

**DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE CALIDAD EN EL RIO PALO, EN EL ÁREA DE
JURISDICCIÓN DE LA CRC**

RUTH ANGELIC REYES CARVAJAL

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2009**

**DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE CALIDAD DEL AGUA EN CORRIENTES
SUPERFICIALES, EN EL ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CRC**

**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA
SUBDIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL**

Presentado por
RUTH ANGELIC REYES CARVAJAL

Director de Pasantía
PAULO MAURICIO ESPINOSA ECHEVERRI
Ingeniero Químico, MSc.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2009**

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por la esperanza que me mueve y el amor que me da felicidad, que me permitió la luz para prepararme y cumplir con las metas que me he propuesto.

*A mis padres, Ruth Graciela y Jaime por su amor, comprensión, paciencia y apoyo incondicional.
A mis hermanos, por sus ánimos y serenidad que alientan mi vida.*

A mis Tíos y Primos por su apoyo.

A mis amigos, por sus sueños y adorable compañía en mi afán por alcanzar los míos.

A mis profes, por el apoyo y sus enseñanzas a lo largo de mi camino como estudiante

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca, por su receptividad y apoyo a la investigación desde el concepto de balance social y ambiental, factor que permite una verdadera formación integral.

Al personal administrativo de la Universidad del Cauca, que con su ayuda hizo posible este trabajo.

A *Paulo Mauricio Espinosa Echeverri* Ingeniero Químico, “Maestro Emprendedor” quien me orientó con sus aportes académicos, su dedicación, logrando despertar en mi motivos de trabajo y de persistencia en mis metas.

A Carlos César Cabezas Córdoba Ingeniero Químico, por su generosa colaboración.

Al Ingeniero *Nixon Alexander*, por su generosa colaboración en el manejo de software en los Sistemas de Información Geográfica.

Al personal administrativo de la Corporación autónoma Regional del Cauca-C.R.C

A *Mauricio Aguirre Gómez* Ingeniero Civil, especializado, funcionario de la CRC, quien me orientó, en el marco del desarrollo de Modelación de aguas.

A todas las personas que me ayudaron de una u otra manera para hacer posible el desarrollo de este trabajo.

Infinitas gracias a todas las personas que me colaboraron y aportaron, para llegar al sueño de una de mis metas más preciadas en mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	16
1 OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2 ALCANCE	20
3 JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.....	21
4 GENERALIDADES DE LA ENTIDAD RECEPTORA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA C.R.C	22
5 MARCO GENERAL.....	25
5.1 MARCO TEÓRICO	25
5.1.1 <i>Calidad de aguas</i>	25
5.1.2 <i>Índices de Calidad de Aguas ICA y de Contaminación ICO</i>	28
5.1.3 <i>Objetivos de Calidad del agua por Metodología Mesoca y Modelos de Calidad</i>	31
5.1.4 <i>Determinación de cargas contaminantes por modelos de calidad</i>	32
5.2 MARCO LEGAL	36
6 METODOLOGÍA	38
6.1 METODOLOGÍA GENERAL.....	38
6.2 METODOLOGÍA ESPECÍFICA.....	39
7 CONTEXTUALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	40
7.1 RIO PALO.....	41
7.1.1 <i>Descripción General del Río Palo</i>	41
7.1.2 <i>Localización de Estaciones de Monitoreo</i>	42
7.1.3 <i>Campañas Realizadas</i>	43
7.1.4 <i>Parámetros Analizados</i>	43
7.1.5 <i>Cargas Contaminantes que Recibe el Rio Palo</i>	43
7.1.6 <i>Análisis de los sectores que aportan cargas contaminantes al rio palo</i>	49
8 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO PALO	51
8.1 PERFILES DE CALIDAD Y ANÁLISIS DE CADA PARÁMETRO	51

8.1.1	<i>Grupo de parámetros Físico-Químicos</i>	52
8.1.2	<i>Parámetros de Contaminación.</i>	57
8.1.3	<i>Parámetros de Fertilización</i>	62
8.1.4	<i>Parámetros de Contaminación Bacteriológica</i>	63
8.2	RESULTADOS DE ÍNDICES DE CALIDAD ICA E ICO	64
8.2.1	<i>Resultados de los ICA</i>	65
8.2.2	<i>Resultados de los ICOs</i>	66
8.3	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE CALIDAD DE AGUAS DEL RÍO PALO	69
8.4	IDENTIFICACIÓN DE TRAMOS Y DEFINICIÓN DE CONSTANTES PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MESOCA Y EL MODELO DE STREETER Y PHELPS	70
8.4.1	<i>Identificación de los tramos</i>	70
8.4.2	<i>Definición del Valor de las Constantes de Consumo y de Reaireación</i>	72
8.5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MESOCA	76
8.6	MODELACIÓN POR STREETER Y PHELPS DEL RÍO PALO	78
8.7	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE MODELACIÓN DEL RIO PALO	89
8.8	DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE CALIDAD	91
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	BIBLIOGRAFÍA	101
	ANEXOS	104

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Clasificación del "ICA" propuesto por BROWN _____	29
Tabla 2. Rangos de clasificación de la contaminación del agua mediante los índices ICOMO, e ICOSUS31	31
Tabla 3 Número de estaciones de calidad por cada fuente hídrica _____	23
Tabla 4. Parámetros analizados en cada campaña. _____	24
Tabla 5. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo, en el área de estudio en el río Palo. _	42
Tabla 6. Número y fecha de realización de campañas de monitoreo del río Palo. _____	43
Tabla 7. Ubicación de: descargas Municipales, industriales y naturales sobre el Río Palo. _____	43
Tabla 8. Cargas contaminantes vertidas de la PTAR -D guachené _____	45
Tabla 9. Cargas contaminantes vertidas del Barrio el Triunfo _____	45
Tabla 10. Cargas contaminantes del Matadero Municipal de Puerto Tejada al Río Palo-2006. _____	45
Tabla 11. Promedios de cargas contaminantes del sector industrial al Río Palo, años 2004 - 2008 _	46
Tabla 12. Cargas contaminantes de fuentes naturales en el Río Palo, 10 de agosto 2006 _____	48
Tabla 13. Criterios presuntivos de calidad para la estimación de la DBO ₅ _____	59
Tabla 14. Descripción de tramos del Río Palo _____	71
Tabla 15. Usos actuales y potenciales de los tramos del río _____	72
Tabla 16. Características hidráulicas del Río Palo -10 de Agosto de 2006 _____	72
Tabla 17. Coeficiente de reaireación Ka, con las diferentes ecuaciones _____	74
Tabla 18. Constante de Remoción de DBO ₅ , con la ecuación de 1 ^{er} Orden de DBO _____	75
Tabla 19. Constante de Remoción de DBO ₅ , con la ecuación de 1 ^{er} Orden de DBO _____	75
Tabla 20. Constantes tomadas para la Calibración _____	81
Tabla 21. Objetivos de Calidad para el Tramo 1 _____	93
Tabla 22. Objetivos de Calidad para el Tramo 2 _____	94
Tabla 23. Objetivos de Calidad para el Tramo 3 _____	95
Tabla 24. Objetivos de Calidad para el Tramo 4 _____	96
Tabla 25. Objetivos de Calidad para el Tramo 5 _____	97
Tabla 26. Cargas Máximas Permisibles _____	99
Tabla 27. Precipitación media mensual de la Subcuenca del Río Palo en mm/mes ¡Error! Marcador no definido.	

