

ESTIMACIÓN DE LA TASA DE DESOXIGENACIÓN (K1) Y TASA DE NITRIFICACIÓN (K_{1M})
PARA LA DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL 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:

*INF 4. ESTIMACIÓN DE LAS TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA
ORGÁNICA EN LA MICROCUENCA RÍO FRÍO (SAN IGNACIO – CANEYES)*

Lugar y fecha de emisión:

Bucaramanga, 10-12- 2012.



	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 2 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1


TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN _____	6
INTRODUCCIÓN _____	8
1. ESTUDIO DE LA TASA DE DESOXIGENACIÓN DEL RÍO FRÍO _____	9
1.1 INFORMACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO _____	9
2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CINÉTICA DE OXIDACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA _____	11
2.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR _____	11
2.2 MONITOREO Y TOMA DE MUESTRA _____	12
2.3 TRABAJO EN EL LABORATORIO _____	19
2.3.1 Preparación de los reactivos a utilizar en campo _____	20
2.3.2 Incubación a 20°C _____	20
2.3.4 Cálculo de la DBO _____	22
2.4 CÁLCULO DE LA TASA DE DESOXIGENACIÓN (Kd) _____	25
2.4.1 Cálculo de la Tas de desoxigenación en botella _____	25
2.4.2 Cálculo de la Tasa de desoxigenación por correlación logarítmica de la DBOC en el río 26	26
2.4.3 Cálculo de la Tas de desoxigenación por Ecuación Hydroscience _____	28
2.5 CÁLCULO DE LA TASA DE NITRIFICACIÓN _____	31

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 3 De 36
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. Inyección del Trazador de (NaCl) al río Frío Cuadrilla 1 _____	12
Figura N° 3. Inyección del Trazador de (NaCl) al río Frío Cuadrilla 2 _____	12
Figura N° 5. Discretización de los Tramos y las Fuentes Puntuales afluentes y efluentes en el río Frío _____	14
Figura N° 6. Acompañamiento de guías e inspectores de la CDMB en la Inspección y toma de in Situ _____	15
Figura N° 7. Personal Guardabosques y cuadrilla de monitoreo _____	16
Figura N° 8. Inspección y toma de in Situ _____	16
Figura N° 9. Medición de profundidad y velocidad con el Correntómetro Global Water Cuadrilla 1 _____	17
Figura N° 10. Materiales para monitoreo y tomad e muestras _____	18
Figura N° 11. Fijación de oxígeno en campo _____	19
Figura N° 12 Toma de datos en el monitoreo _____	19
Figura N° 13 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad del río para un 50% DBO sedimentable, representada para un rango de velocidad de sedimentación (v_s) _____	29
Figura N°14 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad _____	29
Figura N° 15 Tendencia del carbono, nitrógeno y oxígeno aguas abajo de un vertido AR _____	34

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 4 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1


LISTA DE TABLAS

Tabla N°1. Algunas Características meteorológicas e hidrológicas Río Frío _____	10
Tabla N° 2. Ubicación en el canal hidráulico de las estaciones de Inspección y monitoreo del río Frío _____	14
Tabla N° 3. Cotas y longitud entre las estaciones en la microcuenca Río Frío _____	14
Tabla N° 4. Georeferenciación de las estaciones en la microcuenca Río Frío _____	15
Tabla N° 5. Materiales para la inspección y monitoreo _____	18
Tabla N° 6. Tiempo de viaje del río Frío _____	19
Tabla N° 7. Factores de Dilución en muestras enteras _____	21
Tabla N° 8. Comportamiento del OD durante la incubación. _____	21
Tabla N° 9. Comportamiento de la DBO durante la incubación de 20 días _____	24
Tabla N° 10. Resultados de la Tasa de Desoxigenación en Botella winkler _____	26
Tabla N° 11. Valores típicos de tasas de descomposición de la DBO en diferentes niveles de tratamiento _____	28
Tabla N° 12. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia _____	28
Tabla N° 13. Resultados de las Tasas de Desoxigenación por comparación Logarítmica y por Ecuación Hydroscience (Kd) _____	31
Tabla N° 14. Concentraciones de Nitrógeno Orgánico, Amoniacal, Nitritos y Nitratos en el río Frío _____	32
Tabla N° 15. Resultados de las Tasas de Amonificación (Koa) y Conversión de amonio a nitrito y nitrato (Kai, Kin) _____	36

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 5 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica N° 1 Comportamiento del OD durante los 20 días de incubación_____	21
Gráfica N° 2 Comportamiento de la DBO en 20 días de incubación (Muestras Enteras) _____	24
Gráfica N° 3 Comportamiento de las especies de Nitrógeno desde San Ignacio a Caneyes _____	33
Gráfica N° 4 Comportamiento de las especies de Nitrógeno entre el Pórtico - Caneyes _____	33

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 6 De 36
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.

Se evaluó el comportamiento hidrodinámico y la capacidad de dilución del río, tipificado como río de montaña, teniendo en cuenta el comportamiento del oxígeno disuelto y la materia orgánica como causa de procesos de desoxigenación, reaeración y nitrificación en el río. Los constituyentes que participan en la cinética son la desoxigenación, son el carbono orgánico, el oxígeno y la hidrogeometría del río, esto conlleva a definir la carga orgánica y las condiciones de velocidad, área, pendiente y dispersión longitudinal en el río. 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 pérdida 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 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 y la tasa de mortalidad, a su vez depende de 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 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.

La cinética de oxidación del río frío es una investigación que logra definir pautas para la

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 7 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

modelación de la calidad del agua en ríos de montaña y que es fundamental para adelantar gestiones en otras fuentes hídricas de la región, con el fin de establecer el comportamiento de la carga orgánica generada por los vertidos domésticos en el canal hidráulico. La importancia de evaluar el OD en el recurso Hídrico es fundamental para vigilar la calidad del agua, ya que el río posee la capacidad de auto purificarse, simplemente ésta opción es muy difícil que se presente sino se tiene una custodia del grado de contaminación y la cantidad de flujo vertido al río. La opción más viable es estudiar la capacidad de autopurificación que puede tener el cuerpo hídrico y de esta manera definir cuanta carga orgánica y demás puede ser incorporada para su dilución o depuración natural sin que afecte aguas abajo ni las vertientes superiores.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 8 De 36
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: autopurificación, 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.

