectivas en la descomposición. La descomposición del fondo puede ser parametrizada como una transferencia de masa o flujo de DBO. Así un camino similar para la sedimentación es la descomposición en el fondo, se convierte más en sistemas superficiales

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 26 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

debido a que el efectos al convertir más volumen de agua, relativamente en la descomposición. Esta tendencia se muestra en la gráfica (3)

Algunas ecuaciones para calcular la tasa de descomposición de acuerdo a (Hydroscience, Inc , 1971) son:

$$0 \leq H \leq 8 \text{ pies} \quad k_d = 0.3 \left[\frac{H}{8} \right]^{-0.434} \quad (12)$$

$$H > 8 \text{ pies} \quad k_d = 0.3 \quad (13)$$

Así para profundidades superiores a 2.4m (8 pies) la tasa decrece con la profundidad. Por encima de 2.4 m la tas se aproxima al valor constante de 0.3, típico en tasas de botella.

Finalmente la tasa de descomposición de DBO puede ser extrapolada al usar otra temperatura, usando la ecuación siguiente.

$$k = k_{20} \theta^{T-20} \quad (14)$$

Donde:

k = Tasa a temperatura (T)

k_{20} = Tasa de descomposición a 20 °C.

θ = Constante = 1,047

En resumen la tasa de la DBO removida tiende a incrementarse con la temperatura y tiende a ser alta aguas debajo de fuentes puntuales. Los efectos posteriores son mayores para aguas residuales sin tratar. La sedimentación mejora con aguas poco profundas, en sistemas generalmente de baja profundidad existe una mayor tasa de remoción de DBO.

Tabla N° 18. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia

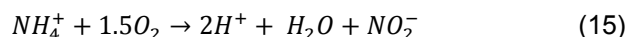
Tramo	Kd (d ⁻¹)	Kd (d ⁻¹)	Ks (d ⁻¹)	Kr (d ⁻¹)
	Río	Ec. Hydroscience		
RF-S	0,017	1,42	0,45	1,87
RF-J	0,010	1,28	0,35	1,63
RF-03	0,014	1,25	0,34	1,59
RF-BO	0,024	1,65	0,64	2,29
RF-P	0,127	1,64	0,63	2,27
RF-C	0,587	1,14	0,27	1,41
RF-1A	0,022	1,18	0,29	1,47

4.2 TASA DE NITRIFICACIÓN

Se ha notado que además de la demanda de oxígeno para oxidar el carbono ocurre adicionalmente una demanda de oxígeno para la oxidación del amonio a nitrato en los procesos de nitrificación llamada Demanda bioquímica de oxígeno nitrogenada DBON.

Adicionalmente a la DBO carbonacea, los compuestos de nitrógeno existentes en aguas residuales también tienen un impacto en los reservorios de oxígeno de los ríos. Las aguas residuales contienen nitrógeno orgánico en compuestos como (proteínas, urea, etc) y el amonio, con el tiempo los compuestos de nitrógeno orgánico es hidrolizado para crear amonio adicional, entonces las bacterias autótrofas asimilan el amonio para crear nitrito (NO₂⁻) y nitrato (NO₃⁻). La conversión de amonio a nitrato se le denomina "nitrificación", de acuerdo a la reacciones de (Gaudy, 1980). Primero las bacterias del genero *Nitrosomonas* , convierten en el ion amonio (NH₄⁺) a nitrito.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 27 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1



Segundo, la bacteria del genero *Nitrobacter* convierte el nitrito en nitrato.



La tasa de crecimiento de las dos bacterias es generalmente mas lento con bacterias heterotróficas (días, comparado a horas). Adicionalmente la conversión de nitrito a nitrato es mas rápida que la de amonio a nitrito, este proceso se describe en 3 tiempos con la misma energía acumulada entre las reacciones. De esta manera el oxígeno consumido para los dos estados se puede calcular.

$$r_{oa} = \frac{1.5(32)}{14} = 3.43 \text{ gO gN}^{-1} \quad (17)$$

$$r_{oi} = \frac{0.5(32)}{14} = 1.14 \text{ gO gN}^{-1} \quad (18)$$

Donde:

r_{oa} = representa el oxígeno consumido para el para la conversión de amonio a nitrito

r_{oi} = representa el oxígeno consumido para el para la conversión de nitrito a nitrato.

Todo el proceso se puede representar como

$$r_{on} = r_{oa} + r_{oi} = 4.57 \text{ gO gN}^{-1} \quad (19)$$

Donde

r_{on} = es la cantidad de oxígeno consumido por unidad de nitrógeno oxidado en todo el proceso de nitrificación.

Para que exista la nitrificación, deben existir los siguientes factores:

1. Presencia suficiente de bacterias nitrificantes.
2. Un pH alcalino, alrededor de 8.

Suficiente oxígeno (1 a 2 mg L⁻¹).

Las ecuaciones se validan con la información recogida en campo en tiempo real (tiempo de viaje del río Frío) en cada tramo. Se usa MatLab ® para validar la concentración de las diferentes especies de nitrógeno y de esta manera calcular la K para el valor N_t. Los resultados se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla N° 19. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia

TRAMO	T_v	K_{oa}	K_{ai}	K_{in}
	(d)	(d ⁻¹)	(d ⁻¹)	(d ⁻¹)
Ignacio	0,063	0,00	0,03	0,00
judía	0,142	0,00	0,19	0,19
Esperanza	0,065	0,21	0,25	0,12
Botánico	0,051	0,25	0,28	0,23
Pórtico	0,090	0,28	0,26	0,75
Callejuelas	0,037	0,32	0,30	0,78
Caneyes	0,041	0,24	0,42	0,87

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUECNA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 28 De 50 Rev: 1
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	

4.3 TASA DE REAIREACIÓN

Proceso en el que el aire es reintroducido con el fin de incrementar la concentración de oxígeno disuelto después de que el oxígeno ha sido agotado por algún proceso químico o biológico. Se conoce como reaireación el proceso por el cual el oxígeno y demás componentes gaseosos del aire son renovados en las aguas en movimiento de un río. La reaireación es también un fenómeno complejo y los patrones que la controlan son bastante diferentes de los que afectan la desoxigenación. Es importante, en consecuencia. Estudiar estos patrones, así como los procedimientos matemáticos para predecir las ratas reales de reaireación. Si por alguna razón el nivel de OD en el agua es menor que el valor de saturación, el agua disuelve más oxígeno de la atmósfera y se acerca nuevamente al nivel de saturación. Según la ley de Henry, a temperatura constante, la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial del gas. La tasa de solubilización del oxígeno es proporcional al déficit de saturación, como lo indica la ecuación.

$$\frac{dD}{dt} = -k_2 D \quad (20)$$

Integrando

$$D = D_0 * e^{(-K_2 T)} \quad (21)$$

Dónde:

D = déficit de OD para el tiempo t , mg/L

D_0 = déficit inicial de OD, mg/L

k_2 = constante de reaireación, base natural, d^{-1}

Expresando la ecuación en términos de concentraciones de OD, se obtiene;

$$\frac{(C_s - C)}{(C_s - C_0)} = -k_2 t \quad (22)$$

Dónde:

C = concentración de OD para el tiempo t , mg/L

C_0 = concentración inicial OD, mg/L

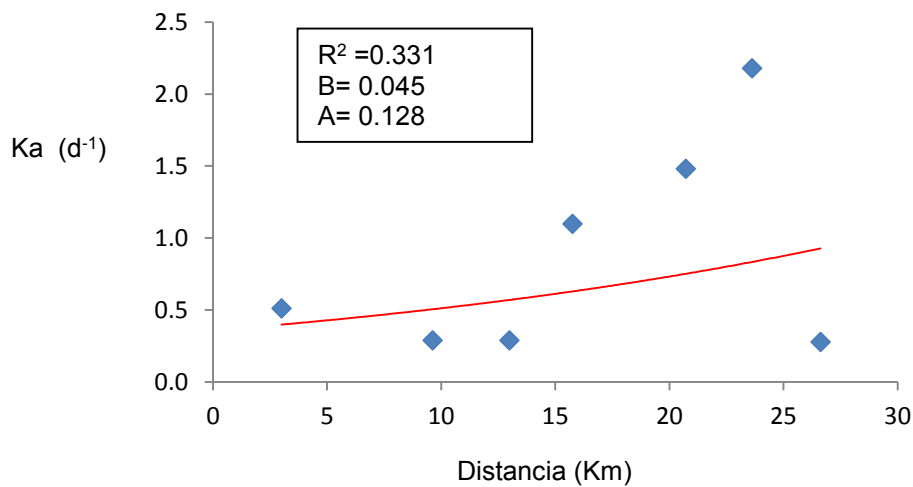
C_s = concentración de saturación de OD, mg/L

La solubilización del oxígeno puede ocurrir sólo en la interfaz aire-agua, donde una película delgada de agua es rápidamente saturada. La tasa de reaireación posterior depende de la difusión del oxígeno a través del cuerpo de agua, la cual es muy lenta. En ríos turbulentos la capa superficial saturada se rompe continuamente y el proceso de reaireación se efectúa más rápido (Imagen 1).

Tabla N° 20. Regresión lineal de la K_a en la Microcuenca Río Frío

TRAMO	X	X acum	OD	ODS	$\ln(C_s - C_i)/(C_s - C_0)$ Ka
	(km)	(km)	(mg/L)	(mg/L)	(d^{-1})
Cab	0	0	8,1	8,4	0,000
Ignacio	3	3	8,0	8,3	0,511
Judía	6,62	9,62	7,9	8,3	0,288
Esperanza	3,37	12,99	7,8	8,2	0,288
Botánico	2,77	15,76	7,6	7,9	1,099
Pórtico	4,96	20,72	6,9	7,8	1,482
Callejuelas	2,9	23,62	3,2	7,4	2,179
Caneyes	3	26,62	1,8	7,4	0,278

Gráfica N° 12 Tasa de remoción (kr) versus profundidad



Para valorar la constante de reaireación (K_2) se han desarrollado varias ecuaciones con base en estudios de ríos, con muy diferentes características hidráulicas. Entre las más comunes se citan las siguientes: Texas, Churchill, Owens, Tsivoglou, O'connors, entre otras.