LISTAS DE ESQUEMAS

	Pág
Esquema 1. Metodología General en la Definición de Objetivos de Calidad.....	38
Esquema 2. Metodología Específica en las fases de la Definición de Objetivos de Calidad.	39
Esquema 3. Organigrama de la Corporación Autónoma Regional del Cauca –CRC.....	22
Esquema 4. Tributarios, usuarios, tramos y usos del río Palo	73

LISTAS DE MAPAS

	Pág
Mapa 1. Estaciones de calidad georreferenciadas en el Departamento _____	23
Mapa 3. Municipios que conforman la cuenca palo _____	40
Mapa 3. Cuenca Hidrográfica del Río Palo _____	41

LISTAS DE GRÁFICAS

Pág

Gráfica 1. Relaciones de DBO ₅ de los sectores en el Río Palo. _____	49
Gráfica 2. Relaciones de SST de los sectores, en el Río Palo. _____	50
Gráfica 3. Precipitación Media Multianual del Río Palo, entre el año 1974 hasta el 2003 _____	51
Gráfica 4. Variación de Temperatura a lo largo del río. _____	53
Gráfica 5. Variación del pH a lo largo del río. _____	53
Gráfica 6. Variación de Conductividad a lo largo del río Palo _____	54
Gráfica 7. Variación del Color a lo largo del Río _____	55
Gráfica 8. Variación de Turbiedad a lo largo del Río _____	56
Gráfica 9. Variación del OD a lo largo del Río _____	57
Gráfica 10. Variación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a lo largo del Río _____	58
Gráfica 11. Variación de la Demanda Química de Oxígeno a lo largo del Río _____	59
Gráfica 12. Variación de los Sólidos Suspendidos a lo largo del Río _____	61
Gráfica 13. Variación de Nitratos a lo largo del Río _____	62
Gráfica 14. Variación de Fosfatos a lo largo del río _____	63
Gráfica 15. ICA en el río Palo _____	65
Gráfica 16. ICOMO a lo largo del río _____	66
Gráfica 17. ICOSUS a lo largo del Río _____	68
Gráfica 18. Cargas Permisibles de DBO ₅ al río Palo, según la Metodología Mesoca _____	76
Gráfica 19. DBO ₅ , Representada por el modelo de Streeter y Phelps con constantes de literatura ____	80
Gráfica 20. OD, Representada por el modelo de Streeter y Phelps con constantes de literatura ____	80
Gráfica 21. Calibración de DBO ₅ _____	82
Gráfica 22. Calibración de OD _____	82
Gráfica 23. DBO ₅ , Representada por el modelo de Streeter y Phelps sin PICC _____	83
Gráfica 24. Gráfica de OD, Representada por el modelo de Streeter y Phelps sin PICC _____	84
Gráfica 25. Modelación de DBO ₅ , con datos promedios desde el 2004 hasta el 2008 _____	86
Gráfica 26. Modelación de OD, con datos promedios desde el 2004 hasta el 2008 _____	86
Gráfica 27. Modelación de DBO ₅ , con incremento _____	87
Gráfica 28. Modelación de OD con incremento _____	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Descriptores Físico de Color de aguas.....	26	Pág
Cuadro 2. Valores del ICA y relación con los usos.....	30	
Cuadro 3. Descripción de los subsistemas hidrológicos de la subcuenca del Río Palo	48	

LISTAS DE ANEXOS

Anexo A. REGÍMENES DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA PALO DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA. EN EL AÑO 2006.....	¡Error! Marcador no definido.	Pág
Anexo B. REPORTE DE CALIDAD DE AGUA DEL RÍO PALO DEL 10 DE AGOSTO DE 2006¡Error! Marcador no definido.		

LISTA DE ABREVIATURAS

AAC	Autoridad (es) Ambiental (es) Competente (s)
ARD	Agua Residual Doméstica
ARI	Agua Residual Industrial
CORNARE	Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare
CORPOAMAZONIA	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico
CORPOURABA	Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá
CRC	Corporación Autónoma Regional del Cauca
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
ICA	Índices de Calidad del agua
ICO	Índices de Contaminación
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MESOCA	Metodología
PTAR-D	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – Doméstica
PICC	Parque Industrial y Comercial del Cauca
PSMV	Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos

Parámetros de Calidad

CT	Coliformes Totales
CF	Coliformes Fecales
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días
DBO _u	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 20 días o última
DQO	Demanda Química de Oxígeno
G y A	Grasas y Aceites
NO ₃	Nitratos
pH	Potencial de Hidrógeno
PO ₄ ³⁻	Fosfatos
SST	Sólidos Suspendidos Totales

Unidades de Masa

Kg	Kilogramos
Kg/día	Kilogramos por día
Km	Kilómetros
L	Litro (s)
L/s	Litro (s) por segundo
m	Metro (s)
m ³	Metros Cúbicos
m/s	Metro (s) por segundo

GLOSARIO

Calidad del Agua: es la calidad del ambiente acuático, entendido como una serie de concentraciones, especificaciones y participación física de sustancias inorgánicas u orgánicas, las cuales describen las variaciones espacio-temporales debidas por factores, internos y externos de los cuerpos de agua, que reflejan la composición y el estado de la biota.

Contaminación del agua: la calidad del agua puede ser modificada como consecuencias de las actividades naturales o humanas que producen alteraciones de la calidad fisicoquímica o biológica del agua, ya que limitan el valor del uso y deterioran el valor ecológico del recurso hídrico. Estas alteraciones son denominadas contaminación del agua, y un contaminante es el factor o la sustancia que provoca esa alteración.

Criterio de Calidad: es el que indica los niveles o concentraciones de parámetros físicos y químicos y/o potenciales contaminantes, garantizando y protegiendo los diversos usos en un determinado compartimento ambiental.

Estudio de la calidad del agua: el estudio de la calidad del agua involucra diferentes aspectos relacionados con la naturaleza fisicoquímica y biológica del agua en su estado natural, así como las alteraciones que sufre por los impactos generados en las diferentes actividades antropogénicas desarrolladas y que se reflejan en el comportamiento de sus diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos.

Fuentes dispersas: Se catalogan como fuentes dispersas, a la cantidad de contaminantes que llegan sobre la fuente superficial de manera indirecta, es decir por escorrentías, las cuales son producto de actividades tales como: labranza y arado, riego y drenaje, silvicultura- agroforestería, acuicultura – piscicultura, fertilizantes, lo que conlleva a la alteración de las condiciones normales del río influyendo así en la calidad sus aguas.

Índices de Calidad del Agua –ICA: es una expresión simple de una combinación compleja de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos los cuales sirven como una medida de la calidad del agua. El índice puede ser representado por un número, un rango, un símbolo o un color.

Índices de Contaminación -ICO: son criterios de evaluación del nivel de contaminación presente en el agua, desarrollados a partir del análisis de gran cantidad fisicoquímica, resultante de diferentes estudios.

Monitoreo de la calidad del agua: es el compendio de información de una serie de localidades (estaciones de monitoreo) a intervalos regulares, destinado a coleccionar los datos necesarios para evaluar la calidad del agua.

Objetivos de Calidad del agua: se realizan con el fin de verificar la capacidad de carga y los niveles de asimilación de una corriente de agua, con el fin de mantener los ciclos de vida de los ecosistemas acuáticos. Los criterios y objetivos de calidad son la base para la formulación de “*estándares de calidad*” ambiental que pueden tener valor oficial y ser directamente insertos en normativas. Los estándares de calidad debieran evaluar otros aspectos fuera del estrictamente científico como factores de naturaleza económica, política y social. En consecuencia, podrá coincidir con el criterio de calidad ambiental, pero también podrá descontarse de este criterio en función de tales factores, ya sea en el sentido que sea más permisivo para algunos casos o más restrictivos para otros.

Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV): son el conjunto de programas, proyectos y actividades con sus respectivos cronogramas e inversiones necesarios para el saneamiento y tratamiento de vertimientos, incluyendo la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de aguas residuales descargadas al sistema de alcantarillado, tanto sanitario como pluvial.

Tasa Retributiva: es un mecanismo o instrumento económico creado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que cobran las Corporaciones Autónomas Regionales por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de vertimientos puntuales, originados en actividades propiciadas por el hombre, actividades económicas o de servicios, sean o no lucrativas.

RESUMEN

Con el fin de dar conformidad al decreto 3100 de 2003 y al decreto 3440 de 2004 expedidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT, el presente trabajo está dedicado a la definición *Objetivos de calidad* del río Palo en el sector comprendido entre la Bocatoma de la planta hidroeléctrica de CEDELCA y su desembocadura al río Cauca, establecidos a través de: el análisis de calidad de sus aguas en función del tiempo, desde el año 2005 hasta el 2008; determinación de índices de calidad ICA -NSF, y los índices de contaminación ICOMO e ICOSUS; la aplicación de la Metodología MESOCA establecida por el MAVDT; y el modelo de disminución de oxígeno basado en las ecuaciones de Streeter y Phelps, con el fin de determinar las cargas máximas permisibles que puedan ingresar diariamente al río Palo, y así conocer el grado de afectación de dichas cargas en el transcurso de su cauce.

Para la aplicación de la metodología y el modelo de reducción, se tomó como base datos que reflejan las condiciones más desfavorables del cuerpo de agua, como fueron los resultados de campo y de laboratorio de la campaña realizada el 10 de agosto de 2006. Los resultados de la Metodología presentaron inconformidad, porque no relacionaban las condiciones reales de los tramos analizados, por lo tanto se optó definir los *Objetivos de Calidad* con los resultados del modelo de simulación de cargas Streeter y Phelps, porque tiene en cuenta balances de masa, de energía y de intercambio de oxígeno, los tributarios de cargas contaminantes sobre el cuerpo de agua, además fue de fácil manejo y accequible para la Corporación, que en su conjunto demostraron el comportamiento real del río, y por consiguiente se determinaron las cargas máximas permisibles que es capaz de asimilar de manera natural el Río Palo y definir las metas de calidad, en cada uno de los tramos seleccionados, que van de mano con los criterios de calidad establecidos en la normatividad colombiana del Decreto 1594 de 1984 y de otros países.