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 autopurificación de río Frío" en el cual se estudia la cinética de desoxigenación y nitrificación descritos en este informe de investigación en el cual se evalúa las tasas de desoxigenación y nitrificación mediante la aplicación de pruebas de laboratorio y monitoreos en campo, ubicando (7) estaciones desde la 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 DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 9 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

1. ESTUDIO DE LA TASA DE DESOXIGENACIÓN DEL RÍO FRÍO

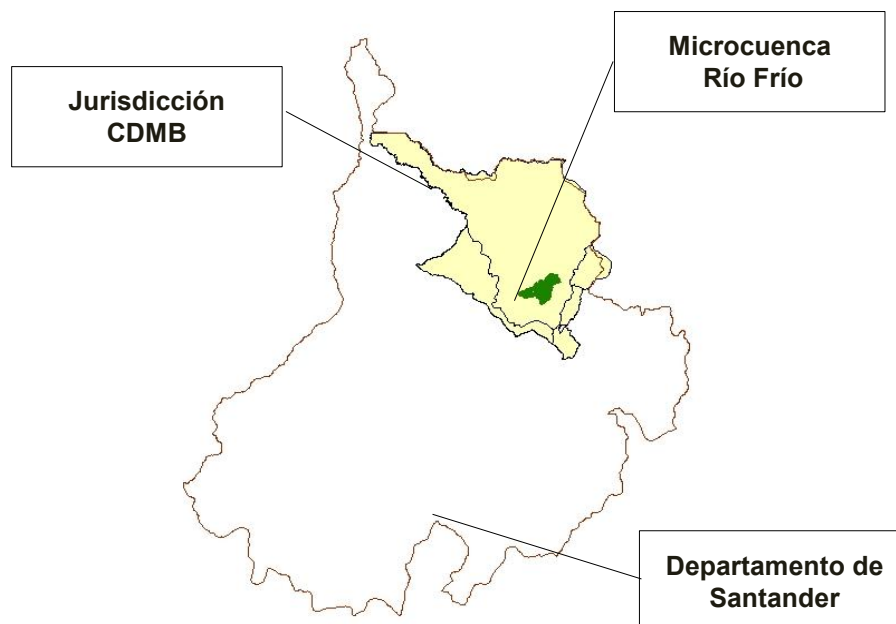
1.1 INFORMACIÓN DE LA MICROCUENCA RÍO FRÍO

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 pórtico 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



	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 10 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N°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

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 11 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CINÉTICA DE OXIDACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

La estimación de la tasa de desoxigenación requiere realizar un proceso que se describe a continuación.

2.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR

De acuerdo al informe de inspección (ver Informe de Inspección) se describe la forma como se accede a las estaciones establecidas (ver tabla 2). Con respecto a la información cartográfica se tiene acceso al SIG de la CDMB en la cual se desarrolla un mapa incorporándole las nuevas estaciones (San Ignacio y Judá), establecidas en el estudio. La información meteorológica se obtiene de las estaciones definidas por la CDMB, ya que las del IDEAM, no se encuentran cercanas a la zona alta.

Desde el 2009 a junio de 2012 se realizaron inspecciones previas de verificación y geoposicionamiento de las (8) estaciones (cabecera y tramos) en el canal hidráulico. La ubicación de geoespacial se logra con la utilización de GPS submétricos con error de 5 m con Datum Bogotá establecidos por la CDMB. Se definieron las rutas de acceso y salida de las diferentes estaciones ubicadas en el río Frío al igual que las diferentes fuentes puntuales, con el fin de establecer un itinerario de monitoreo en tiempo real de viaje del río.

Se realizó un estudio de trazador conservativo de cloruro de sodio (NaCl) para determinar el coeficiente de dispersión longitudinal del río Frío. EL proceso se describe en el (Informe de Estudio del Coeficiente de dispersión longitudinal). El comportamiento de la dispersión promedio es de $9.19 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ con una máxima de $16.45 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Callejuelas) y una mínima de $6.38 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (San Ignacio). El trazador se comportó estable aun con la contaminación orgánica ($\text{SDT} = 270 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Los equipos Multiparámetros utilizados de marca: Thermo – Orion 5 star Plus Scientific y HACH HQ30D, mostraron estabilidad al tomar la conductividad, temperatura de aire, agua, pH, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales con sondas de membrana y fluorescencia, respectivamente. El trazador se inyectó a una distancia de 100 metros, la cual fue tomada manual por la misma trayectoria con un decámetro, donde se logró validar el tiempo de viaje del trazador.

Para el desarrollo de esta fase de la inspección se preparó un trazador conservativo de cloruro de sodio (NaCl) tipo analítico, con el fin de aportar al río una concentración que se moviera con las condiciones hidráulicas del cuerpo lótico. El proceso para la determinación del CDL, se define de acuerdo al estudio del tipo de trazador con una inyección instantánea y se valida en un segmento de aproximadamente 100 m.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 12 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Figura N° 2. Inyección del Trazador de (NaCl) al río Frío Cuadrilla 1




Figura N° 3. Inyección del Trazador de (NaCl) al río Frío Cuadrilla 2



2.2 MONITOREO Y TOMA DE MUESTRA

A la hora de tomar las muestras representativas, las personas encargadas de recolectar las muestras deberán estar bien capacitadas y tener claro el momento y la manipulación de la muestra. Las muestras se tomaron de acuerdo a la norma NTC 5667-3 (preservación y manejo de muestras), NTC 5667-6 (Guía para el muestreo de aguas de ríos y corrientes). El óptimo resultado depende absolutamente del personal encargado para tal labor ya que este debe desempeñar las condiciones ideales necesarias para garantizar una o varias tomas de muestras representativas. Los datos arrojados por el posterior análisis en los laboratorios ponen la absoluta confianza en los encargados de la toma de muestra ya que son los dos entes responsables de los datos finales a los que está expuesta el agua. Las muestras deberán tener una etiqueta marcada con el lugar, fecha, la hora, la naturaleza del agua y otra información pertinente, y se enviarán sin demora al laboratorio para su análisis.

En mayo de 2012 se hizo el monitoreo en tiempo real en el río Frío con (3) cuadrillas ubicadas

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 13 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

estratégicamente para recolectar la muestra de cuerdo al tiempo de recorrido del río. Los recipientes que se usaron para las muestras fueron en plástico con capacidad entre 0.5 y 1 L y los Coliformes en envases especiales preservados. Las muestras para DQO y Nitrógenos se preservaron con ácido sulfúrico a $\text{pH} < 2$, todas refrigeradas a 4°C en cavas de polietileno reforzado. Para recolectar la muestra representativa se recolecto el agua en 3 partes diferentes en el río. La primera a una de (1/4) la segunda a la mitad y la tercera a (3/4) del mismo río en línea transversal donde se utilizo un recipiente para tomar la muestra y el otro para recolectarla. Luego se procedió al siguientes paso, que era el trasporte del baldé recolector de la muestra representativa fuera del río, donde toco tener presente el cuidado de no contaminarla por los diferentes factores a los que estaba expuesta la muestra. En la *zona alta* el recurso Hídrico satisface las actividades agropecuarias, con zonas ripiarias de poca contaminación, con cotas superiores a los 2600 msnm de clima frío con temperatura media de 16°C , $\text{DBO} < 1.3 \text{ ppm}$ y $\text{NTK} < 0.74 \text{ ppm}$. En la *zona media* la planta Plata de Tratamiento de Agua Potable de Floridablanca (PTAP- Floridablanca), extrae un 60 % del caudal total del río Frío con el fin de potabilizarlo y brindar agua segura para el consumo de los ciudadanos del área metropolitana, Floridablanca. En la *zona baja* la población más afectada es Girón, ubicados a 697 msnm, donde no existe una suficiente pendiente (2.5%) con condiciones de flujo laminar y una temperatura de 31°C , $\text{DBO} = 58 \text{ ppm}$ y $\text{NTK} = 28.4 \text{ ppm}$.