(O'Connor, 1958)

$$K_2 = \frac{DL \cdot V^{1/2}}{H^2} \quad (23)$$

(Churchill, M. A., Elmore, H. L y Buckingham, R.A, 1962)

$$K_2 = \frac{5,03 \cdot V^{0,969}}{H^{1,673}} \quad (24)$$

(Owens,.M., Edwards, R., y Gibbs, 1964)

$$K_2 = \frac{5,34 \cdot V^{0,67}}{H^{1,85}} \quad (25)$$

(Tsivoglou, E. C. y Wallace, S. R, 1972)

$$K_2 = CSV = 0,17 * \frac{N \cdot V^2}{d^{4/3}} \quad (26)$$

(Texas Water Development Board, 1970)

$$K_2 = \frac{1,923 \cdot V^{0,273}}{H^{0,894}} \quad (27)$$

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 30 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 21. Tasas de Reaireación utilizando Ecuaciones Estocásticas

TRAMO	Ka (d ⁻¹)		K2 (d ⁻¹)				
	Río	Texas	O'connors	Churchill	Owens	Durum	Tsivoglou
Ignacio	0,51	3,32	0,05	22,06	34,06	5,68	0,02
judía	0,29	3,96	0,05	15,47	26,37	4,28	0,02
Esperanza	0,29	4,35	0,05	14,54	25,72	4,08	0,02
Botánico	1,10	8,63	0,15	47,54	94,52	10,68	0,02
Pórtico	1,48	8,38	0,13	36,72	79,75	8,22	0,01
Callejuelas	2,18	5,36	0,05	16,08	26,78	4,86	0,03
Caneyes	0,28	6,21	0,07	24,82	38,13	7,36	0,04

Haciendo la validación del oxígeno en el río y correlacionándolo con el saturado en cada tramo se obtiene un curva del oxígeno remanente con una tasa “Río” que oscila entre 0.28 y 2.18 d⁻¹. Si se compara esta tasa “Ka - Río” con las obtenidas por ecuaciones se puede decir que la que más se ajusta a la tomada en río es la ecuación de “Texas”, ya que las demás generar valores muy altos.

4.4 TASA DE SEDIMENTACIÓN

La Sedimentación es un efecto relativo, de hecho para aguas residuales con fracciones de sólidos orgánicos significativos. La tasa de remoción total de la DBO en el río es una combinación entre sedimentación y descomposición, mostrado en la ecuación (22). Quedando entonces.

$$k_s = \frac{v_s}{H} \quad (28)$$

Usando una velocidad de 0.31 m. d⁻¹, la tas sedimentación, oscila entre 0.29 t 0.64 d⁻¹, como se ilustra en la siguiente tabla. El efecto de la sedimentación puede ser particular y significativo para aguas residuales crudas en río poco profundos (< 1 m) como es nuestro caso.

Tabla N° 22. Tasas de Reaireación utilizando Ecuaciones

Tramo	H (m)	Ks (d ⁻¹)
RF-S	0,236	0,45
RF-J	0,48	0,35
RF-03	0,32	0,34
RF-BO	0,2	0,64
RF-P	0,25	0,63
RF-C	0,3	0,27
RF-1A	0,3	0,29

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 31 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

5. MODELAMIENTO DE LA AUTOPURIFICACIÓN EN EL RÍO FRÍO

El modelamiento de la autpurificación, se logra obteniendo la suficiente información de campo como: el sistema hidrogeométrico del río, la caracterización fisicoquímica, microbiológica e hidrobiológica y la hidráulica del cuerpo de agua.

El proceso de autpurificación de un río de montaña es un fenómeno natural que se genera en el cuerpo lótico con el fin de lograr la estabilización del oxígeno disuelto y en la columna de agua y de esta manera mantener los ecosistemas que dependen de una concentración abundante de oxígeno para sobrevivir. El río tiene dos formas de adquirir oxígeno: una es por absorción del oxígeno atmosférico y otra forma es por fotosíntesis de plancton o algas. La más común es la primera en la que el río debido a la turbulencia y caídas del agua genera una absorción del gas en la columna de agua. Por otra parte esta la pérdida del oxígeno debido a la demanda generada por diferentes contaminantes del agua como: los metales pesados, la materia orgánica natural y la adquirida por vertidos y la evaporación por calentamiento del agua debido a altas temperaturas del aire o vertidos con elevados picos de temperatura. El bento también genera una demanda de oxígeno denominada Demanda de oxígeno del sedimento o DOS, esta depende de la cantidad de detritos (MOP) o materia orgánica muerta particulada que se genera en el recorrido del río. Las plantas superiores, microorganismos e inclusive animales superiores e inferiores, generan gran cantidad de material orgánico particulado que se deposita en el bento de los ríos y con el transcurrir del tiempo genera una masa de lodo con microorganismos muertos que sirven de alimento para otros en la cadena autótrofa.

El río logra estabilizarse si no se presentan vertidos que generan más carga orgánica, es decir nitrógeno orgánico y amoniacal, generados por la hidrólisis del nitrógeno orgánico. Posteriormente el nitrógeno amoniacal se oxida a nitrito y nitrato por medio de bacterias que ayudan a que el proceso se acelere o sea más lento dependiendo de la cantidad de oxígeno y la hidrogeometría del río. De igual manera continuamente sucede el proceso de desnitrificación que es la conversión de nitrato a nitrógeno gaseoso el cual se libera a la superficie y de esta manera se cierra el ciclo del nitrógeno en el río. Pues bien, el nitrógeno es el segundo en la fila después del carbono que logra desoxigenar el agua por medio de una cinética de oxidación y sedimentación. El carbono se evalúa por medio de la DBO carbonacea y el carbono orgánico total, estimados en la investigación. La velocidad de descomposición del carbono orgánico genera dos tipos de DBO: una lenta que es cuando existe material recalcitrante y una rápida que es la materia orgánica generada por vertidos domésticos. Otro contaminante que logra desoxigenar el río son los patógenos, que ingresan al río por la acción de los vertidos domésticos, éstos microorganismos suelen alimentarse de materia orgánica pero normalmente tienen un ciclo de vida corto, lo cual genera un decaimiento de dichos microorganismos en el cuerpo de agua, aguas debajo de los vertidos. Existe la posibilidad de que algunos se sedimenten y otros se generen por la presencia de nuevos vertidos lo cual genera una desoxigenación irremediable en el río debido a la alta carga de materia orgánica oxidable en el agua del río.

La capacidad de autpurificación de un río depende de la capacidad de reairearse o de descomponer el carbono y nitrógeno orgánicos. Esto se evalúa mediante la evaluación de las tasas de descomposición, sedimentación, nitrificación y decaimiento de patógenos en el río. Dichas tasas son una serie de relaciones de pérdida o ganancia de una especie contaminante por unidad de tiempo en este caso por día. Las tasas evaluadas para la modelación de la autpurificación son:

1. La tasa de descomposición de la DBOC
2. La tasa de sedimentación de la DBOC
3. La tasa de nitrificación.
4. La tasa de decaimiento de patógenos.

La descomposición de la demanda bioquímica carbonacea, es decir el carbono orgánico en el

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 32 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

río depende de la cantidad de oxígeno en la columna de agua, la velocidad media y la cantidad de materia orgánica del vertido. La tasa de desoxigenación evaluada por botella winkler oscila en un rango de 0.003 y 0.04 d⁻¹. La tasa de desoxigenación definida por la evaluación de perdida en el río osciló entre 0.02 y 0.58 d⁻¹, la tasa evaluada por ecuaciones estocásticas tuvo un rango de 1.2 a 1.7 d⁻¹.

En el caso de la reaeración, depende específicamente de la cantidad de aire atmosférico, la temperatura y las condiciones de flujo. La técnica aplicada fueron dos: la primera por ecuaciones estocásticas, se observa que la ecuación que más tendencia presenta es la de Texas y O'connors, correlacionándola con la obtenida en el río mediante la concentración de oxígeno en los diferentes tramos. El rango obtenido en río fue de 0.29 a 1.48 d⁻¹, la tasa obtenida por Texas oscila entre 3.3 y 8.6 d⁻¹.

La nitrificación, es un proceso más complejo debido a las diferentes especies de nitrógeno que se forman o se consumen durante la reacción, es decir la conversión de nitrógeno orgánico a nitrato, donde se consume el oxígeno del río a medida que se forma el nitrato, el inconveniente es la cantidad remanente de oxígeno y la cantidad que se gana, es decir si la tasa de desoxigenación es mayor que la reaeración la autopurificación no puede suceder. Las tasas de la nitrificación son: La tasa de conversión de Nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal, denominada "Koa", La tasa a la cual se convierte el amonio a nitrito denominada "Kai" y la tasa a la cual se convierte el nitrito en nitrato denominada "Kin". Estas tasas se evaluaron por medio de iteraciones en MatLab con las ecuaciones que (Chapra, 1997), sugiere para simular el proceso de nitrificación. Las tasa de amonificación oscila entre 0.0 a 0.32 d⁻¹, la tasa de conversión de amonio a nitrato oscila 0.0 y 0.87 d⁻¹. Se realizaron iteraciones para validar la s ecuaciones de simulación de la nitrificación establecido por Chapra, 1997), pero no arroja una convergencia con la concentración evaluada en campo, se logró establecer de acuerdo al modelo QUAL2K v 2.03 las tasas ideales de oxidación del nitrógeno orgánico y el amonio en el canal hidráulico río Frío.

En cuanto a la mortalidad de patógenos, depende de la cantidad de patógenos (oscila entre 1000 y 250.000 UFC.L⁻¹ y la tasa de mortalidad y decaimiento, a su vez depende de la cantidad e oxígeno disuelto (8 a 2 mg.L⁻¹) que quede en la columna de agua durante el recorrido del río hasta donde exista un nuevo vertido. La tasa de mortalidad establecida para la mortalidad de patógenos converge en 1 d⁻¹.

Por último, el proceso de sedimentación de la DBOC, depende en gran medida del tamaño de partícula orgánica es decir si se lograr degradar o hidrolizar rápido o por el contrario es muy lenta o recalcitrante. La sedimentación depende directamente con la profundidad del río, en nuestro caso es muy baja (H promedio de 0.6 m), en el cual se genera una tasa elevada de sedimentación (0.1 m.d⁻¹). Es importante aclarar que existe una velocidad de sedimentación de los sólidos inorgánicos (2.8 m.d⁻¹) y otra la velocidad de sedimentación de la DBOC que es aproximadamente de 0.1 m.d⁻¹.

Los resultados de la evaluación de modelación de autopurificación del río frío se presentan a continuación de cuerdo a las gráficas generadas por Qual2K Versión 2.07. El modelo genera las gráficas e cada una de las variables de estados como son: Carbono orgánico, nitrógeno orgánico, fosforo orgánico, patógenos, sólidos, alcalinidad, pH y conductividad del agua en los diferentes tramos del río.