También, en este trabajo se proponen los posibles mecanismos para el debido cumplimiento de los objetivos de calidad definidos, con el fin de que todos los actores que interviene de una u otra manera en el estado de la cuenca, cooperen y aúnen esfuerzos para su recuperación, mitigación y preservación de la fuente hídrica, y así disfrutar de los recursos naturales y poder dejar un legado a las generaciones futuras.

Finalmente se dan recomendaciones, sobre los mecanismos que deben ser tenidos en cuenta por parte de la corporación, para futuros estudios sobre fuentes naturales, con el fin de que el desarrollo sea confiable y que sus resultados sean veraces.

INTRODUCCIÓN

La perspectiva global del recurso hídrico es la de pérdida en cantidad y calidad de manera preocupante, como consecuencia del uso inadecuado, lo que genera desequilibrio en la capacidad de soporte de los ecosistemas, por la agresiva intervención humana sobre ellos, por el incremento de la actividad agrícola e industrial y por el crecimiento demográfico, que lo someten a una fuerte presión, convirtiéndolo cada día más, en un recurso escaso y valioso.

Las fuentes hídricas naturales más intervenidas por las actividades del hombre son los ríos, ellos se han convertido en las fuentes receptoras de los residuos líquidos industriales, domésticos y agropecuarios, teniendo en cuenta que el tratamiento de ellos en el mundo es muy frágil aún, según cifras de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental -ACODAL, en el caso de América latina tan sólo un 14% recibe algún tipo de manejo y en Colombia, solamente el 12% son tratados.

A pesar de que Colombia cuenta con precipitaciones equivalentes al triple del promedio en el mundo y al doble de América Latina, además de grandes extensiones de bosques naturales, y disponibilidad de agua por habitante alrededor de 28.000 m³ anuales, con niveles que la ubican también por encima del promedio mundial (promedio anual mundial *per cápita* alrededor de 6.500 m³); la oferta hídrica del país, en términos de calidad más que de cantidad, se está viendo amenazada por los factores anteriormente descritos.

Según cifras del MAVDT, el 97% de las aguas residuales producidas en el país, se vierten a las fuentes receptoras sin ningún tipo de tratamiento, esta situación está generando que diariamente se descarguen a las fuentes hídricas 6 millones de m³ de aguas residuales domésticas (ARD) sin tratamiento alguno, con un nivel de contaminación de 1200 Ton/Día de DBO₅, disminuyendo la capacidad de asimilación de contaminantes del agua receptora, alterando su calidad para los diferentes usos que pueda ser destinada.

El Departamento del Cauca no es ajeno a esta problemática mundial y nacional, pues sus ríos Cauca, Magdalena, Caquetá, Patía, Palo, entre otros, también presentan graves problemas de contaminación a lo largo de su recorrido en el territorio caucano.

El río Palo, objeto de estudio del presente trabajo, es considerado uno de los ríos más intervenidos por actividades industriales legalmente constituidas en el norte del Departamento, pues recibe alrededor de 6000 Kg/día, de DBO₅, 20000 Kg/día de

DQO y 5000 Kg/día de SST, tras recorrer 40 Km desde la Bocatoma Cedelca hasta su desembocadura al río Cauca.

Dichas cargas contaminantes deben ser vigiladas y controladas por las Autoridades Ambientales a partir del Instrumento de Comando y Control (Decreto 1594 de 1984) y el Instrumento Económico reconocido como Tasa Retributiva reglamentado por el decreto 901 de 1997. Actualmente una de las medidas que fortalecen el control de vertimientos líquidos sobre las fuentes naturales, es la ***Definición Objetivos de Calidad*** reglamentados en los decretos 3100 de 2003, 3440 de 2004, y resolución CRC 0845 del 2006, consisten en determinar las cargas máximas contaminantes permisibles en términos de DBO₅ y SST vertidas a las fuentes hídricas, con el fin de conservar sus ecosistemas naturales.

La intención de este trabajo es el de proveer a la corporación una herramienta eficaz para el cobro de Tasas Retributivas, desde la perspectiva de los *Objetivos de Calidad definidos en el Río Palo*, con el fin de establecer una planificación y una ordenación integrada de la fuente hídrica, teniendo en cuenta los aspectos de cantidad y calidad ambiental del recurso y obtener de ello resultados ambientales, técnicos, económicos y socialmente sustentables.

Para sustentar lo anterior, se realizará un estudio detallado del río Palo del Departamento del Cauca, el cual se desarrollará a partir de dos fases: la primera, es el análisis de calidad de sus aguas, por medio de perfiles de cada parámetro desde el año 2005 hasta el 2008, confrontándolos con el decreto 1594/84, además se determinarán Índices de Calidad, ICA e ICO en este mismo periodo. La segunda, es la *Definición de Objetivos de Calidad* a partir de la determinación de la capacidad de cargas contaminantes del río, a través de la Metodología Mesoca expedida por el MAVDT, asimismo se definirán concentraciones de DBO₅ y de OD en un punto determinado, desarrollados a través de un modelo simple basado en las ecuaciones de Streeter y Phelps, y su correspondiente simulación a una condición de caudal medio, a partir de datos de campo registrados y analizados estadísticamente, con el fin de evaluar y predecir el comportamiento de estos dos parámetros; Finalmente se entregan conclusiones y recomendaciones, anexos y bibliografía.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Definir Objetivos de Calidad ambiental en la corriente superficial receptora de vertimientos industriales y municipales *Río Palo*, no definidos hasta ahora por la CRC.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ Evaluar la calidad del agua del río Palo, mediante perfiles de cada parámetro en las estaciones sobre el Río Palo desde el 2005 hasta el 2008, e índices ICA e ICO.
- ✚ Analizar las estadísticas de calidad del agua en el río Palo comparándola con los criterios de calidad del Decreto 1594 de 1984.
- ✚ Estimar la capacidad de carga de los tramos seleccionados del río Palo, usando la Metodología Mesoca.
- ✚ Definir la cantidad de materia Orgánica y de Oxígeno Disuelto presente en el río, en un punto determinado por medio del modelo de simulación de cargas Streeter y Phelps.
- ✚ Proponer posibles mecanismos para el debido cumplimiento de reducción de cargas.

2 ALCANCE

En atención a la resolución 0845 del 2006 y al decreto 3100 del 2003, la C.R.C, en ejercicio como AAC debe evaluar la calidad del agua de sus corrientes superficiales¹, por lo tanto *la Definición de Objetivos de Calidad del Agua del Río Palo*, da a conocer el estado actual del río, desarrollados a partir de modelos de simulación de cargas, que relacionan los procesos hidrológicos del sistema natural, balances hídricos, y de masas, caracterizando la oferta, la demanda y las condiciones de sostenibilidad del cuerpo, con el fin de definir su capacidad de respuesta ante las intervenciones del hombre, y las posibilidades de su uso.

Por lo anterior, este trabajo se constituye en una herramienta confiable y fundamental en la planificación, administración, control, seguimiento y monitoreo del Río Palo, ya que el fin, es el de proveer a la corporación de un estudio veraz, que sirva como soporte institucional en procesos de cobro de Tasas Retributivas, en estudios de cuantificación de cargas, como también de base en la toma de decisiones con respecto a actividades, obras, impactos, estado actual y futuro de la calidad del recurso hídrico y además en el establecimiento de Objetivos de Calidad para los demás cuerpos de agua dulce, al cual podrán tener acceso todas las personas interesadas en dicha información.

3 JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

El Río Palo, es de gran importancia para la economía regional, departamental y nacional, siendo destinado en actividades como: riego, abastecimiento para consumo humano y doméstico, industria, hidroeléctrica, recreación, y fuente de extracción de materiales para construcción. Por lo que hace, la contaminación en sus aguas sea más evidente y su uso sea limitado.

Por lo anterior, obliga a la CRC a que su estudio de calidad sea prioritario, para llevar a cabo una planificación y una ordenación integrada del recurso hídrico teniendo en cuenta aspectos de cantidad y calidad ambiental.