Figura N° 4. Ubicación de Tramos en la Microcuenca río Frío

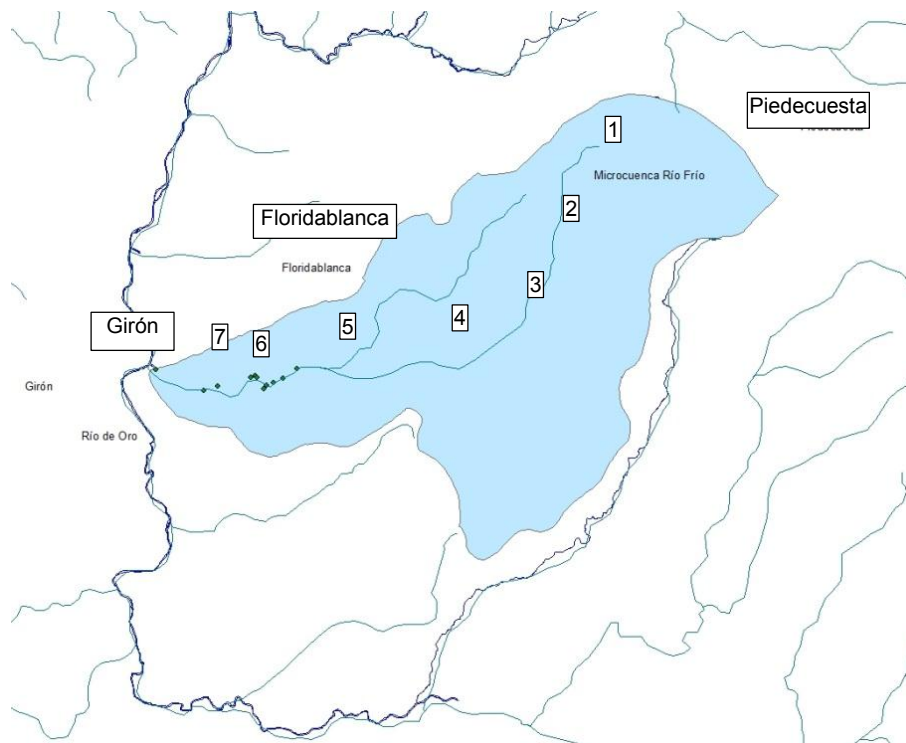


Tabla N° 2. Ubicación en el canal hidráulico de las estaciones de Inspección y monitoreo del río Frío

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° 5. Discretización de los Tramos y las Fuentes Puntuales afluentes y efluentes en el río Frío

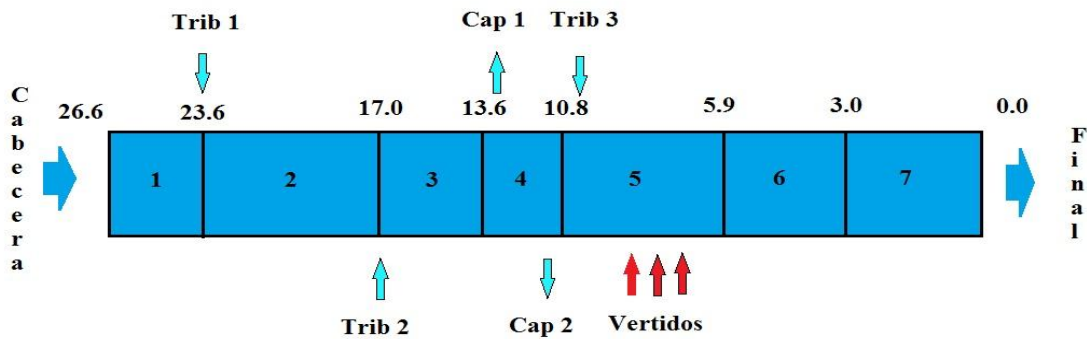



Tabla N° 3. Cotas y longitud entre las estaciones en la microcuenca Río Frío

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

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 15 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

la microcuenca.

Tabla N° 4. Georeferenciación de las estaciones en la microcuenca Río Frío

TR	ESTACIÓN	COORDENADAS		X Km	UBICACIÓN		s
		LAT (N)	LONG (E)		UP	DOWN	
CAB	TRUCHERA	1280857	1116598				
1	SAN IGNACIO	1280580	1114780	3,00	26,62	23,62	0,0857
2	JUDIA	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

Fuente: Autor

Se contrata la compañía de los señores: Jorge Pérez y Jeferson M guardabosques de la CDMB en la zona de la Mariana y el rasgón.

Figura N° 6. Acompañamiento de guías e inspectores de la CDMB en la Inspección y toma de in Situ




	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 16 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Figura N° 7. Personal Guardabosques y cuadrilla de monitoreo



Figura N° 8. Inspección y toma de in Situ



El aforo del caudal se tomo en cuenta el día del monitoreo, se capacitó el personal para el diligenciamiento de los formatos de campo se realizó por medio de la comunicación entre el que manipulaba el Correntómetro digital (Global Water) en el río, el cual medía la profundidad y la velocidad e la sección transversal ubicada en la estación georeferenciada. El correntómetro está conformado por una vara que esta aforada o tiene una reglilla donde esta un medida en ingles o métrica, en la parte de abajo hay un circulo y dentro del hay una hélice que esta gira con la velocidad del río, la velocidad del río se registra por medio de un sensor de pulsos que transforma a velocidad en un display ubicado en la parte superior de éste. Los materiales se verificaron mediante una lista de chequeo de elementos necesarios por cada comisión.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 17 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Figura N° 9. Medición de profundidad y velocidad con el Correntómetro Global Water Cuadrilla 1



Se les hizo entrega de materiales tales como: guantes n-dex, cava, hielo, lapiceros, decámetro, tabla de apuntes, Fichas de anotación, cinta transparente, cinta de enmascarar, estacas de madera y baterías tipo AA.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 18 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 5. Materiales para la inspección y monitoreo

Materiales	Und	Cantidad
Guantes n-Dex, Cava	Par	4
Hielo	Bolsa	2
Lapiceros	Und	3
Tabla de apuntes	Und	1
Fichas de anotación	Und	1
Cinta transparente	Rollo	1
Cinta de enmascarar	Rollo	1
Estacas de madera	Und	2
Baterías tipo AA.	Par	1
GPS	Und	1
Decámetro (50m)	Und	1
Frasco 1L plástico	Und	2
Frasco 500 mL plástico	Und	1
Frasco plástico para Coliformes	Und	1
Embudo	Und	1

Figura N° 10. Materiales para monitoreo y tomad e muestras




	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 19 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Figura N° 11. Fijación de oxígeno en campo



Figura N° 12 Toma de datos en el monitoreo




La hidrogeometría del río presenta un tiempo de viaje de 0.489 días, tomado desde la cabecera (Truchera) hasta la estación Caneyes en el Municipio de Girón.

Tabla N° 6. Tiempo de viaje del río Frío

TRAMO	Distancia	U	T_v	T_v (Acumulado)
	x(km)	m/s	(d)	(d)
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
Caneys	3	0,83	0,041	0,489

2.3 TRABAJO EN EL LABORATORIO

Las muestras se tomaron por duplicado para el análisis de DBO, transportando: una para el

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 20 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Laboratorio de la CDMB y la otra para el Laboratorio de las UTS, donde se acondicionaron para hacer incubación de monitoreo diario durante 20 días.