Se ilustra en la primera hoja de cálculo la descripción del modelo y la zona a modelar:

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 33 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

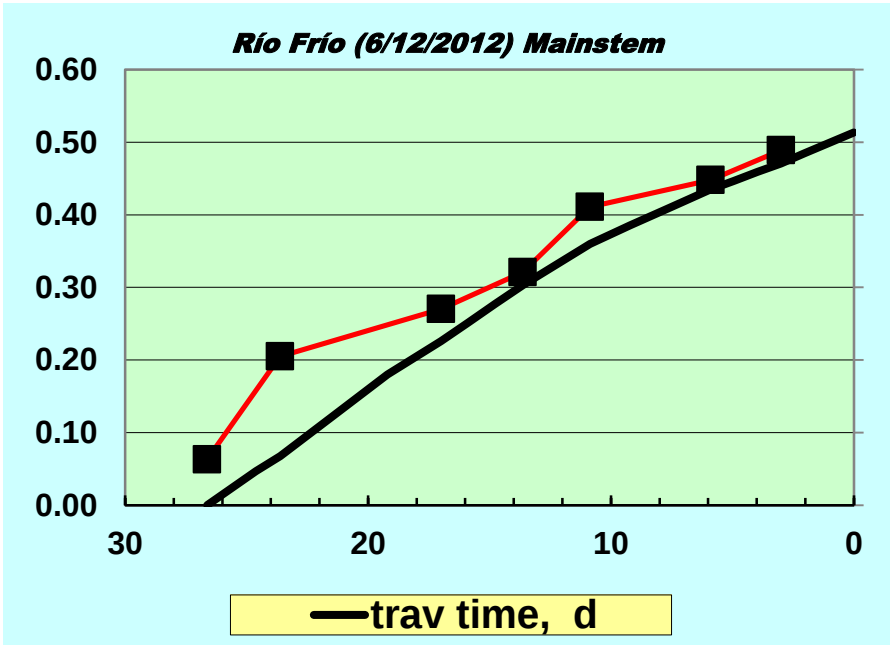
Gráfica N° 13 Descripción del Modelado de Autopurificación del río frío (Mayo 2012)

System ID:		
River name	Río Frío	
Saved file name	RF AUTOPURIFICACIÓN	
Directory where file saved	D:\QUTS virgilio\DataFiles	
Month	6	
Day	12	
Year	2012	
Time zone	Eastern	
Daylight savings time	No	
Calculation:		
Calculation step	0,002	hours
Final time	2	day
Solution method (integration)	Euler	
Solution method (pH)	Bisection	
Program determined calc step	0,001465	hours
Time of last calculation	0,45	minutes
Time of sunrise	5:36 AM	
Time of solar noon	11:52 AM	
Time of sunset	6:08 PM	
Photoperiod	12,53	hours

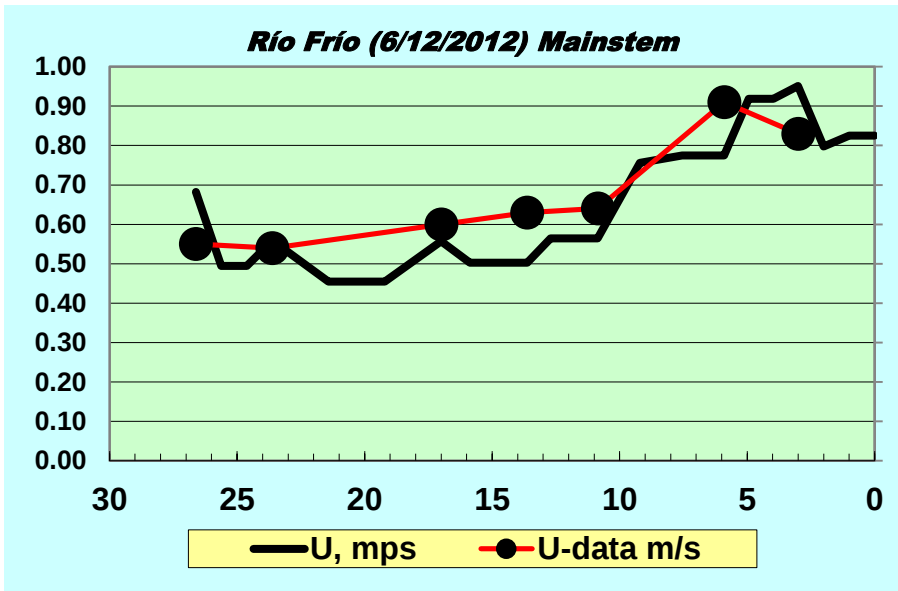
	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 34 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

La hidrodinámica del río se ilustra con base al tiempo de viaje, la velocidad y el flujo del río Frío.

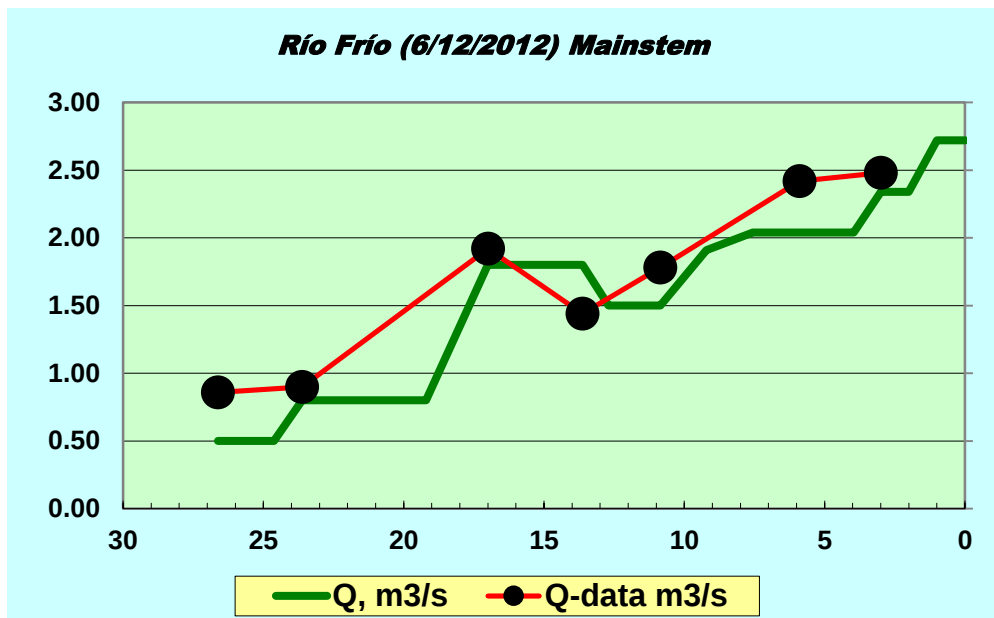
Gráfica N° 14 Tiempo de viaje del río Frío desde (Truchera – Caneyes)



Gráfica N° 15 Comportamiento de la velocidad media del río Frío

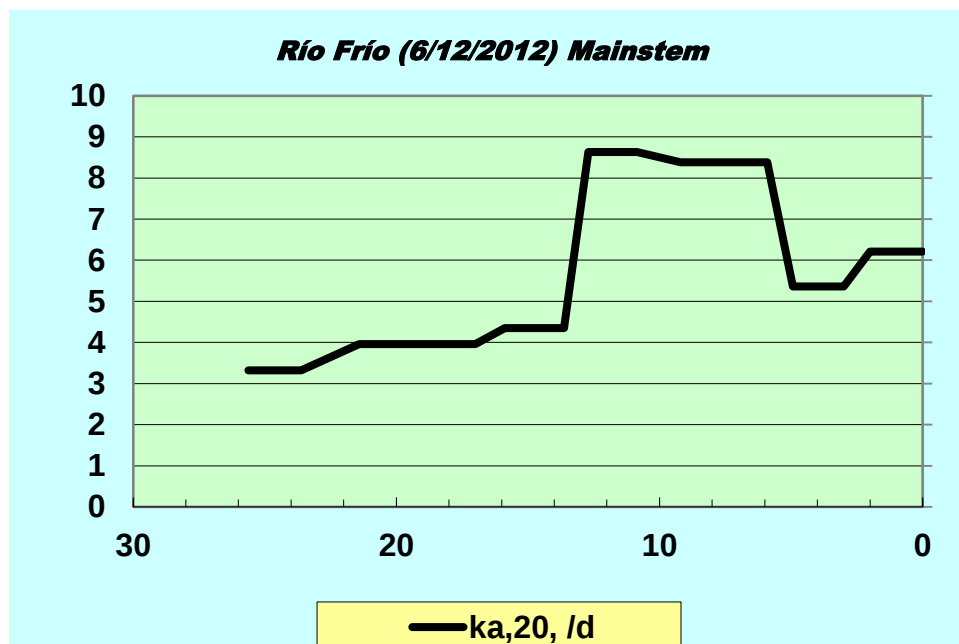


Gráfica N° 16 Modelado del Flujo en el río Frío



La tasa de reaireación, validada con la ecuación de Owens, se ilustra a continuación. Es de aclarar que el modelo permite cambiar el tipo de ecuación, pero se optó por ésta ya que la velocidad del río es en promedio de 0.6 m.s^{-1} y la profundidad de 0.5 m.

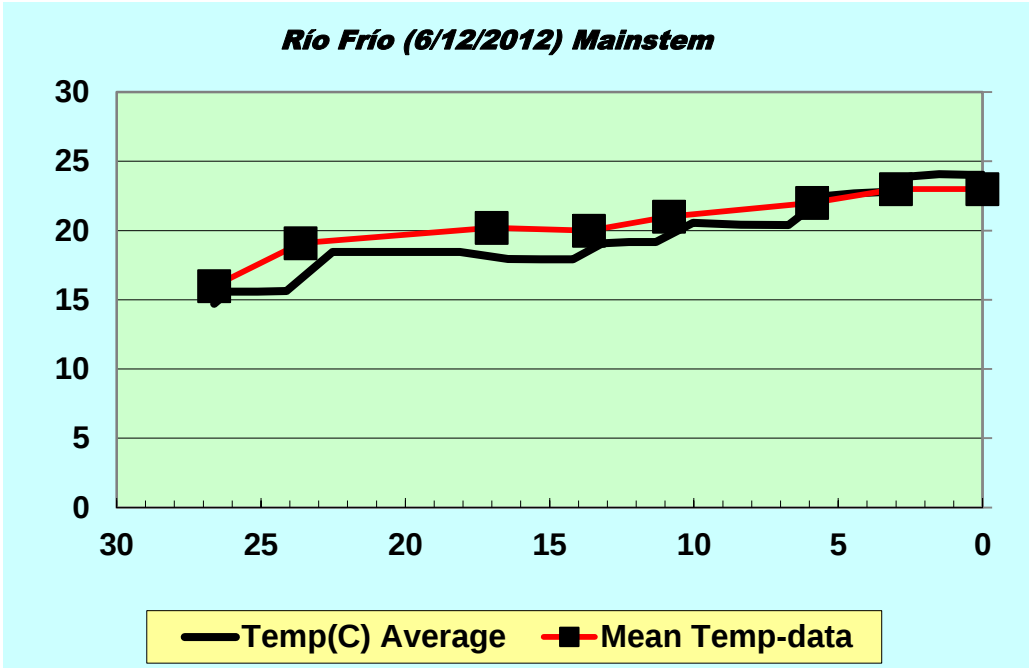
Gráfica N° 17 Modelado de la Reaireación del río Frío