Por lo tanto, hace que cualquier acción o proyecto relacionado con la intervención y el mejoramiento del Río Palo del departamento del Cauca, deben guiarse en el marco de Objetivos de Calidad, debido a que estos son la condición preliminar para el desarrollo del proceso de concertación en el establecimiento de las metas de reducción de cargas contaminantes, que sirven de base para la implementación de la Tasa Retributiva por vertimientos líquidos, ya que son la guía para el desarrollo de los PSMV², según el decreto 3100 de 2003 y la resolución 1433 de 2004.

Actualmente la CRC, no ha establecido metas globales de reducción conforme a lo dispuesto por el artículo 9 del decreto anteriormente mencionado, y ha definido objetivos de calidad de manera global a 41 de los 42 municipios que actualmente conforman el Departamento.

A continuación se nombran las CAR's que han establecido objetivos de Calidad en áreas de su jurisdicción:

- El Acuerdo No. 0188 de agosto 23 de 2006, "Por medio del cual se ordena la recuperación del río Cali", el DAGMA acomete la Definición de Objetivos de Calidad para los tramos de las corrientes superficiales en su jurisdicción, utilizando la guía metodológica diseñada por el MAVDT y denominada: Metodología MESOCA.

- La Resolución No. 210-03-02-01- 1535, por la cual se establecen los Objetivos de Calidad para la cuenca hídrica del río Chigorodó, jurisdicción de CORPOURABA.

- La Resolución No. 1196 de 21 Noviembre 2006 por la cual se establecen Objetivos de Calidad para la microcuenca hidrográfica del arroyo Pichilin en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Sucre –CARSUCRE para el quinquenio 2006 – 2011³.

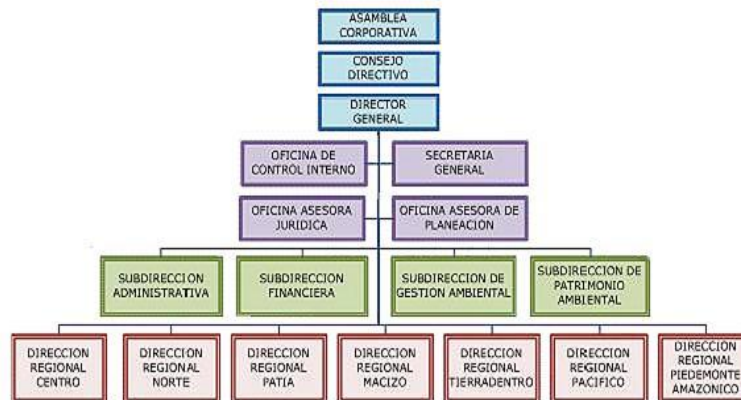
4 GENERALIDADES DE LA ENTIDAD RECEPTORA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA C.R.C

A continuación se hace una breve reseña histórica del ente corporativo, dónde se llevó a cabo este trabajo.

La Corporación Autónoma Regional del Cauca -CRC es un ente corporativo de carácter público de orden nacional adscrita al MAVDT; cuyo objetivo principal es la administración de los recursos naturales renovables, propendiendo por el Desarrollo Sostenible de conformidad con las disposiciones normativas y legales⁴.

Fue creada mediante la ley 11 de 1.983 como Corporación para la Reconstrucción y el Desarrollo del Departamento del Cauca, con motivo del terremoto del mismo año en la ciudad de Popayán. La Ley 99 de 1993, que instauró en Colombia el MAVDT, reordenó el sector público para la gestión, conservación del ambiente y los recursos naturales y organizó el Sistema Nacional Ambiental SINA; dispuso para tal propósito su reestructuración como Corporación Autónoma Regional del Cauca⁵, y su estructura está conformada tal como lo demuestra el siguiente organigrama.

Esquema 1. Organigrama de la Corporación Autónoma Regional del Cauca –CRC.



Fuente: CRC -2008

En la *Subdirección de Gestión Ambiental* se dirigen acciones corporativas tendientes a administrar los recursos naturales y desarrollar actividades de manejo ambiental a través del otorgamiento de licencias, permisos, concesiones y autorizaciones ambientales con el fin de propiciar el uso sostenible de los ecosistemas forestales, acuáticos continentales de la biodiversidad.

En marco de la administración de los recursos naturales y el ambiente para su conservación, recuperación, manejo y uso sostenible, la Entidad presta especial interés a la Gestión en Administración, Regulación y Ordenamiento del Recurso

Agua, teniendo en cuenta que dentro de un contexto socio-cultural el Agua es un recurso que identifica culturas y costumbres de arraigo regional.

Por lo anterior se ha realizado el Programa anual de Monitoreo de fuentes Hídricas del Departamento, efectuando Monitoreos de Calidad sobre corrientes priorizadas por la Corporación.

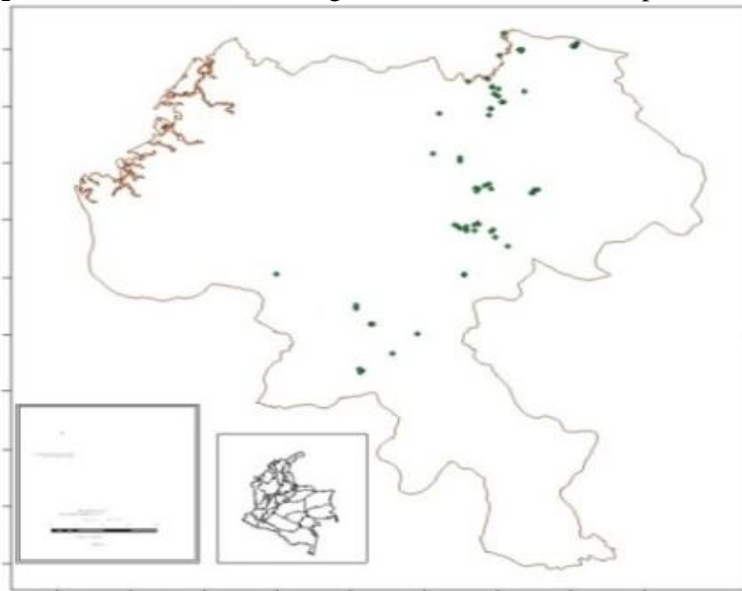
Cada monitoreo se realiza en un (1) día, cada tres meses y para ello se han establecido estaciones de calidad a lo largo de las corrientes, reportadas en la tabla 3, que muestra las corrientes con el número de estaciones presentes en cada una de ellas y en el Mapa 1 las estaciones geográficamente ubicadas en el Departamento.

Tabla 1 Número de estaciones de calidad por cada fuente hídrica

Corriente	No. Estaciones
Río Cauca	10
Río Palo	9
Río Quinamayó	10
La Quebrada Tabla	4
Zanjón Oscuro	4
Río Molino	3
Río Ejido	4

Fuente: Adaptado CRC-2006

Mapa 1. Estaciones de calidad georreferenciadas en el Departamento



Fuente: CRC-2006

En cada campaña de monitoreo se determinan parámetros in situ y ex situ. Los parámetros in situ son: pH, Temperatura, Conductividad y OD, utilizando equipos con sondas multiparamétricas. Para los parámetros ex situ, se realizan en el Laboratorio Ambiental de la Corporación, teniendo en cuenta especificaciones de Guías de Monitoreos sobre fuentes hídricas expedidas por el MAVDT y guías metodológicas del IDEAM. En la tabla 4 se presentan los Parámetros determinados por la CRC, con los métodos practicados.

Tabla 2. Parámetros analizados en cada campaña.

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO
pH	Uds	Potenciómetro In Situ
Temperatura	Grados Celcius	Potenciómetro In Situ
Conductividad	µsiemens/cm	Potenciómetro In Situ
OD	mg/L	Potenciómetro In Situ
Color	UPC	Platino-Cobalto
Turbiedad	UNF	Turbidímetro
NO ₃	mg/L N	Acido Clorhídrico
PO ₄ ³⁻	mg/L P	Acido Ascórbico
DBO ₅	mg/L	Incubación 5 días electrométrico
DQO	mg/L	Oxidación ácido Cromosulfúrico
SST	mg/L	Gravimétrico
CF	NMP microgramos/100mL	Sustrato Definido
CT	NMP microgramos/100mL	Sustrato Definido

Fuente: CRC-2008

5 MARCO GENERAL

Para abordar en materia los objetivos de calidad del agua, se hace una breve referencia sobre la temática que se manejará en este trabajo

5.1 MARCO TEÓRICO

5.1.1 *Calidad de aguas*

Según el IDEAM -2001, *la calidad del agua* se refiere a la calidad del ambiente acuático, entendido este como una serie de concentraciones, especificaciones y partición física de sustancias inorgánicas u orgánicas, las cuales describen las variaciones espacio-temporales debidas a factores internos y externos al cuerpo de agua, que se reflejen la composición y estado de su biota.