2.3.1 Preparación de los reactivos a utilizar en campo. Para realizar la DBO en el laboratorio, se tiene que preparar solución apropiada para dar alimento a una siembra. Solamente la inoculación se realizaría a las muestras de agua más contaminadas como son las muestras obtenidas en los puntos como son los siguientes (Pórtico, callejuelas, caneyes). Los reactivos son los siguientes.

Para el Agua de dilución se deben preparar los siguientes reactivos:

1. *Buffer de Fosfatos* (Fosfato de potasio monobásico, Cloruro de amonio, Hidrógeno fosfato di potásico, Hidrógeno fosfato di sódico heptahidratado).
2. *Solución sulfato de magnesio.*
3. *Solución cloruro de calcio.*
4. *Solución cloruro férrico.*

Para la fijación del OD se prepararon los siguientes reactivos:

1. Sulfato de Manganeso.
2. Yoduro álcali de azida
3. Acido sulfúrico entre otras.

2.3.2 Incubación a 20°C. Después de tener los reactivos listos se preparó el agua de dilución donde por cada litro de agua de dilución, se le adiciona 1 mL de cada uno de los (4) reactivos especificados anteriormente. El procedimiento se llevo a (2) días después de la toma de muestras, manteniéndose con preservación a 4°C. Se realizaron siembras con factores de dilución P(E), entre 1.2 y 100, con el fin de ocluir OD para incubación a 20°C.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 21 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 7. Factores de Dilución en muestras enteras

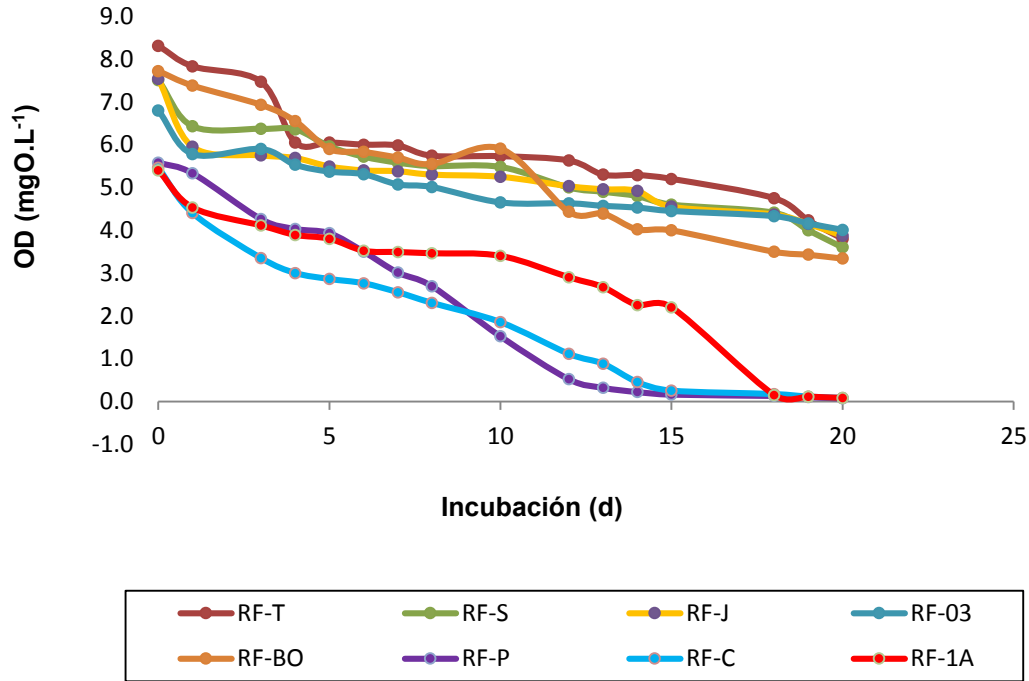
Estación	P (Entera)	Vol. Alícuota (mL)	P (Filtrada)	V Alícuota (mL)
BCO1	1	300	1	300
BCO1 (R)	1	300	1	300
BCO2	1	300	1	300
RF-T	1	300	1	300
RF-S	1	300	1	300
RF-J	1	300	1	300
RF-03	1	300	1	300
RF-BO	1	300	1	300
RF-P	5	60	3	100
RF-C	30	10	30	10
RF-1A	50	6	50	6
F- BYPAS	100	3	15	20
F- PTAR	100	3	15	20
F- AZ1A	5	60	1,2	261
F-ANGELINA	30	10	15	20

2.3.3 Toma de OD con electrodo. La validación del OD en las muestras se realizó con electrodo de membrana Thermo, por comodidad, con el fin de examinar el comportamiento del OD en la botella, durante 20 días, sin inhibición del nitrógeno. El comportamiento de los OD durante los 20 días se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla N° 8. Comportamiento del OD durante la incubación.

Estación	P* (E)	OD (mg O ₂ /L) Muestras Enteras															
		Días	0	1	3	4	5	6	7	8	10	12	13	14	15	18	19
BCO	1	8,3	7,8	7,5	6,1	6,1	6,0	6,0	5,7	5,7	5,6	5,3	5,3	5,2	4,8	4,2	3,8
RF-T	1	8,3	7,8	7,5	6,1	6,1	6,0	6,0	5,7	5,7	5,6	5,3	5,3	5,2	4,8	4,2	3,8
RF-S	1	7,5	6,4	6,4	6,4	6,0	5,7	5,6	5,5	5,5	5,0	4,9	4,8	4,6	4,4	4,0	3,6
RF-J	1	7,5	6,0	5,8	5,7	5,5	5,4	5,4	5,3	5,3	5,0	5,0	4,9	4,6	4,4	4,2	3,9
RF-03	1	6,8	5,8	5,9	5,5	5,4	5,3	5,1	5,0	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5	4,3	4,2	4,0
RF-BO	1	7,7	7,4	6,9	6,6	5,9	5,8	5,7	5,6	5,9	4,4	4,4	4,0	4,0	3,5	3,4	3,3
RF-P	5	5,6	5,3	4,3	4,0	3,9	3,5	3,0	2,7	1,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
RF-C	30	5,5	4,4	3,4	3,0	2,9	2,8	2,6	2,3	1,9	1,1	0,9	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1
RF-1A	50	5,4	4,5	4,1	3,9	3,8	3,5	3,5	3,5	3,4	2,9	2,7	2,3	2,2	0,2	0,1	0,1
F- BYPAS	100	5,0	3,5	2,5	2,2	1,5	1,3	1,3	1,2	1,1	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1
F- PTAR	100	5,5	4,0	3,8	3,7	3,6	3,1	3,3	3,1	3,0	3,0	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1	2,0
F- AZ1A	5	6,3	6,0	5,9	5,7	5,4	4,8	4,7	4,7	4,3	4,3	3,8	3,3	2,3	1,9	1,4	1,2
F-ANGELINA	30	5,5	3,7	2,2	2,1	1,8	1,3	1,2	1,1	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