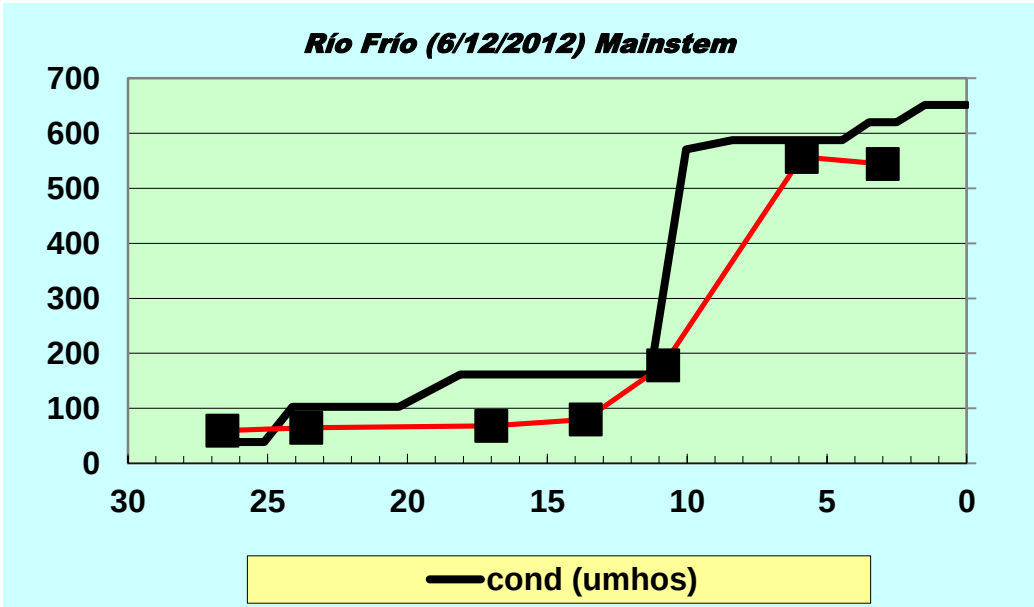
	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 36 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

La temperatura en todo el recorrido oscila entre 15 y 25 °C, esto lo hace entre los pisos térmicos de páramo a zona cálida (1376msnm de diferencia), es decir entre los 2091 y 715 msnm.

Gráfica N° 18 Modelado de la Temperatura del Río Frío



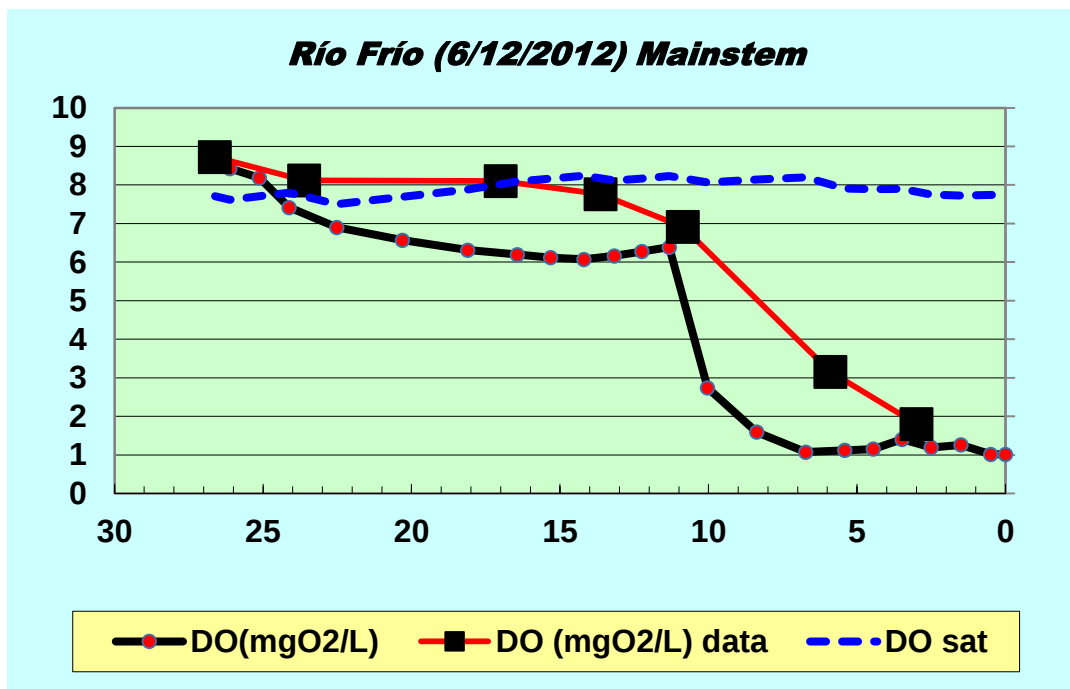
Gráfica N° 19 Modelado de la Conductividad del río Frío



	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 37 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

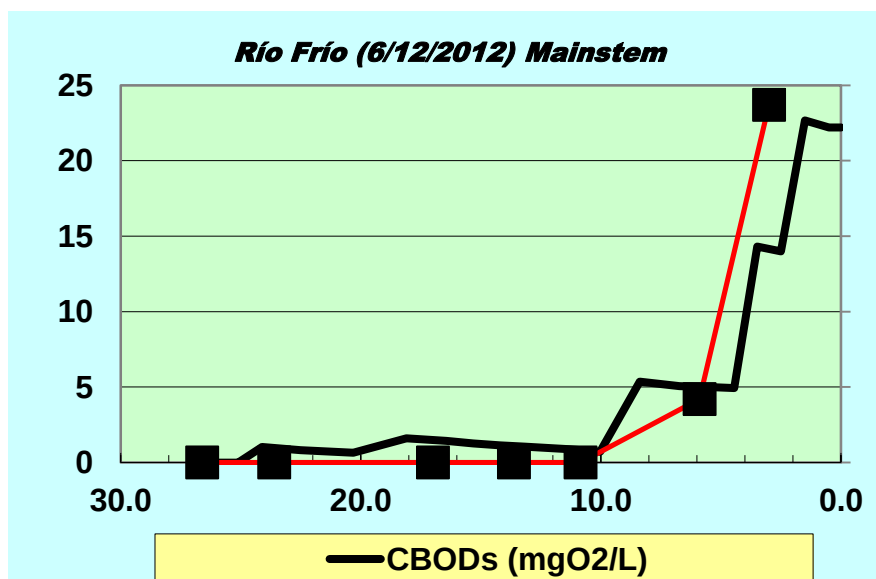
El comportamiento del oxígeno disuelto en la columna de agua es una de la variables más significativas del modelado de autopurificación, en ésta nos muestra la ganancia o pérdida del oxígeno a medida que el río recorre el segmento hidráulico.

Gráfica N° 20 Modelado del OD y el Porcentaje de Saturación

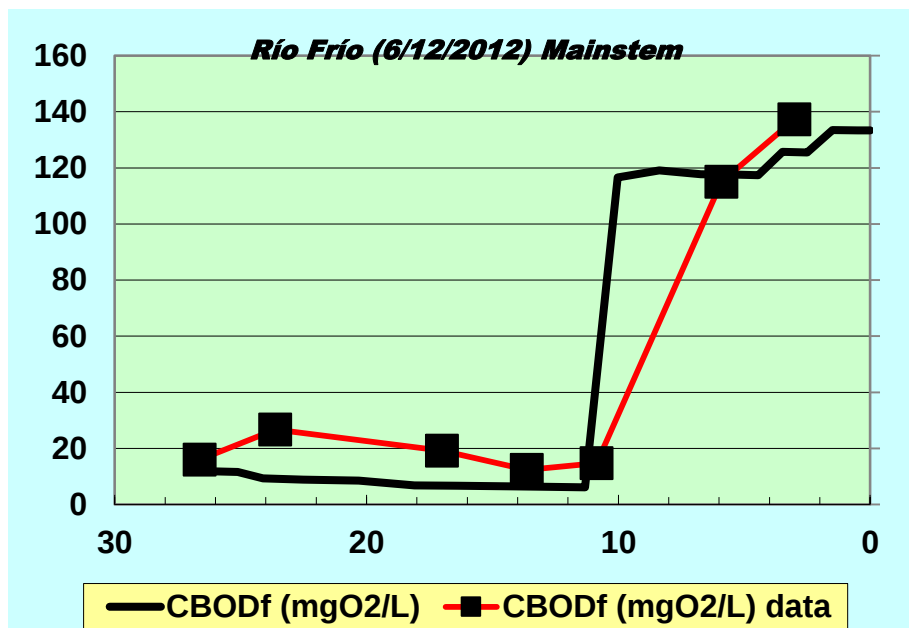


El carbono orgánico, representado en la demanda bioquímica de oxígeno carbonacea DBOC, expresada en reacción rápida (C_f) y lenta (C_s). Se ilustra el comportamiento de la DBOC última, es decir la cantidad de oxígeno demandada por todo el carbono orgánico total presente en la columna de agua en el río.