Entendido de esta manera se puede decir que, la calidad del agua se define como el conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos que la hacen apropiada para un uso determinado, agrupados en: parámetros físico-químicos, parámetros de contaminación, parámetros de fertilización y parámetros de contaminación bacteriológica

➤ *Grupo de parámetros físicos y químicos:*

Potencial de Hidrógeno -pH: es el que define el carácter ácido, básico o neutro de una solución. Es una variable importante en la calidad del agua, porque tiene influencia en la bioquímica de los procesos que ocurren en los cuerpos de agua. Este parámetro puede verse afectado por actividades humana como derrames químicos, efluentes de agua residuales, drenajes agrícolas y aguas lluvias,

Temperatura: la temperatura varía en el recorrido de los ríos debido a las fluctuaciones del clima, a las variaciones altitudinales y a la cantidad de energía del agua solar recibida en una hora determinada del día: según la estación del año y la latitud. El incremento de este parámetro, aumenta la velocidad de reacciones químicas y por consiguiente la evaporación y volatilización de sustancias químicas, también disminuye la velocidad de disolución de los gases en el agua (ejemplo el oxígeno), lo cual determina cambios en su concentración.

Conductividad: es una medida de la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica, depende de la presencia de iones, su concentración total,

movilidad, valencia concentración relativa y temperatura de medición, se ve influenciada por actividades domésticas e industriales.

Color: Este parámetro está asociado a sustancias en solución o a sustancias en suspensión de origen natural y/o antrópico. Las sustancias de origen natural que confieren color al agua pueden ser vegetales en descomposición, minerales disueltos de hierro y manganeso, limos y arcillas. Las sustancias ingresadas a las fuentes naturales por actividades del hombre dependen del tipo de actividad industrial que se lleve a cabo.

Según CARDENAS Jorge- 1993, en el capítulo 4 del Análisis organoléptico y set de Sólidos, los siguientes son algunos descriptores físicos que facilitan la interpretación del color del agua:

Cuadro 1. Descriptores Físico de Color de aguas

Tipo de Color	Tipo de agua
Incoloro	Típico de aguas frescas y aguas dulces
Grisáceo	Típico de Aguas Residuales Domésticas
Amarillo sin Turbidez	Típico de Aguas Subterráneas, de Estuarios y de Pantanos.
Amarillo Turbio	Típico de aguas torrentosas y/o cargadas de limos y arcillas
Amarillo Verodoso	Típico de Humedales y aguas ricas en Fitoplancton
Cafés u oscuras	Típico de aguas con altos contenidos de MO, Lixiviados y de PTARs

Fuente: Universidad Distrital Francisco José de Caldas-2003

Turbidez: La turbidez es una medida de la pérdida de la transparencia del agua ocasionada por materiales insolubles o en suspensión, como el material particulado, materiales coloidales o muy finos e incluso microorganismos, que son arrastrados principalmente por corrientes de aguas superficiales.

➤ **Grupo de parámetros de contaminación por fertilizantes:**

Nitratos - NO₃: estos son la principal forma de nitrógeno encontrada en las aguas superficiales, pueden provenir de rocas que los contengan (poco común), o bien por oxidación bacteriana de la materia orgánica. La concentración aumenta en las aguas superficiales por el uso de fertilizantes y el aumento de la población (vertimientos de aguas residuales domésticas), lo cual estimula el crecimiento de algas en lagos y represas causando eutroficación.

Fosfatos - PO_4^{3-} : se encuentran en fertilizantes y detergentes y llegan al agua por escurrimientos agrícolas, desechos industriales y descargas de aguas residuales. Estimula el crecimiento de las algas.

➤ **Grupo de parámetros de contaminación:**

Oxígeno Disuelto - OD: el oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno libre disponible en el agua, es uno de los indicadores más empleados en la calidad de aguas. Su contenido en aguas naturales varía con la temperatura, la salinidad, la turbulencia, la actividad fotosintética de plantas y la presión atmosférica. Este afecta a indicadores organolépticos como color, transparencia y olor (OD < 5mg/L afectan la diversidad biológica del agua, y OD < 2 mg/L causan muerte de los peces)

Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO_5 : es una medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en el agua, un valor elevado de este indica contaminación (DBO_5 < 2 mg/L indican agua poco contaminadas y DBO_5 > 20 mg/L, indican aguas muy impactadas por descargas de agua residuales UNESCO 1996).

Demanda Química de Oxígeno - DQO: es una medida del oxígeno requerido para oxidar todos los compuestos presentes en el agua, tanto orgánicos como inorgánicos por la acción de agentes fuertemente oxidantes en medio ácido. La materia orgánica se oxida hasta convertirse en CO_2 y agua, mientras que el nitrógeno se convierte en amoníaco. (DQO < 20 mg/L indican agua poco contaminadas).

Sólidos Suspendidos Totales - SST: Los sólidos suspendidos son las partículas que se mantienen dispersas en el agua en virtud de: su naturaleza coloidal, fuerza de arrastre causada por el movimiento del agua, turbulencia de la corriente, extracción de materiales de las cuencas vertimientos, deforestación y pérdida de cobertura vegetal en las franjas protectoras, entre otras.

➤ **Grupo de parámetros de contaminación bacteriana:**

Coliformes totales - CT y Coliformes Fecales - CF: son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo los humanos. La presencia de bacterias coliformes en aguas naturales, puede ser un indicio de contaminación por aguas residuales domésticas y otros tipos de desechos en descomposición. Generalmente, estas bacterias se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. Los CF se encuentran en los intestinos de humanos y otros animales de sangre caliente.

Contaminación del agua.

La calidad del agua puede ser modificada por las actividades humanas, que producen alteraciones de calidad fisicoquímica y biológica del agua ya que limitan su uso y deterioran el valor ecológico. Estas alteraciones son causadas por contaminantes del agua, y un contaminante es el factor o la sustancia que provoca esa alteración.

5.1.2 Índices de Calidad de Aguas ICA y de Contaminación ICO

Un índice de calidad de agua, es una expresión simple de una combinación compleja de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, los cuales sirven como una medida de la calidad del agua. El índice puede ser representado por un número, un rango un símbolo o color⁶.

En la actualidad los indicadores desarrollados involucran desde un parámetro hasta más de 30, pudiendo agruparse en diferentes categorías como: contaminación por materia orgánica e inorgánica, eutrofización, aspectos de salud, sustancias suspendidas y disueltas, nivel de oxígeno, características físico-químicas y sustancias disueltas.

Ventajas:

- Toma información compleja y la hace fácilmente entendible.
- Simplifica el análisis de gran cantidad de información.
- Permite llegar a todo tipo de público.

Desventajas:

- Está limitado en términos espacio temporales.
- No permite identificar la causa o causas principales del deterioro de un cuerpo de agua.

➤ Índices de Calidad del Agua ICA –WQI

El Índice de calidad de agua propuesto por Brown es una versión modificada del “WQI” que fue desarrollada en 1970, por La Fundación de Sanidad Nacional de EEUU (NSF), que en un esfuerzo por idear un sistema para comparar ríos en varios lugares del país, creó y diseñó un índice estándar llamado WQI (Water Quality Index) que en español se conoce como: *Índice de Calidad del Agua (ICA)*.

Este índice puede ser utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comparando la calidad del agua de diferentes tramos del mismo río, además de compararlo con la calidad de agua de diferentes ríos de otros. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo particular de dicho río es saludable o no.

Para la determinación del “ICA” intervienen 9 parámetros, los cuales son:

- Coliformes Fecales (NMP/100 mL)
- pH (en unidades de pH)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO₅ mg/ L)
- Nitratos (NO₃⁻ mg/L)
- Fosfatos (PO₄³⁻ mg/L)
- Cambio de la Temperatura (°C)
- Turbidez (FAU)
- Sólidos totales (mg/ L)
- Oxígeno disuelto (OD en % saturación)

El “ICA” adopta para condiciones óptimas un valor máximo determinado de 100, que va disminuyendo con el aumento de la contaminación el curso de agua en estudio, la clasificación se muestra en la tabla 1.

Tabla 3. Clasificación del “ICA” propuesto por BROWN

CALIDAD DE AGUA	COLOR	VALOR
Excelente		91 a 100
Buena		71 a 90
Regular		51 a 70
Mala		26 a 50
Pésima		0 a 25

Fuente: Lobos, José. Evaluación de los Contaminantes del Embalse del Cerrón Grande PAES 2002.