Gráfica N° 1 Comportamiento del OD durante los 20 días de incubación



2.3.4 Cálculo de la DBO. La DBO es la diferencia de la concentración de los OD durante el período de incubación. Se puede determinar la DBO en cualquier tiempo (t), de tal manera que se pueda definir una tendencia en el tiempo debido al consumo de OD por la oxidación de la materia orgánica existente en la muestra de agua. En términos del modelo simple, la DBO se define con la variable L (mgOL^{-1}), esta es la cantidad de materia orgánica remanente oxidable en la botella, expresada como equivalentes de oxígeno. Un balance de masa por lotes para L puede ser escrito como:

$$V \frac{dL}{dt} = -k_1 VL \quad (1)$$

Si existe un valor inicial de DBO L_0 , la ecuación puede resolverse como:

$$L = L_0 e^{-k_1 t} \quad (2)$$


Nótese que durante el proceso de descomposición el oxígeno consumido puede ser definido como:

$$y = L_0 - L \quad (3)$$

Sustituyendo

$$y = L_0(1 - e^{-k_1 t}) \quad (4)$$

Donde:
 y = DBO (mgOL^{-1}),

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 23 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

$L_0 = \text{DBOCU (DBO carbonacea última (mgOL}^{-1})$

Se puede calcular la L_0 a partir del $C_{org} = \text{COT (Carbono orgánico Total)}$ con la siguiente ecuación.

$$L_0 = r_{0c} * C_{org} \quad (5)$$

Donde:

C_{org} = concentración de Carbono orgánico Total (mgC.L⁻¹)

r_{0c} = es la tasa de la masa de oxígeno consumida por masa de carbono asimilado (mgO.mgC⁻¹), se tiene una fracción de la siguiente manera:

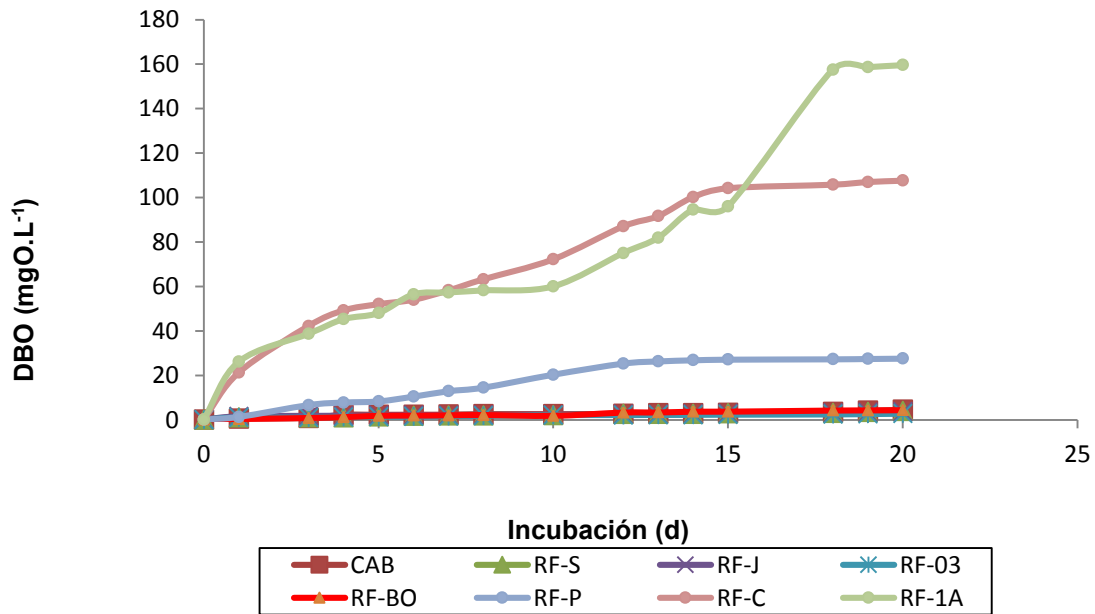
$$r_{0c} = \frac{6(32)}{6(12)} = 2.67 \text{ mgO mgC}^{-1} \quad (6)$$


El C_{org} , se puede validar con una prueba de laboratorio conocida como COT, con la cual se mide la cantidad total de carbono en un agua residual. Es otra forma de determinar la materia orgánica presente en el agua. Un ensayo de ejecución rápida es llevando la muestra a horno de alta temperatura en un medio químico oxidante, con el fin de oxidar el carbono orgánico en dióxido de carbono en presencia de un catalizador. El dióxido de carbono producido se mide mediante un analizador infrarrojo. Cuando existen compuestos orgánicos resistentes a la oxidación el valor de COT es menor que el valor real. Las aguas residuales crudas generalmente contienen COT DE 80 – 290 mg C.L⁻¹ y la relación DBO.COT⁻¹ varía entre 1.0 y 1.6. (METCALF & EDDY Inc., 1991).

Tabla N° 9. Comportamiento de la DBO durante la incubación de 20 días

Estación	DBO (mg O ₂ /L) Muestras Enteras															
	Días															
	0	1	3	4	5	6	7	8	10	12	13	14	15	18	19	20
BCO2	0,1	1,0	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
RF-T	0,1	0,5	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	5	
RF-S	0,1	1,1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	
RF-J	0,1	1,6	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	
RF-03	0,1	1,0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	
RF-BO	0,1	0,3	1	1	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	
RF-P	0,1	1,3	7	8	8	10	13	14	20	25	26	27	27	27	28	
RF-C	0,1	21	42	49	52	54	58	63	72	87	92	100	104	106	107	108
RF-1A	0,1	26	39	45	48	56	57	58	60	75	82	95	96	158	159	160
F- BYPAS	0,1	153	255	279	350	366	371	378	389	420	447	462	475	479	483	489
F- PTAR	0,1	46	51	55	59	71	67	73	75	76	82	88	92	97	101	106
F- AZ1A	0,1	0,8	1	2	3	4	5	5	6	6	7	9	12	13	15	15
F- ANGELINA	0,1	53	99	101	109	125	127	130	145	154	156	158	160	161	162	162

Gráfica N° 2 Comportamiento de la DBO en 20 días de incubación (Muestras Enteras)



	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 25 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

2.4 CÁLCULO DE LA TASA DE DESOXIGENACIÓN (Kd)

Para el efecto del cálculo de la tasa de desoxigenación se establecieron tres técnicas: la primera es utilizando la botella winkler con una incubación a 20°C y la segunda es estableciendo la ecuación de Hydrosience y tercero evaluando el comportamiento logarítmico de la concentración de oxígeno en el río.

2.4.1 Cálculo de la Tas de desoxigenación en botella

El método usado para el cálculo de la tasa de desoxigenación es el de mínimos cuadrados, de los momentos, de la diferencia diaria, de Thomas y otros.