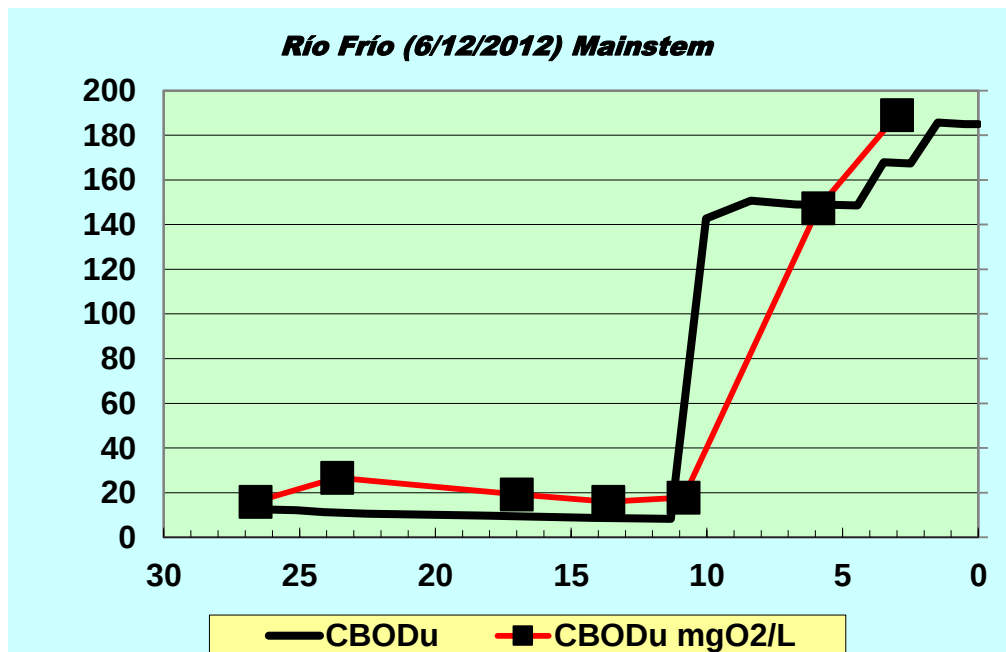
Gráfica N° 21 Modelado de la DBOC lenta



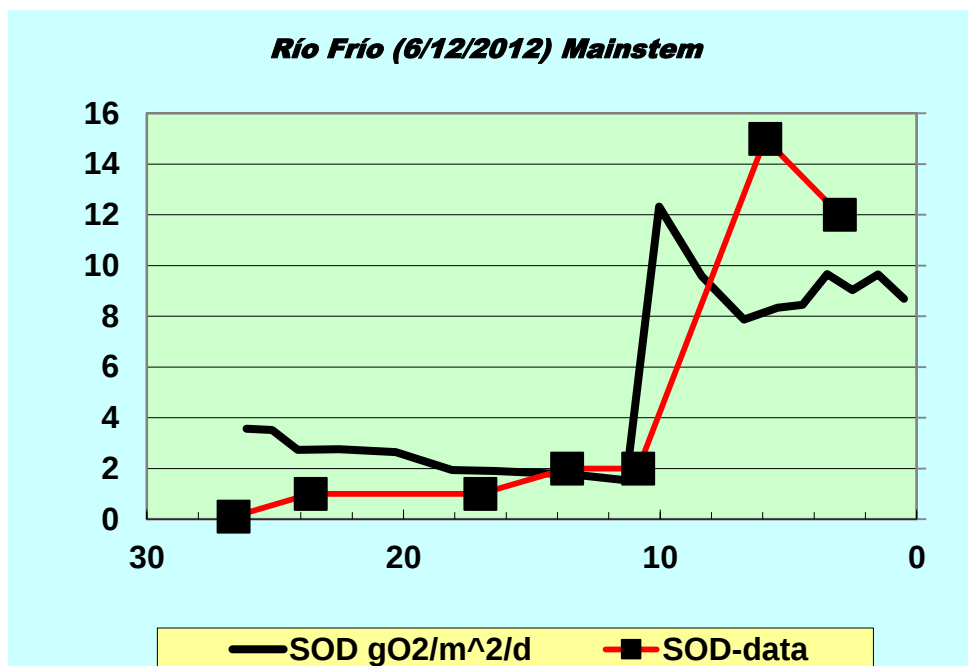
Gráfica N° 22 T Modelado de la DBOC rápida



Gráfica N° 23 Modelado de la DBOC última

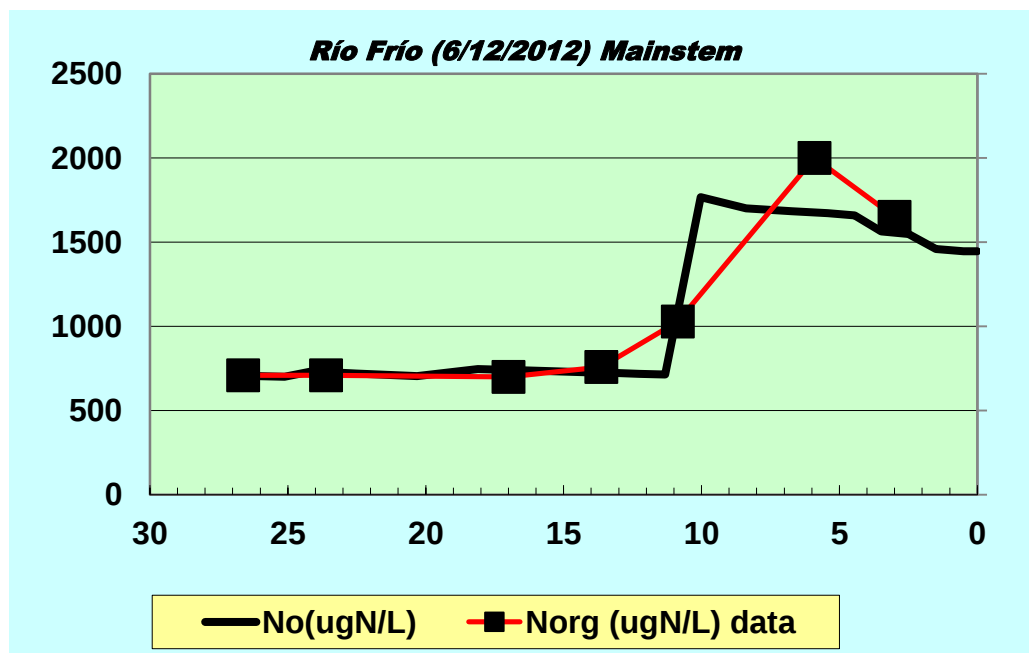


Gráfica N° 24 Modelado de la DBO del bento

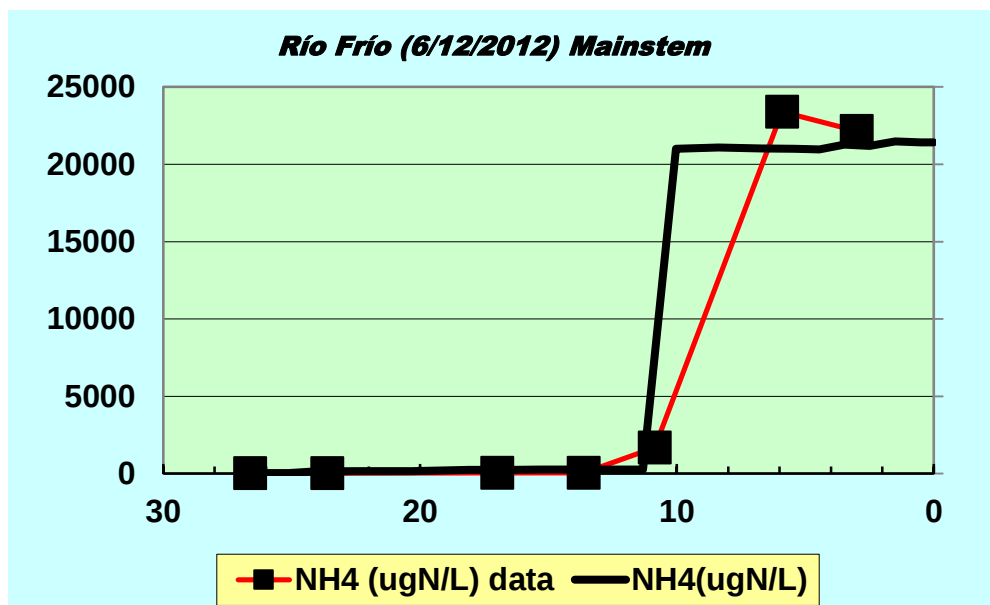


El comportamiento del nitrógeno en todas sus especies es de vital importancia para observar de que manera se presenta la relación de nitrógeno orgánico y el amoníaco y de que manera se genera nitritos o nitratos en el segmento hidráulico.

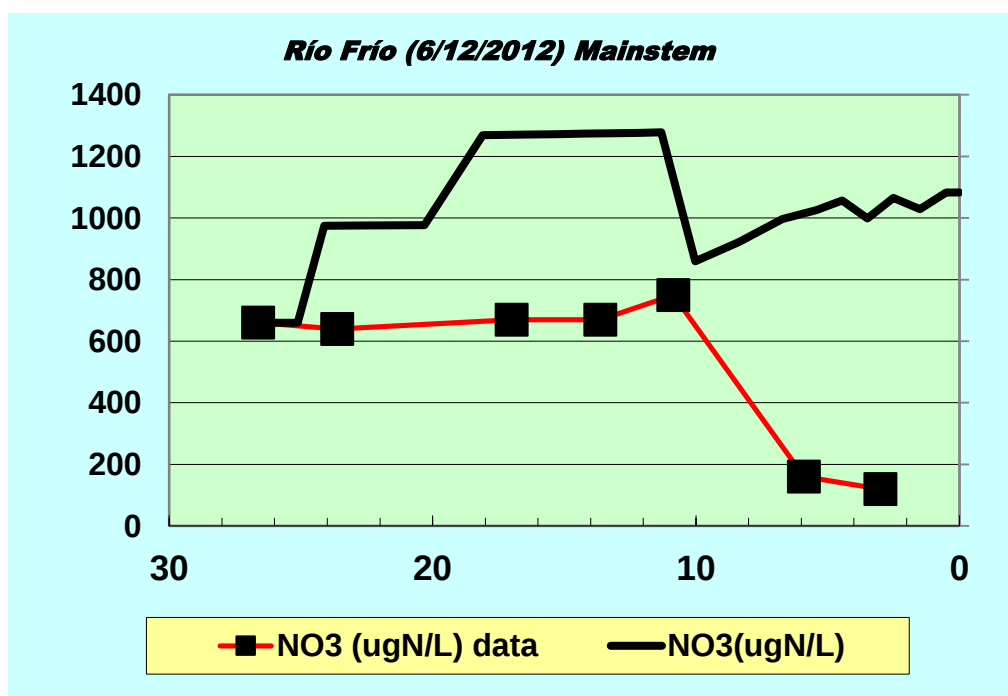
Gráfica N° 25 Modelado del Nitrógeno Orgánico



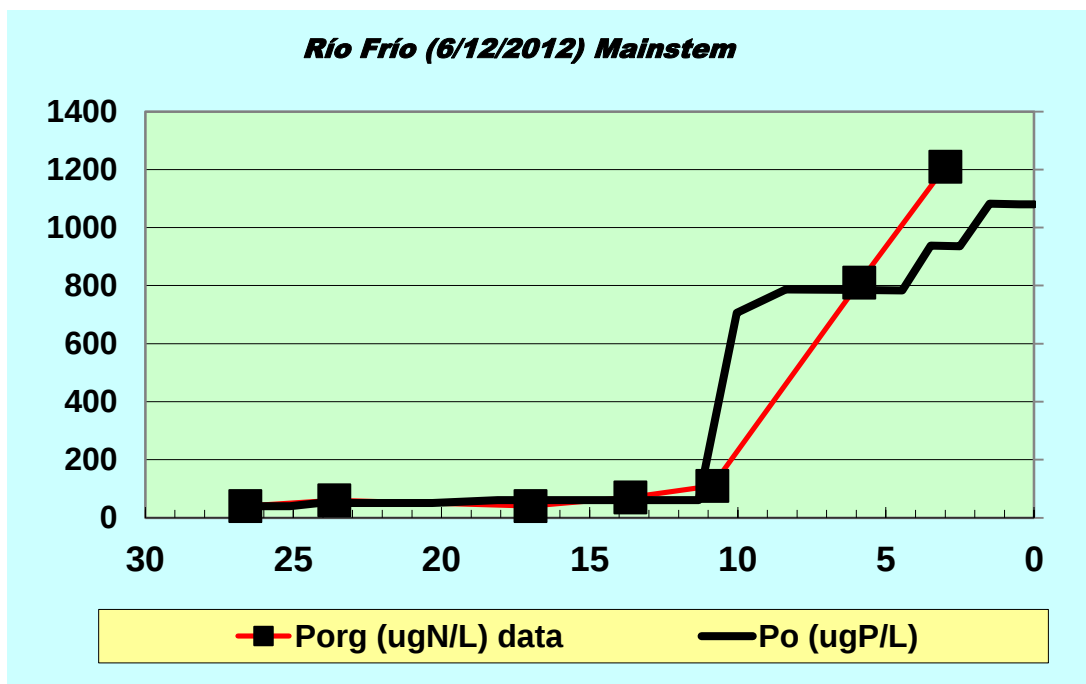
Gráfica N° 26 Modelado del Nitrógeno Amoniacal