Las aguas con “ICA” mayor que 90 son capaces de poseer una alta diversidad de la vida acuática, indicando que el agua sería conveniente para todas las formas de contacto directo con ella.

Los valores de ICA de 51 a 70, de categoría “Regular” tienen generalmente menos diversidad de organismos acuáticos y han aumentado con frecuencia el crecimiento de las algas.

La calidad del agua que cae en categoría “Mala” con valores de ICA de 26 a 50, pueden solamente apoyar una diversidad baja de la vida acuática y están experimentando probablemente problemas con la contaminación.

Las aguas con un “ICA” que caen en categoría “Pésima o Muy Mala” pueden solamente apoyar un número limitado de las formas acuáticas de la vida, presentan problemas abundantes y normalmente no sería considerado aceptable para las actividades que implican el contacto directo con ella, tal como natación.

Lo anterior se soporta en el cuadro 2, el cual relaciona los valores del ICA con los posibles usos del agua que puede ser destinada.

Cuadro 2. Valores del ICA y relación con los usos

ICA	Uso Público	Recreo	Pesca y vida acuática	Industria Agrícola	Navegación	Transporte desechos tratados
100	Aceptable No requiere de purificación	Aceptable para todo tipo de deporte acuático	Aceptable para todo tipo de organismos	Aceptable No requiere de purificación		
90	Requiere una ligera purificación			Requiere una ligera purificación		
80						
70	Mayor necesidad de tratamiento	Aceptable pero no recomendable	Excepto especies muy sensibles	Sin tratamiento para la industria normal	Aceptable para todo tipo de navegación	Aceptable para todo tipo de transporte de desechos tratados
60			Dudoso para especies sensibles			
50	Dudoso	Dudoso para contacto directo	Solo para organismos muy resistentes	Con tratamiento para la mayor parte de la industria		
40	Inaceptable	Sin contacto con el agua				
30		Muestras obvias de contaminación	Inaceptable	Uso muy restringido	Contaminado	
20		Inaceptable		Inaceptable	Inaceptable	
10						Inaceptable
0						

Fuente: Guzmán y Merino, 1992; Montoya, et al., 1997

➤ Índices de Contaminación - ICO

Los ICO son criterios de evaluación del nivel de contaminación presente en el agua desarrollados en Colombia por Ramírez, A. y Viña, G. 1998, a partir de análisis de

gran cantidad de información fisicoquímica resultante de diferentes estudios limnológicos relacionados con la industria del petróleo.

Los Índices de Contaminación que se tienen en cuenta en este trabajo son: ***El Índice de Contaminación por Materia Orgánica ICOMO*** que se expresa en diferentes variables físicas y químicas, de las cuales se seleccionaron DBO₅, CT y % de saturación de oxígeno, que en su conjunto recogen efectos distintos de contaminación orgánica, y el ***Índice de Contaminación por Sólidos Suspendedos ICOSUS*** que se determina tan solo mediante la concentración de sólidos suspendidos. Desagregando las variables de demanda de oxígeno (DBO₅ y DQO) y amonio, porque ella corresponden con claridad a procesos de contaminación orgánica mientras que los sólidos suspendidos bajo muchas circunstancias podrían deberse a compuestos inorgánicos.

Tabla 4. Rangos de clasificación de la contaminación del agua mediante los índices ICOMO, e ICOSUS

Valor del ICO	Clasificación de la contaminación
0 – 0.2	Muy baja
0.2 – 0.4	Baja
0.4 – 0.6	Media
0.6 – 0.8	Alta
0.8 – 1.0	Muy alta

Fuente: Ramírez, A. y Viña, G. 1998

Nota: Si se requiere mayor información acerca de la metodología empleada para la determinación de los Índices de Calidad ICA e ICOs, se recomienda consultar el documento desarrollado “índices de Calidad” y los archivos adjuntos que sirven de base a esta sustentación, registrados en la carpeta del CD del presente estudio, CD/Marco Teórico/Índices de Calidad.

5.1.3 Objetivos de Calidad del agua por Metodología Mesoca y Modelos de Calidad

Es la determinación de la máxima carga permisible que puede soportar el río, para la conservación de sus ecosistemas. Se realizan con el fin de verificar la capacidad de carga y los niveles de asimilación de una corriente de agua, con el fin de mantener los ciclos de vida de los ecosistemas acuáticos. Los criterios y objetivos de calidad son la base para la formulación de “*estándares de calidad*” ambiental que pueden tener valor oficial y ser directamente insertos en normativas.

Otro significado de los Objetivos de calidad, es que estos son la condición para el establecimiento, de las metas de reducción de cargas contaminantes de DBO₅ y SST, pero además se precisa de un mecanismo que permita identificar de una forma ágil, el impacto de la reducción de dichas cargas en la calidad de los cuerpos de agua. Éstos se pueden determinar a través de la guía Metodológica expedida por el MAVDT, o a través de modelos matemáticos de simple o compleja manipulación, que definen con certeza la cantidad de carga permisible.

➤ **Metodología MESOCA**

Es una Guía Metodológica para el Establecimiento de Objetivos de Calidad de los Cuerpos de Agua en Ausencia de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH, en condiciones de aprovechamiento de la mejor información disponible, diseñada por el MAVDT. Esta Metodología sirve como soporte y lineamiento para establecer Metas Objetivas de Reducción de Cargas de DBO₅ y SST.

La teoría se soporta en pruebas y modificaciones al modelo de Streeter and Phelps, realizadas por Thomas (1948), quien sustentó el análisis en los trabajos de Fair and Geyer (1968). Ellos desarrollaron las curvas conjugadas (monograma), y definieron las variables básicas, que regularmente y para casos más rigurosos, requieren de una completa instrumentación, monitoreo y sistematización, adaptándolas para aquellas situaciones donde se requiera un primer análisis de capacidad de asimilación.

Por medio del monograma de cargas de Thomas, es posible estimar rápidamente la carga de la Demanda Bioquímica de Oxígeno última (DBOu), que puede ser vertida a un río conociendo o fijando un nivel de OD, el cual se desea o se requiere garantizar, en un punto determinado de la corriente.

Nota: Si se requiere mayor información acerca de la Metodología Mesoca realizada por el MAVDT, se recomienda consultar el documento base “Guía para el Establecimiento de Objetivos de Calidad del recurso Hídrico: Metodología Mesoca” registrado en el CD del presente estudio, CD/Marco Teórico/Metodología Mesoca.

5.1.4 Determinación de cargas contaminantes por modelos de calidad

Con el fin de evaluar los planes alternativos de ingeniería para el control y manejo de la calidad del agua, suelen emplearse modelos matemáticos que relacionan: las entradas de aguas residuales con la calidad del agua del cuerpo receptor, los diversos grados de tratamiento, la reubicación de los puntos de descarga de aguas residuales, el

aumento de los flujos mínimos, los sistemas de tratamiento regional versus plantas múltiples, que constituyen algunas de las alternativas específicas cuya influencia sobre la calidad del agua receptora pueden evaluarse mediante la aplicación de los modelos de calidad del agua. Pueden ayudar también, a evaluar el beneficio relativo que se obtiene para la calidad del agua mediante la eliminación de diferentes componentes de los contaminantes⁷.

Modelar la capacidad de carga de un río es un procedimiento clave para tomar decisiones relacionadas con planificación, reglamentación, administración, control y monitoreo de los cuerpos de agua. Existen modelos complejos y cuya implementación es además de útil, son relativamente costosas como el MODELO QUAL2K. Pero también existen modelos simplificados, los cuales si son usados con responsabilidad y mucho criterio, permiten tomar excelentes y efectivas decisiones a costos bajos.

Según Loucks et al. -1982, un modelo de calidad de aguas es la herramienta adecuada para la predicción del comportamiento de la calidad del agua en un río u otro cuerpo de agua. Por lo tanto, corresponderá a un conjunto de ecuaciones matemáticas que definen los procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en un cuerpo de agua. Estas ecuaciones están basadas fundamentalmente en la conservación de la masa y/o energía, de tal forma que existen tres fenómenos: ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema, el transporte y las reacciones en el cuerpo de agua.

➤ *Desarrollo de los modelos de calidad del agua*⁸

En la aplicación de los modelos se identifican cinco fases: desarrollo del modelo, calibración, validación, aplicación del modelo y análisis de sensibilidad.