El método de mínimos cuadrados se representa matemáticamente como.

$$y = L(1 - e^{-k_1 t}) \quad (7)$$

En forma diferencial

$$\frac{dy}{dt} = -K(L - y) \quad (8)$$

La ecuación anterior es lineal, por lo cual se puede obtener expresiones para L y K por mínimos cuadrados. Por errores experimentales, se generan dos términos para la ecuación anterior los cuales no serán iguales y habrá una diferencia R para las dos ecuaciones.

$$R = K(L - y) - \frac{dy}{dt} \quad (9)$$

$$R = KL - Ky - y' \quad (10)$$

O, también

$$R = a + by - y' \quad (11)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= KL \\ b &= -KL \end{aligned}$$

El método de mínimos cuadrados requiere de

$$\sum R^2 = \sum (a + by + y')^2 \quad (12)$$

Cuando las primeras derivadas de $\sum R^2$ con respecto a y b, son iguales a cero. Para N+1 pares de valores observados de y t se obtienen las dos ecuaciones normales:


$$N_a + b \sum y - \sum y' = 0 \quad (13)$$

$$a \sum y - b \sum y^2 - \sum yy' = 0 \quad (14)$$

Donde:

$$K = -b \quad y \quad L = -\frac{a}{b}$$

N = número de pares de valores observados - 1

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 26 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Los valores de y' se calculan para Δt constante, así:

$$\frac{dy}{dt} = y' = \frac{y_{N+1} - y_{N-1}}{2\Delta t} \quad (15)$$

Para Δt variable, el cálculo se hace así:

$$y' = \frac{(y_N - y_{N-1}) \left[\frac{t_{N+1} - t_N}{t_N - t_{N-1}} \right] + (y_{N+1} - y_N) \left[\frac{t_N - t_{N-1}}{t_{N+1} - t_N} \right]}{t_{N+1} - t_{N-1}} \quad (12)$$

Donde:

y_N y t_N = magnitud y tiempo para el cual se calcula y' .

y_{N-1} - t_{N-1} = valores para el punto inmediatamente anterior.

y_{N+1} - t_{N+1} = valores para el punto inmediatamente siguiente.

Tabla N° 10. Resultados de la Tasa de Desoxigenación en Botella winkler

Tramo	Botella Kd (d ⁻¹)
RF-S	0,032
RF-J	0,007
RF-03	0,050
RF-BO	0,044
RF-P	0,003
RF-C	0,031
RF-1A	0,018

2.4.2 Cálculo de la Tasa de desoxigenación por correlación logarítmica de la DBOC en el río

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:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -U \frac{\partial L}{\partial x} - k_r L \quad (13)$$

Donde:


k_r = tasa total de remoción (d⁻¹), la cual se compone de:

$$k_r = k_d + k_s \quad (14)$$

Donde:

k_d = Tasa de descomposición en el río (d⁻¹).

k_s = Tasa de sedimentación removida en el río (d⁻¹).

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 27 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Se debe reconocer que el experimento con la botella winkler (obtención K1) 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:

$$k_s = \frac{v_s}{H} \quad (15)$$

Donde:

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

H = Profundidad del río (m).

En un estado estable sería:

$$0 = -U \frac{dL}{dx} - k_r L \quad (16)$$

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

$$L_0 = \frac{Q_w L_w + Q_r L_r}{Q_w + Q_r} \quad (17)$$

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

$$L = L_0 e^{-\frac{k_r}{U} x} \quad (18)$$

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:

$$\ln L = \ln L_0 - \frac{k_r}{U} x \quad (19)$$

Si despejamos k_r , nos queda:

$$k_r = \frac{(\ln L_0 - \ln L) * U}{x} \quad (20)$$

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.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 28 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 11. Valores típicos de tasas de descomposición de la DBO en diferentes niveles de tratamiento

Tratamiento	K ₁ (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° 12. Valores típicos de la DBO en Aguas residuales en Colombia

	Caudal (m ³ d ⁻¹)	Per-cápita	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:

$$L_o = \frac{y_5}{1 - e^{-k_1(5)}} \quad (21)$$

Donde:

y_5 = es la DBO en el 5° día, en la Tabla N° 12. Se encuentran los valores que relacionan la DBOC₅ con la DBOC_U.

2.4.3 Cálculo de la Tas de desoxigenación por Ecuación Hydroscience

La estimación en la botella provee una estimación preliminar de la tasa de remoción en el agua natural. Como se muestra en la Tabla N° 14 las tasas dependen del grado de tratamiento del agua residual antes de la descarga. El agua residual cruda es mezclada con compuestos que van desde los fácilmente degradables como azúcares hasta los materiales refractarios que duran más tiempo en romperse para ser degradados. Se tiende a seleccionar el tratamiento como remoción a una tasa baja parecida a la del método de botella.

Figura N° 13 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad del río para un 50% DBO sedimentable, representada para un rango de velocidad de sedimentación (v_s)

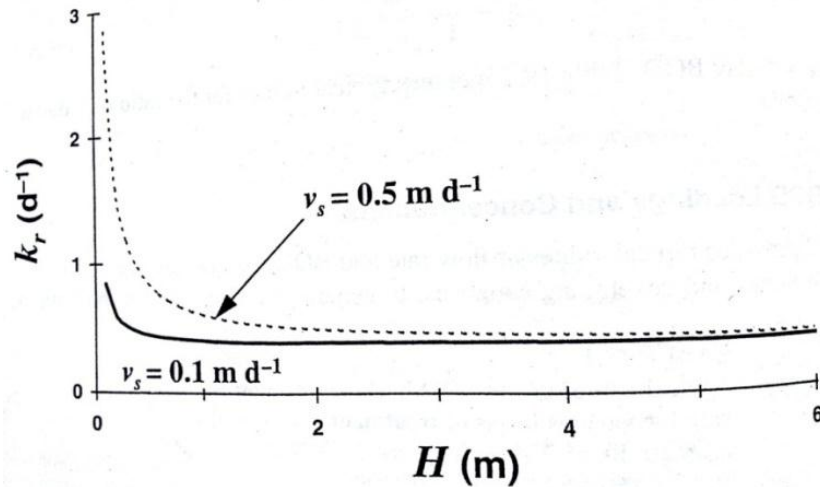
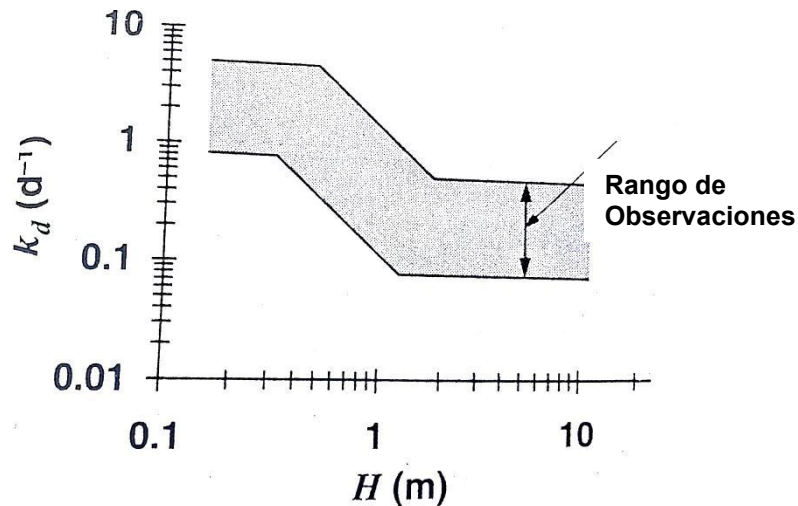



Figura N°14 Tasa de remoción (k_r) versus profundidad



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 (22). Quedando entonces.

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 30 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

$$k_r = k_d + \frac{v_s}{H} \quad (22)$$

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 profundos (< 1 m).