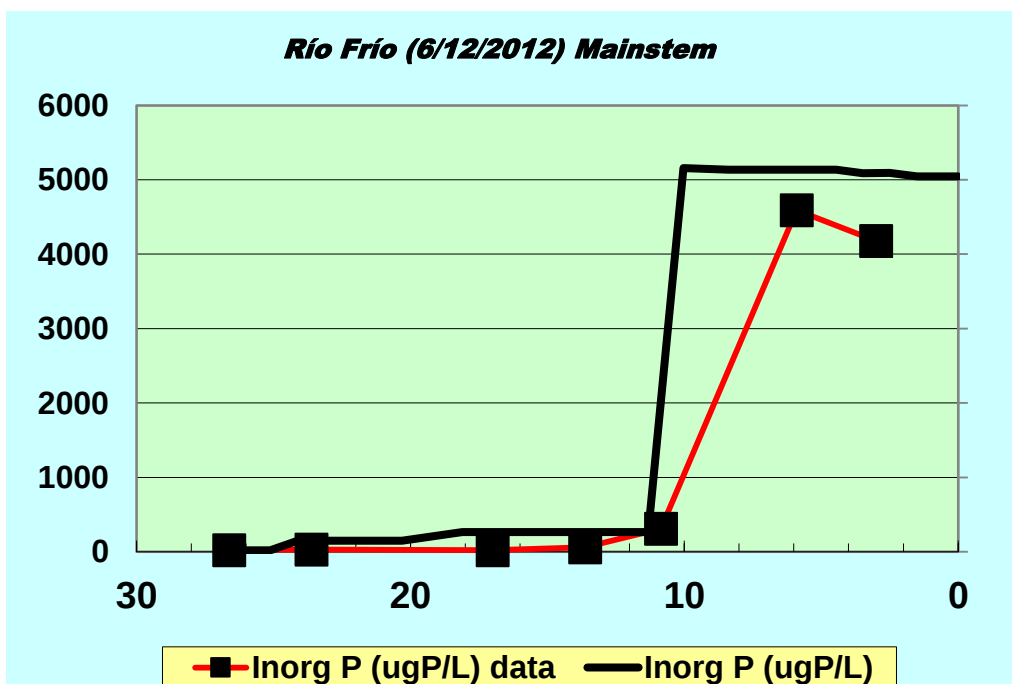
Gráfica N° 27 Modelado de la acumulación de nitratos



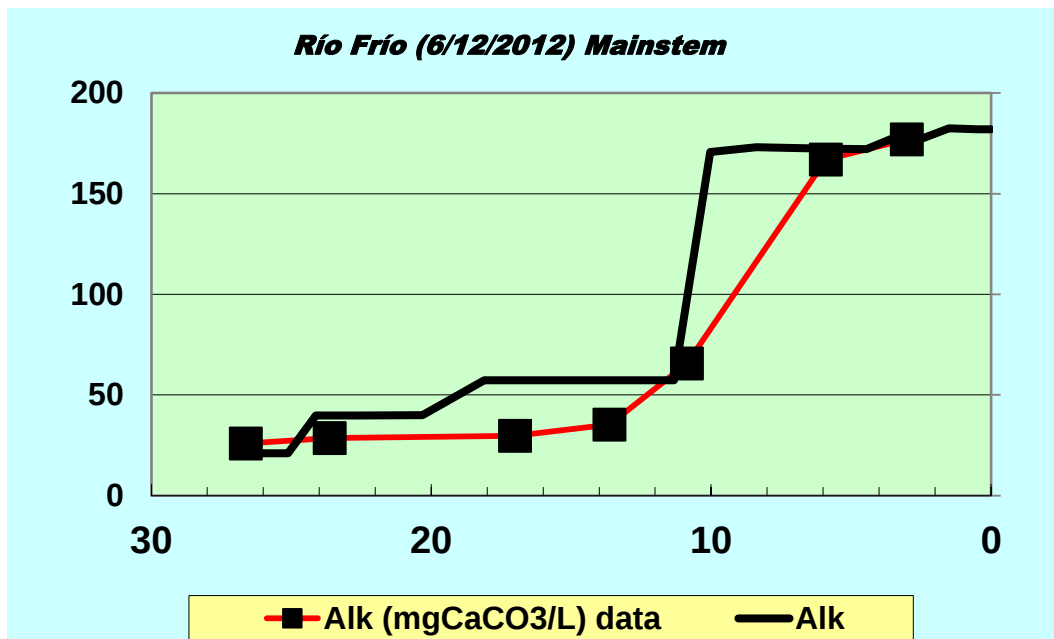
Gráfica N° 28 Modelado del Fósforo Orgánico



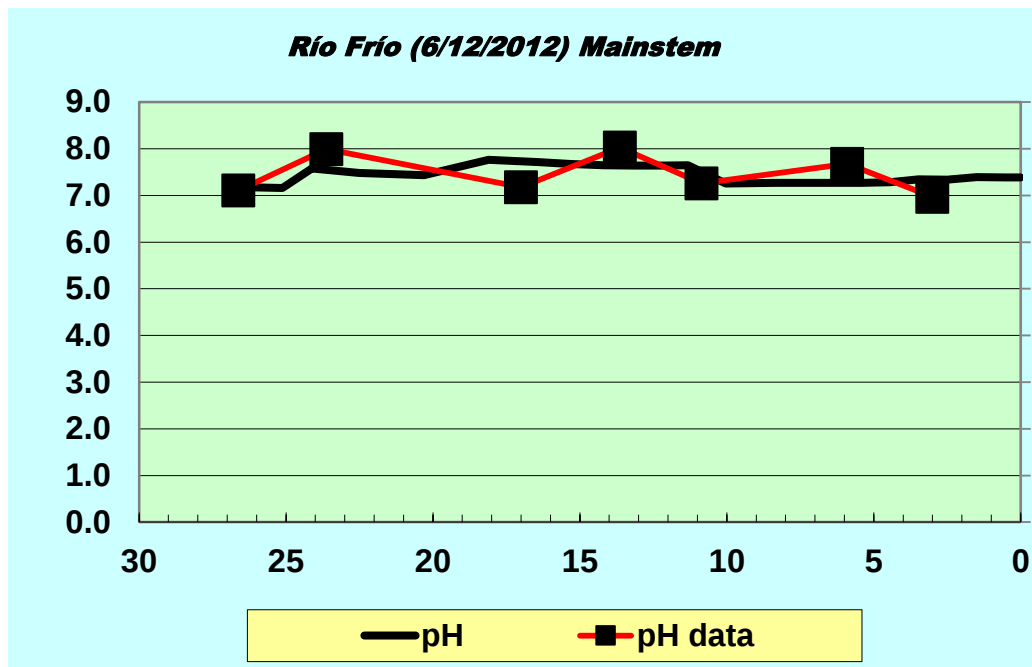
Gráfica N° 29 Modelado del Fósforo Inorgánico



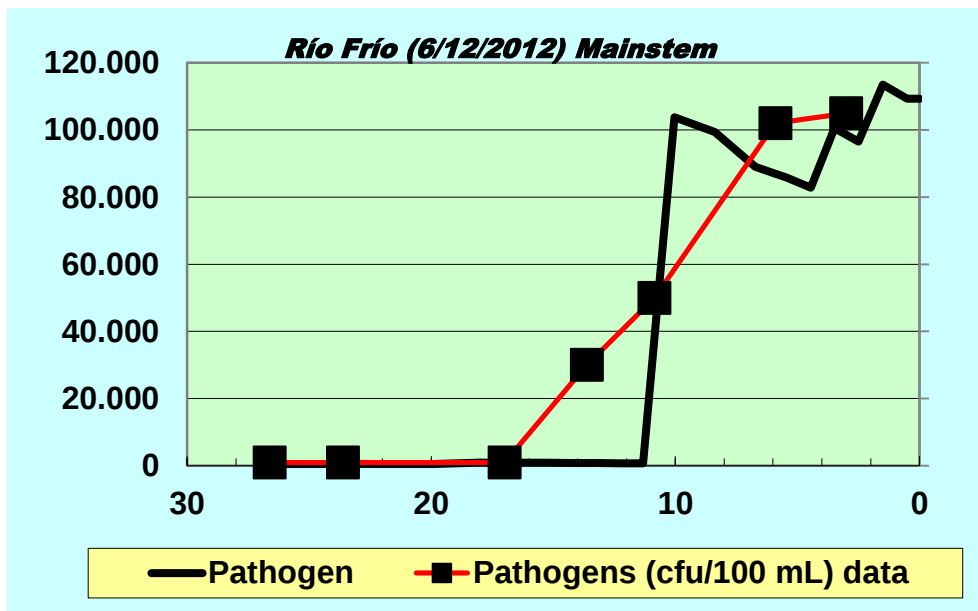
Gráfica N° 30 Modelado de la Alcalinidad