1- **Desarrollo del modelo:** en la actualidad existen múltiples modelos de diversas aplicaciones. Muchos de ellos son extremadamente simples, mientras que otros son de una gran complejidad. La selección de un modelo para una aplicación específica depende fundamentalmente del alcance del análisis a realizar y del tipo y calidad de la información disponible a obtener. Cabe resaltar que a mayor complejidad del modelo, más es la cantidad y la calidad de la información requerida para su aplicación.

2- **Calibración:** la calibración consiste en aplicar el modelo a un conjunto conocido de datos y analizar los resultados simulados. Luego se deben conciliar los valores

observados con los estimados por el modelo. Esto se realiza ajustando los parámetros del modelo, de modo tal que los valores simulados coincidan con los observados dentro de un margen de error aceptable. Para calibrar un modelo existen diferentes técnicas, tales como ajuste de curvas y métodos numéricos de identificación de parámetros. La calibración debe realizarse hasta que haya una coincidencia de, a lo menos, un 80% entre los valores observados y los simulados; de otra manera el modelo no va a ser confiable al ser utilizado en la etapa de predicción.

3- Validación: una vez calibrado el modelo, éste debe ser aplicado a un segundo conjunto de datos conocidos. El modelo debería ser capaz de reproducir estos valores, de otro modo su validez será dudosa. Las cargas orgánicas de nutrientes afectan de manera considerable las actividades biológicas de una fuente y en consecuencia, los niveles de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua. Los modelos más razonables, son aquellos que más se aproximen a interpretar la relación entre la carga orgánica presente en un cuerpo de agua y su capacidad de autodepuración.

4- Aplicación del modelo: consiste básicamente en la utilización del modelo calibrado y validado en el análisis de los impactos en la calidad del agua de la acción en estudio. Primeramente se aplica el modelo a la situación sin acción y luego a la situación con acción. La diferencia entre ambos resultados representa el impacto de la acción. El modelo también puede utilizarse para analizar el impacto de las medidas mitigantes, o aún para proponerlas en caso que la situación con acción represente una condición ambiental poco satisfactoria.

5- Análisis de sensibilidad: comúnmente se hace necesario evaluar las variaciones que presentan los resultados al alterar algunos parámetros del modelo. El análisis de sensibilidad indica los márgenes dentro de los cuales el modelo es confiable; es decir, establece los valores críticos de los parámetros en donde los valores simulados dejan de corresponder con los reales. Estos valores deben ser informados conjuntamente con los resultados del estudio.

Un modelo relativamente simple es el basado en las ecuaciones de Streeter y Phelps, que determina la capacidad de carga contaminante de un río.

➤ ***Modelo basado en las ecuaciones de Streeter y Phelps***

Este modelo, es uno de los pioneros, usados para los cuerpos fluviales presentado por Streeter y Phelps en 1925. Permite predecir, en el caso de las descargas de material orgánico biodegradable su efecto sobre la concentración de oxígeno disuelto. El cual

considera el río como un reactor de flujo pistón, y establece un balance para el oxígeno disuelto y el material biodegradable, bajo condiciones de estado estacionario. En el caso del balance de oxígeno, se incluye la entrada de oxígeno por transferencia desde el aire, también expresada por un modelo cinético de primer orden⁹.

En versiones posteriores, se toma en cuenta, además, el aporte de oxígeno por vía fotosintética. Por lo tanto la solución analítica del modelo de Streeter y Phelps para una descarga puntual y continua, permite estimar la concentración de oxígeno disuelto a lo largo de un río. Siendo este modelo el mejor adaptado para la modelación de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno, ya que no solo se basa sobre la premisa estadística¹⁰.

El modelo que es aplicable a las corrientes motivo del presente estudio, es uno de los modelos más simples asumiendo que la corriente está bien mezclada en sentido vertical y en la sección de la corriente, y que los principales mecanismos de transporte, advección y dispersión de materiales, son significativos solamente en la dirección principal del flujo, es decir, longitudinal del canal o corriente.

Para los elementos el modelo realiza: un balance hidrológico en términos del flujo; un balance de energía en términos de temperatura; y un balance de materia en términos de concentración de los parámetros relevantes (DBO₅, y OD).

Debido a que el modelo es muy simple, este está limitado a la simulación de periodos de tiempo durante los cuales tanto el flujo de la corriente como las descargas de contaminantes son constantes.

El primer paso para realizar la modelación es dividir la sección de la corriente en estudio en segmentos, los cuales deben tener características hidráulicas uniformes. Cada segmento se subdivide en elementos computacionales de igual longitud, pero cada segmento puede tener diferente número de elementos computacionales; esto permite al usuario ingresar descargas y aprovechamientos en cualquier elemento del segmento. Para definir un segmento lo más importante es determinar qué constituye un cambio significativo en cuanto a los resultados de la simulación.

Una de las consideraciones más importantes para determinar la capacidad asimilativa de contaminantes de un río es su habilidad para mantener una concentración adecuada de oxígeno disuelto. Este modelo, tendrá en cuenta el balance de energía, de oxígeno disuelto y altitud de cada vertimiento, junto con las respectivas correcciones pertinentes, para encontrar el déficit de oxígeno.

Concentración de Saturación de Oxígeno Disuelto: La solubilidad de oxígeno disuelto en agua disminuye conforme aumenta la temperatura y la concentración de sólidos disueltos, y conforme disminuye la presión atmosférica, esta última con la elevación. En el modelo se utilizan ecuaciones de corrección en cuanto a temperatura y altura.

Coefficiente de Reaireación Atmosférica: El proceso por el que el oxígeno disuelto en la corriente se incrementa por el aire de la superficie se conoce como reaireación atmosférica y es la fuente primaria de oxígeno disuelto en el agua. El proceso de reaireación es generalmente una función de la geometría de la corriente y de sus características hidráulicas. Diferentes técnicas y ecuaciones han sido desarrolladas para estimar los coeficientes de reaireación con base en la geometría y las características hidráulicas de la corriente.

El coeficiente de reaireación (K_2) generalmente se expresa como una función de la profundidad de la corriente y su velocidad. El modelo cuenta con cuatro diferentes opciones para estimar o leer los valores de K_2 : Fórmula de Churchill; Ecuación de O'Connor Dobbins, Ecuación de Owens – Gibbs, y la Ecuación de Texas.

Coefficientes dependientes de la Temperatura: Muchas de las reacciones que determinan la calidad del agua en sistemas naturales están en función de la temperatura; esta dependencia se considera generalmente variando los diferentes coeficientes de reacción.

Los valores de temperatura calculados en el modelo se usan para corregir los coeficientes de reacción de los diferentes parámetros. Estos coeficientes se dan a 20°C y son entonces corregidos a temperaturas en las condiciones reales tomadas en campo.

Nota: Si se requiere mayor información acerca del procedimiento, ecuaciones y cálculos del modelo de Streeter y Phelps, se recomienda consultar los documentos base “” registrados en el CD del presente estudio, CD/Marco Teórico/Modelo Streeter y Phelps.

5.2 MARCO LEGAL

Para el desarrollo de este trabajo se manejará la siguiente normatividad:

- **Decreto 1594 de 1984**; en el cual se dictan los parámetros de uso y calidad, reportados en el Capítulo III “de la Destinación Genérica de las Aguas Superficiales, Subterráneas, Marítimas, Estuarias y Servidas” y en el Capítulo IV “de los Criterios de Calidad para Destinación del Recurso”.
- **Decreto 3100 de Octubre de 2003**; modificado parcialmente por el decreto 3440 del 21 de Octubre de 2004 el Gobierno Nacional reglamentó las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y adoptó otras determinaciones en el artículo 7, el cual establece que la autoridad ambiental competente establecerá cada cinco años, una meta global de reducción de carga contaminante para el cuerpo agua o tramo del mismo de conformidad. Esta meta será definida para cada uno de los parámetros objeto del cobro de la tasa y se expresará como el cobro total de contaminante durante un año, vertida por las fuentes presentes y futuras.
- **Resolución 1433 de Diciembre de 2004**, se reglamentó el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003 estableciéndose en su artículo 1º que los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV, se constituyen como el conjunto de programas, proyectos y actividades, con sus respectivos cronogramas e inversiones necesarias para avanzar en el saneamiento y tratamiento de los vertimientos, incluyendo la recolección, transporte, tratamiento, y disposición final de las aguas residuales descargadas al sistema público de alcantarillado, tanto sanitario como pluvial, los cuales deberán estar articulados con los objetivos y las metas de calidad y uso que defina la autoridad competente para la corriente, tramo o cuerpo de agua. Que igualmente se establece en dicho artículo que el plan debe ser aprobado por la autoridad ambiental competente.
- **Resolución 2145 de Diciembre de 2005**, modificó parcialmente la Resolución 1433 de 2004 en el sentido de que la información de que trata el artículo 4º de la Resolución 1433 de 2004 deberá ser presentada ante la autoridad ambiental competente por las personas prestadoras del servicio público de alcantarillado y sus actividades complementarias, en un plazo no mayor a cuatro (4) meses contados a partir de la publicación del acto administrativo mediante el cual la autoridad ambiental competente defina los objetivos de calidad de la corriente, tramo o cuerpo de agua receptor.