Efectos del Lecho: Todas 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 debido a que el efecto 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 1971) son:

$$k_d = 0.3 \left[\frac{H}{8} \right]^{-0.434} \quad 0 \leq H \leq 8 \text{ pies} \quad (23)$$

$$k_d = 0.3 \quad H > 8 \text{ pies} \quad (24)$$

Así para profundidades superiores a 2.4m (8 pies) la tasa decrece con la profundidad. Por encima de 2.4 m, la tasa 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.

$$k = k_{20} \theta^{T-20} \quad (25)$$

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.

El resultado de las tres técnicas se ilustra en la siguiente tabla


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 31 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

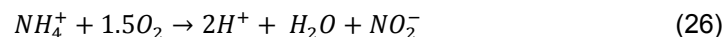
Tabla N° 13. Resultados de las Tasas de Desoxigenación por comparación Logarítmica y por Ecuación Hydroscience (Kd)

Tramo	Kr (d ⁻¹)	Kd (d ⁻¹)	Ks (d ⁻¹)	Kr (d ⁻¹)
	Ln	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

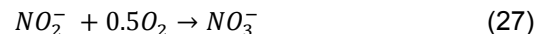
2.5 CÁLCULO DE LA TASA DE NITRIFICACIÓN

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 el ión amonio (NH₄⁺) a nitrito.



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.

$$r_{oa} = \frac{1.5(32)}{14} = 3.43 \text{ gO gN}^{-1} \quad (28)$$


$$r_{oi} = \frac{0.5(32)}{14} = 1.14 \text{ gO gN}^{-1} \quad (29)$$

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

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 32 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

$$r_{on} = r_{oa} + r_{oi} = 4.57 \text{ gO gN}^{-1} \quad (30)$$

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:

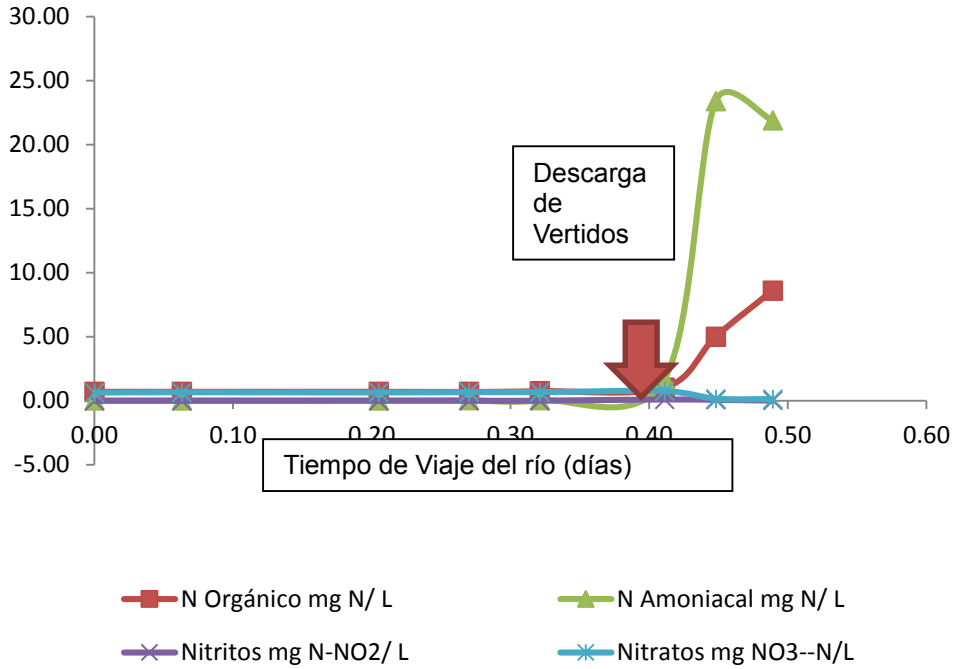
1. Presencia suficiente de bacterias nitrificantes.
2. Un pH alcalino, alrededor de 8.
3. Suficiente oxígeno (1 a 2 mg L⁻¹).

Los resultados de la validación de las especies de nitrógeno en el río durante su recorrido se ilustran en la siguiente gráfica.

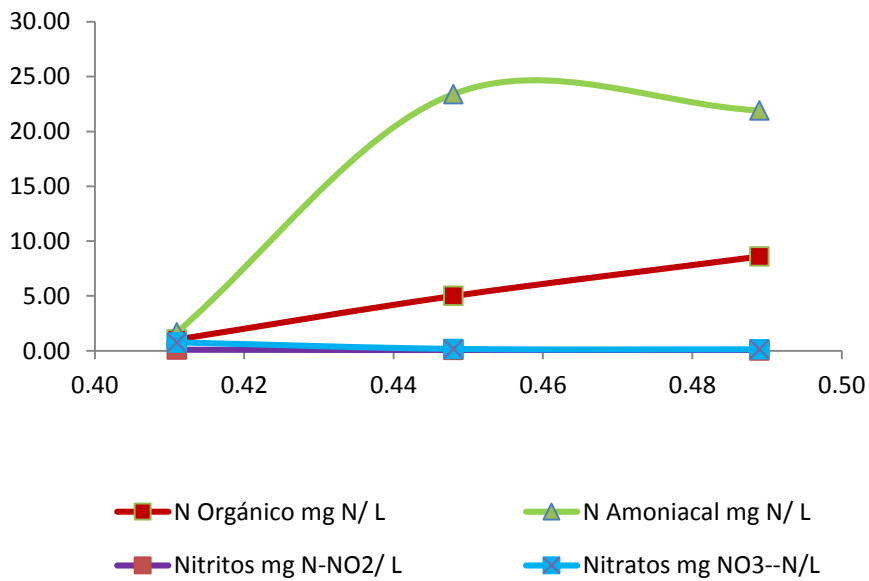
Tabla N° 14. Concentraciones de Nitrógeno Orgánico, Amoniacal, Nitritos y Nitratos en el río Frío

TRAMO	Tv Acum	N Orgánico	N Amoniacal	Nitritos	Nitratos
	(d)	mg N/ L	mg N- NH ₄ ⁺ / L	mg N-NO ₂ / L	mg N-NO ₃ /L
Cab	0,00	0,71	0,03	0,00	0,63
Ignacio	0,06	0,71	0,03	0,00	0,66
judía	0,21	0,71	0,03	0,01	0,64
Esperanza	0,27	0,70	0,04	0,01	0,67
Botánico	0,32	0,76	0,05	0,01	0,67
Pórtico	0,41	1,03	1,69	0,11	0,75
Callejuelas	0,45	5,00	23,40	0,07	0,16
Caneyes	0,49	8,60	21,90	0,02	0,12

Gráfica N° 3 Comportamiento de las especies de Nitrógeno desde San Ignacio a Caneyes