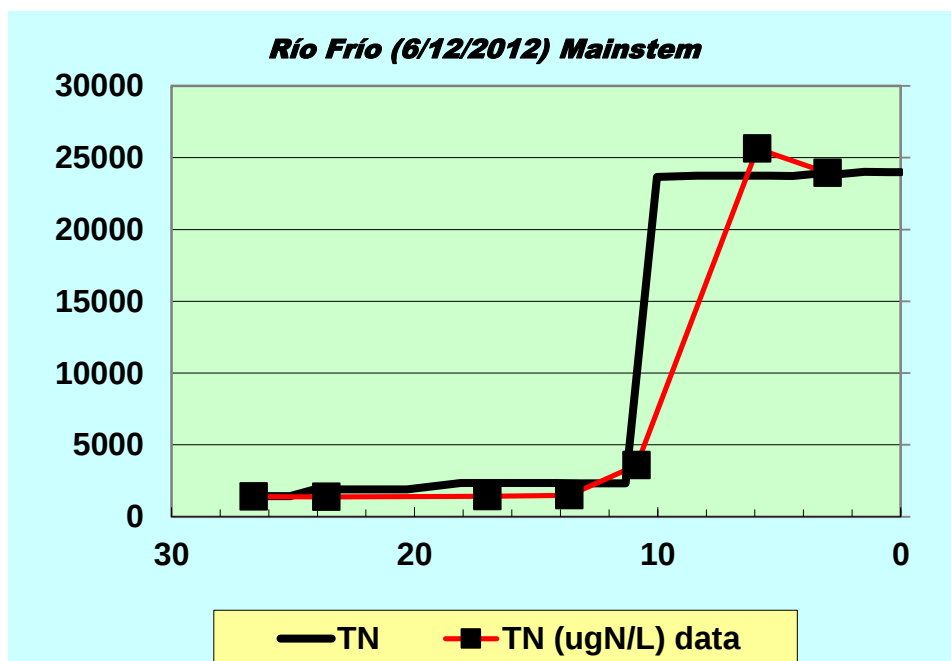
Gráfica N° 31 Modelado del Potencial de Hidrógeno, pH



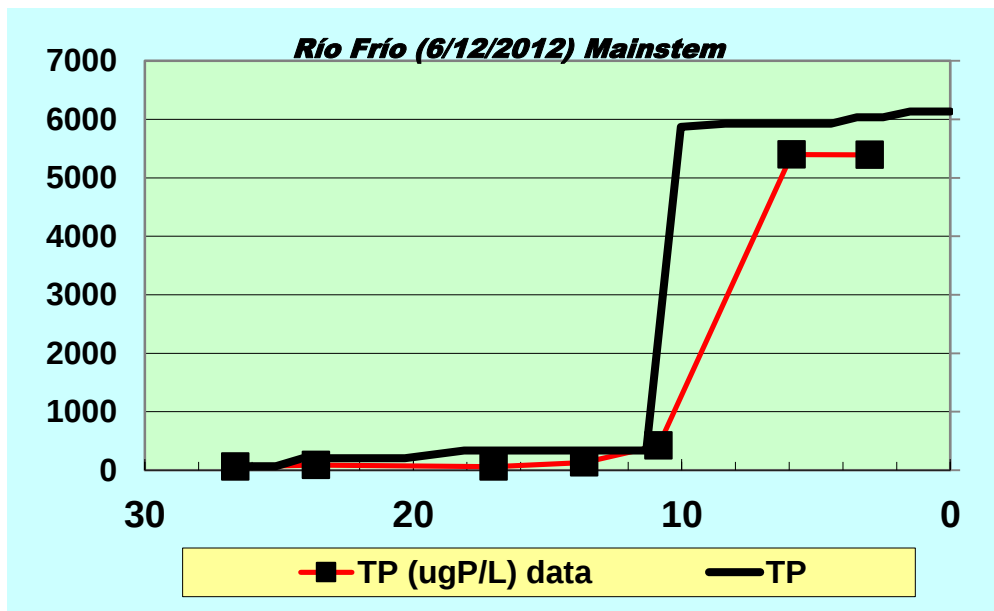
Gráfica N° 32 Modelado del comportamiento de los Patógenos (E- Coli), usando Unidad Formadora de Colonia por cada 100 mL de muestra



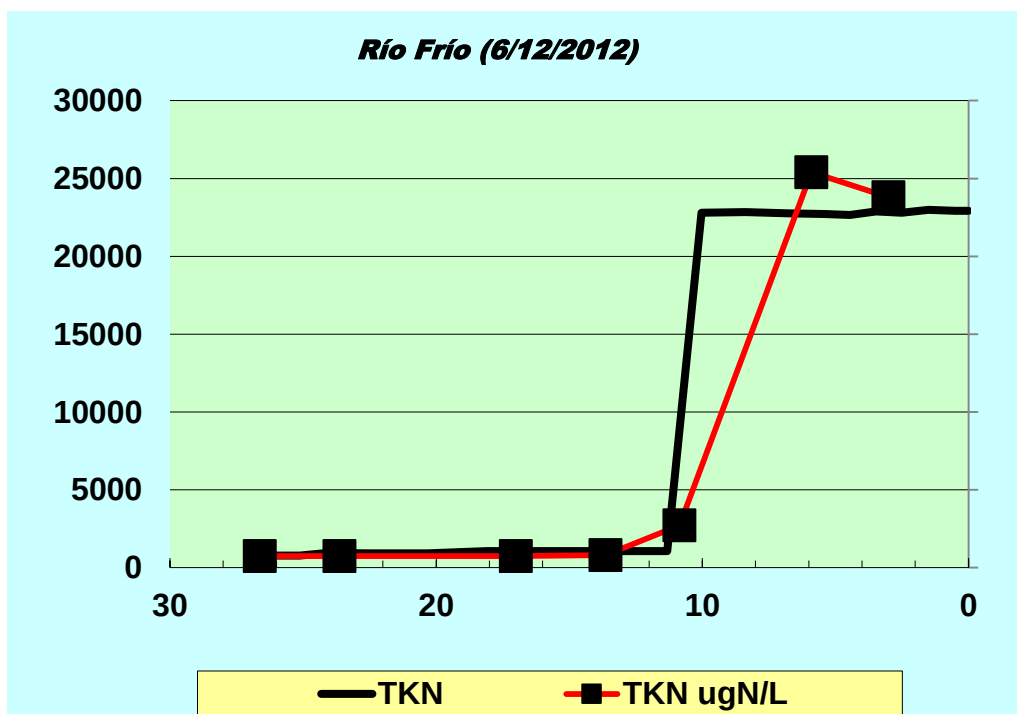
Gráfica N° 33 Modelado del Nitrógeno Total (NTK + N orgánico)



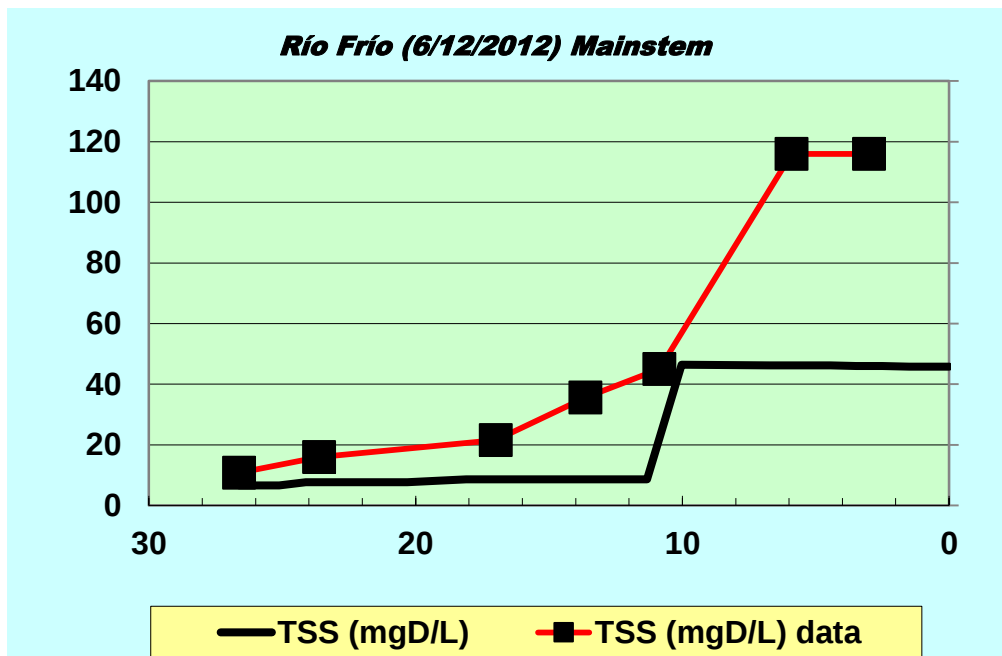
Gráfica N° 34 Modelado del Fósforo Total (P orgánico + P inorgánico)



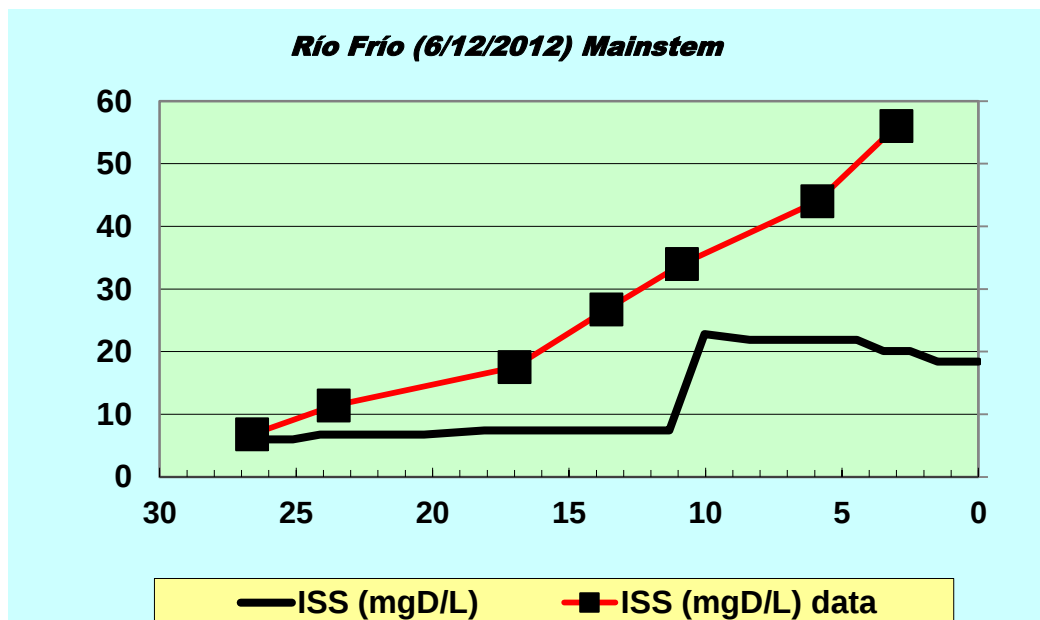
Gráfica N° 35 Modelado del Nitrógeno Total Kjeldahl (N amoniacal + Nitratos + Nitritos)