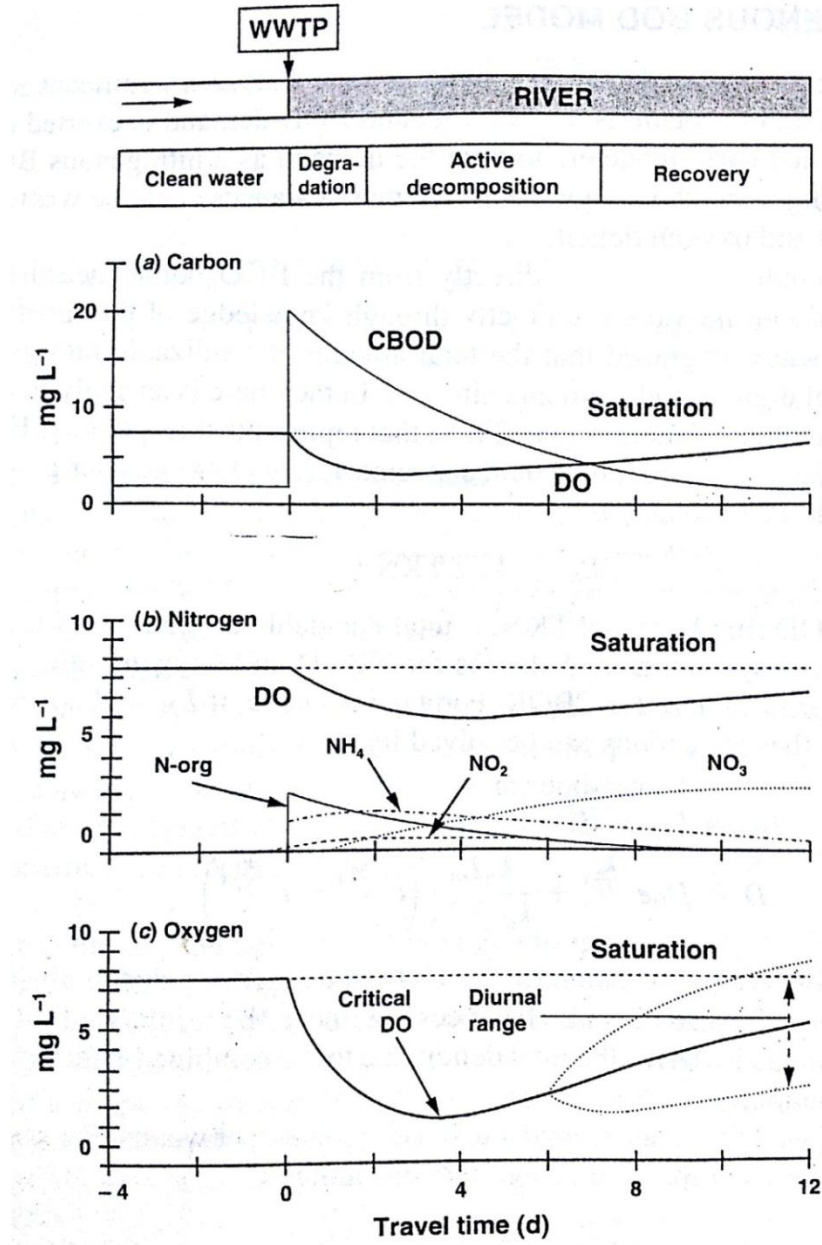


Gráfica N° 4 Comportamiento de las especies de Nitrógeno entre el Pórtico - Caneyes




La simulación del proceso de nitrificación aguas abajo de un vertido se puede ilustrar en la siguiente figura, suponiendo concentraciones de un 50% de Nitrógeno orgánico y 50% de Nitrógeno Amoniacoal. Esto genera un una disminución del nitrógeno orgánico y del amoniacoal para formar nitrito y nitrato, consumiendo el oxígeno del río.

Figura N° 15 Tendencia del carbono, nitrógeno y oxígeno aguas abajo de un vertido AR



El modelo de Nitrificación asumido bajo una cinética de primer orden, se puede describir en una

	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 35 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

serie de reacciones como sigue:

$$\frac{dN_o}{dt} = -k_{oa} * N_o \quad (31)$$

$$\frac{dN_a}{dt} = -k_{oa} * N_o - k_{ai} * N_a \quad (32)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = -k_{ai} * N_a - k_{in} * N_i \quad (33)$$

$$\frac{dN_n}{dt} = -k_{in} * N_i \quad (34)$$

Donde:

o, a, i y n , son orgánico, amoniacal, nitrito y nitrato, respectivamente.

Si se establece el río como un reactor hacia adelante, es decir que las entradas aguas arriba se conviertan en salidas aguas abajo, se presenta una solución matemática a la concentración de nitrógeno en diferentes valencias aguas abajo. De acuerdo a (O'Connor y Mueller 1970, Di Toro 1972), las siguientes ecuaciones simulan dichas concentraciones para el caso donde $N_o, = N_{o0}$ y $N_a = N_{a0}$, es decir inician en un $t = 0$. La solución para las especies de nitrógeno: orgánico, amoniacal, nitrito y nitrato es la siguiente:

$$N_o = N_{o0} e^{-k_{oa} * t} \quad (35)$$

$$N_a = N_{a0} e^{-k_{ai} * t} + \frac{k_{oa} N_{o0}}{k_{ai} - k_{oa}} (e^{-k_{oa} * t} - e^{-k_{ai} * t}) \quad (36)$$

$$N_i = \frac{k_{ai} N_{a0}}{k_{in} - k_{ai}} (e^{-k_{ai} * t} - e^{-k_{in} * t}) + \frac{k_{ai} k_{oa} N_{o0}}{k_{ai} - k_{oa}} \left[\frac{e^{-k_{oa} * t} - e^{-k_{in} * t}}{k_{in} - k_{oa}} - \frac{e^{-k_{ai} * t} - e^{-k_{in} * t}}{k_{in} - k_{ai}} \right] \quad (37)$$

$$N_n = N_{o0} + N_{a0} - N_{o0} e^{-k_{oa} * t} - N_{a0} e^{-k_{ai} * t} - \frac{k_{oa} N_{o0}}{k_{ai} - k_{oa}} (e^{-k_{oa} * t} - e^{-k_{ai} * t}) - \frac{k_{ai} N_{a0}}{k_{in} - k_{ai}} (e^{-k_{ai} * t} - e^{-k_{in} * t}) - \frac{k_{ai} k_{oa} N_{o0}}{k_{ai} - k_{oa}} \left[\frac{e^{-k_{oa} * t} - e^{-k_{in} * t}}{k_{in} - k_{oa}} - \frac{e^{-k_{ai} * t} - e^{-k_{in} * t}}{k_{in} - k_{ai}} \right] \quad (38)$$

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_i

Los resultados obtenidos haciendo la iteración, se ilustran en la siguiente tabla.


	INFORME DE TASAS DE DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL RÍO FRÍO (SAN IGNACIO- CANEYES) CONVENIO ESPECÍFICO N° 7486-08	Pág. 36 De 36
Elaboró: Jorge V Rivera	Revisó: Fabio González	Rev: 1

Tabla N° 15. Resultados de las Tasas de Amonificación (Koa) y Conversión de amonio a nitrito y nitrato (Kai, Kin)

TRAMO	<i>Tv</i> (<i>d</i>)	<i>Koa</i> (<i>d</i> ⁻¹)	<i>Kai</i> (<i>d</i> ⁻¹)	<i>Kin</i> (<i>d</i> ⁻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

Un balance del déficit de oxígeno puede describirse como:

$$\frac{dD}{dt} = r_{oa} * k_{ai} * N_a + r_{oi} * k_{in} * N_i - k_a * D \quad (39)$$