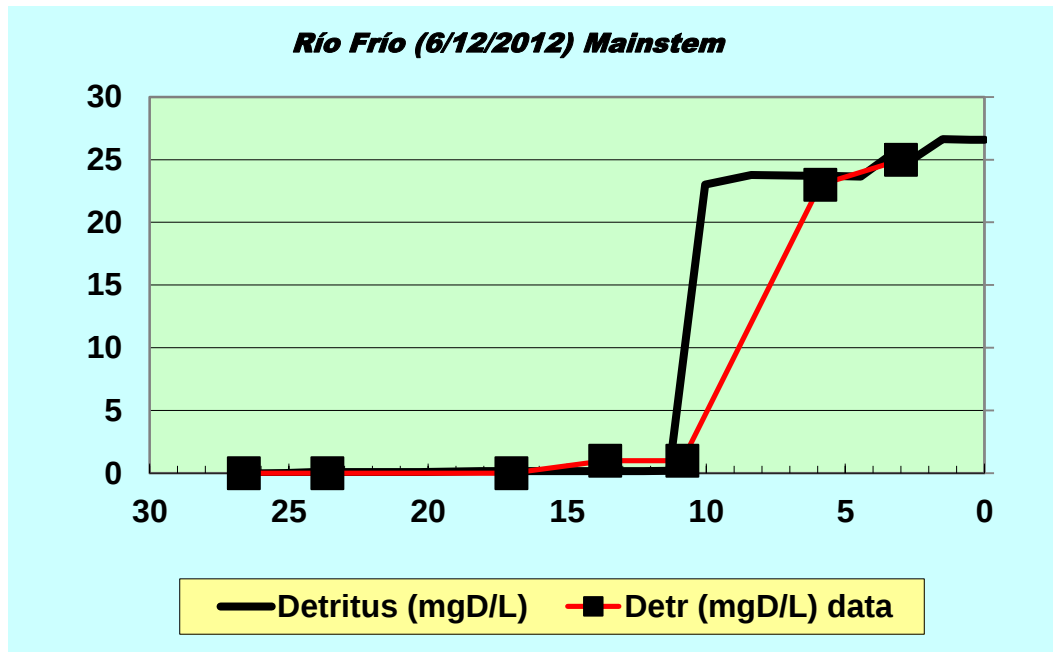
Gráfica N° 36 Modelado de los Sólidos Suspendidos Totales



Gráfica N° 37 Modelado de los Sólidos Suspendidos inorgánicos (SST- SS orgánicos)



Gráfica N° 38 Modelado de los o Detritos (Materia orgánica particulada o muerta MOP)



	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 47 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

6. CONCLUSIONES

La modelación de autopurificación del río Frío se realiza en la totalidad del río Frío, comprendiendo una longitud de 26.6 Km, un tiempo de viaje de 11.7 horas o 0.48 días, tomando como cabecera la estación “Truchera” hasta la estación final de evaluación “Caneyes”, donde confluye con el río de Oro. Se toma un paso de 0.002 horas, bajo una integración tipo Euler y un fotoperiodo de 12.53 horas, el mes de mayo de 2012.

El sistema hidrogeométrico del río Frío se define con una velocidad media de 0.7 m.s^{-1} , un área de sección transversal media de 9.19 m^2 y un coeficiente de dispersión que oscila entre 6 y $16 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, para la zona alta y media y zona baja respectivamente. La rugosidad manning oscila entre 0.07 y 0.32, es decir alta, tipo montaña, esto debido a la alta presencia de rocas.

La tasa de reaeración, se valida con Owens y oscila entre 3 y 9 d^{-1} , presentando la elevación en los tramos esperanza, botánico y pórtico. Se aclara que de acuerdo a las pruebas de oxígeno en el río la tasa de reaeración se presenta muy cercana ya que oscila entre 0.28 y 2.18 d^{-1} .

La temperatura del agua oscila entre 15 y $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en un piso térmico de páramo bajo (2091 msnm) y zona cálida (715 msnm) con un delta 1736 msnm de caída.

El comportamiento de la conductividad del agua oscila entre los 100 y $650 \mu\text{S.Cm}^{-1}$, esto permite observar una alta contaminación del pórtico hacia abajo.

El comportamiento del oxígeno disuelto cae de 8 a 6 mg.L^{-1} en el pórtico y posteriormente sigue en descenso a 1 mg.L^{-1} en caneyes, en la confluencia con el río de Oro. La saturación máxima es de 7.8 y la mínima es de 7.3, mientras el oxígeno decae a 1 mg.L^{-1} , esto se explica debido al consumo de oxígeno por la presencia de una alta carga orgánica que inicia en 3.4 Ton d^{-1} en la estación del pórtico y aumenta sustancialmente a 20.7 Ton d^{-1} en las estaciones de callejuelas y caneyes. Esto conlleva a una autopurificación muy baja en la zona baja es decir que la tasa de desoxigenación (0.58 d^{-1} y una tasa de reaeración de 2.18 d^{-1}), es de aclarar que las tasas de reaeración oscilan entre 1 y 100 d^{-1} .

Con respecto al comportamiento del carbono orgánico, validado en la demanda bioquímica de oxígeno Carbonácea, DBOC, se observa en el de reacción rápida (diluido) existe un aumento de 20 a 140 mg.L^{-1} , esto debido a la incorporación de 3 vertidos domésticos (By-pass, PTAR y angelina) los cuales presentan una carga de 34.7 Ton.d^{-1} , discriminada como (By-Pass= 11 Ton.d^{-1} , PTAR = 21.6 Ton.d^{-1} y Angelina = 2.1 Ton.d^{-1}). La DBOC de reacción lenta oscila entre 0 y 25 mg.L^{-1} . Esto nos indica que un 90% de la DBOC es de reacción rápida y que muy poca cantidad es recalcitrante, por lo tanto el impacto es aun mayor en el río, por que desoxigena muy rápido el agua. Con respecto a la DBOC última presenta un pico de 180 mg.L^{-1} , de acuerdo a una tasa de desoxigenación que oscila entre 0.01 a 0.58 d^{-1} . La demanda bentónica oscila entre 2 y 16 mg.L^{-1} , es relativamente baja para la carga orgánica que entra al río, esto explica la baja sedimentación de la DBOC.

El nitrógeno afecta mucho sobre todo en el tramo pórtico hacia abajo, debido al impacto de los vertidos domésticos. Con respecto al orgánico aumenta de 500 a $2000 \mu\text{g.L}^{-1}$, el amoniacal oscila entre 0 y $2000 \mu\text{g.L}^{-1}$ y la producción de nitratos oscila entre 600 y 1200 para la zona alta y media, sin embargo la zona baja decae a 800 y se mantiene en $1000 \mu\text{g.L}^{-1}$ en promedio. Esto se explica por el consumo de oxígeno que se genera en la zona media y baja, haciendo que la oxidación del amonio no se lleve a cabo totalmente.

El fósforo no se tiene en cuenta para la evaluación de la autopurificación, aunque existe la presencia de fósforo inorgánico debido a los detergentes, esto hace que se aumente la concentración en el tramo del pórtico hacia abajo en un rango de 1 a $5000 \mu\text{g.L}^{-1}$, mientras el orgánico de 1 a $1200 \mu\text{g.L}^{-1}$, siendo representativa estas concentraciones en la calidad del

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 48 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

agua, para la generación de fenómenos de eutrofización

La alcalinidad oscila entre 26.6 y 170 mg.CaCO₃ L⁻¹, el pH no sufre alteraciones (7 a 8), valores que están dentro del rango permisible por el Decreto 1594 de 1984 y el 3930 de 2010.

El comportamiento de los patógenos oscila es heterogéneo inicia con 100 UFC.100mL⁻¹ en la cabecera y se mantiene hasta el tramo botánico (30.000 UFC.100mL⁻¹), y finalmente aguas debajo de los vertidos domésticos se incrementa a (100.000 UFC.100mL⁻¹). El aumento vertiginoso explica la baja tasa de decaimiento de los patógenos, debido a la presencia de oxígeno y altas concentraciones en cada vertido.

Los sólidos suspendidos total oscilan entre 10.8 y 106 100 mg.L⁻¹, esto debido a la presencia de arena por arrastre desde las zonas hiporréicas en la zona media y baja. Los sólidos orgánicos son aproximadamente el 50% de los totales, estos son los suspendidos volátiles o bacterias vivas presentes en el río.

El río Frío puede autopurificarse reduciendo la DBOC de mezcla en el río de 60 a 3 mg.L⁻¹ y la DBOC en los de vertidos crudos de 500 a 100 y los tratados de 200 a 50 mg.L⁻¹. DE lo contrario el río seguirá acumulando materia orgánica en el bento y la columna de agua, lo cual genera una mayor demanda de oxígeno.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 49 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

7. RECOMENDACIONES

Se debe continuar con el monitoreo del río en las 7 estaciones definidas, con el fin de obtener la mayor información de campo y establecer un sistema de información de calidad y de cantidad en el río.

Se debe hacer una interface sistémica para conectar el SIG con el modelo QUAL2K y de esta manera generar una modelación en tiempo real de la capacidad de autoupurificación en todos los meses del año para una fuente hídrica.

Avanzar en la modelación de las demás cuencas de la jurisdicción de la CDMB.

Propiciar y financiar más proyectos de investigación hidrológica y tratamiento de aguas residuales con el fin de mitigar el impacto de estos vertidos a las fuentes hídricas.

	INFORME FINAL DEL ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE AUTOPURIFICACIÓN DE LA MICROCUEENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO - CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7483-08	Pág. 50 De 50
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

8. BIBLIOGRAFÍA

CDMB. (2008). *POMCA RÍO DE ORO*. Bucaramanga.

Chapra, S. (1997). *Surface Water Quality Modelling*. New York: Mc Graw Hill.

Churchill, M. A., Elmore, H. L y Buckingham, R.A. (1962). Prediction of Streams Reaeration Rates. *J. San. Engr. Div. ASCE SA4:1*, 3199.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2005). *Estudios Postcensales 7, Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020*. Bogotá.

Gaudy, A. y. (1980). *Microbiology for Enviromental Scientists and Engineers*. New York: Mc Graw Hill.

Hydroscience, Inc . (1971). *Simplified Matematical Modeling of Water Quality* . Washington D.C: Mitre Corporation and USEPA, Water Programs .

Jairo, R. (2000). *Trtamiento de Aguas Residuales*. Bogotá: Escuela Coombiana de Ingeniería.

Metcalf & Eddi. (1991). *Tratament Waswate polution*.

O'Connor, D. J. (1958). Mechanism of Reaeration in Natural Streams. *Trans. Am. Soc. Civil Engin.* 123, 641-666.

Owens,.M., Edwards, R., y Gibbs. (1964). Some Rearation Studies in Streams . *Int. J. Air Water Poll.* 8 , 469-486.

RIVERA, J. (Lunes de Octubre de 2011). Evaluación de la materia orgánica en el río frío soportada en el qual2k versión 2.07. *Revista DYNA*, 78(169), 131-139.

Texas Water Development Board. (1970). *Simulation of Water Quality in Stream and Canals, Program Documentation and User's Manual* . Austin, TX.

Tsivoglou, E. C. y Wallace, S. R. (1972). *Characterizaction of Stream Reaeration Capacity*. USEPA, Report No. EPA - R3-72-012.