Nota: la normatividad anteriormente enunciada y manejada en este documento, se encuentra registrada en el CD, como “Normatividad”. CD/Normatividad.

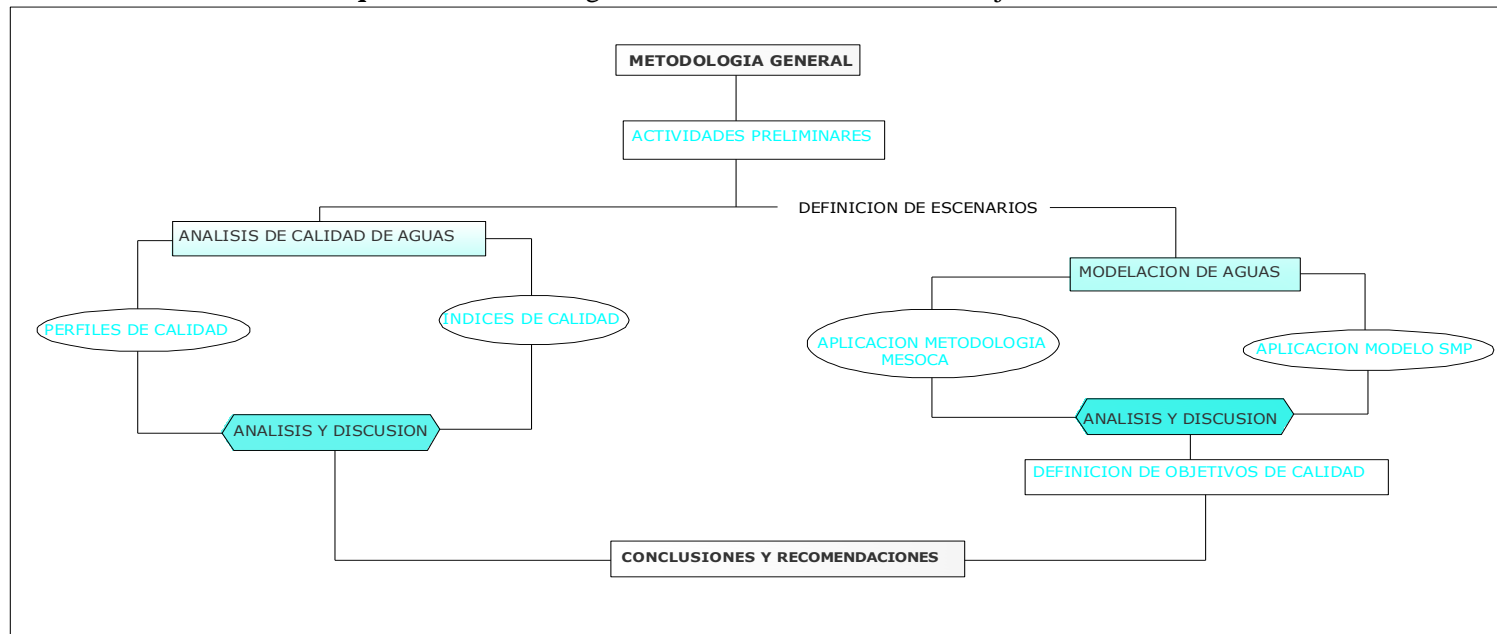
6 METODOLOGÍA

Para el desarrollo este trabajo se hizo necesario los conocimientos de personas competentes como: los de un profesional especializado en la gestión integral del agua y administración del recurso hídrico, funcionarios que manejen el Sistema de Información Geográfica – SIG. A continuación se describe las metodologías general y específica presentadas en el esquema 1 y 2 respectivamente, llevadas a cabo para el desarrollo de este trabajo.

6.1 METODOLOGÍA GENERAL

En este esquema se presenta las fases principales en el cual se basa este trabajo.

Esquema 2. Metodología General en la Definición de Objetivos de Calidad

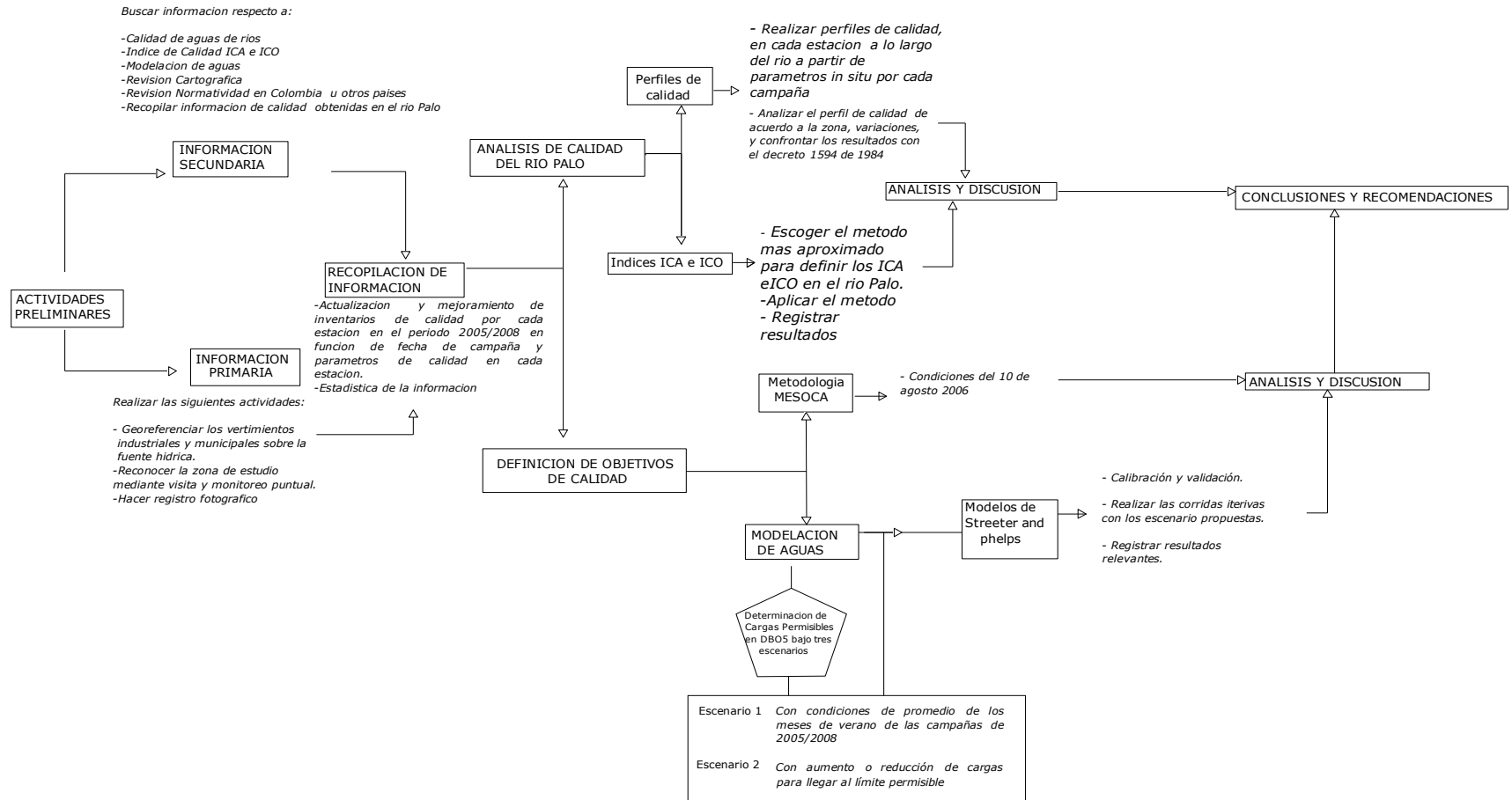


Fuente: Este estudio

6.2 METODOLOGÍA ESPECÍFICA

A continuación se presenta los pasos más destacados y detallados para llevar a cabo el desarrollo de cada fase del trabajo.

Esquema 3. Metodología Específica en las fases de la Definición de Objetivos de Calidad.



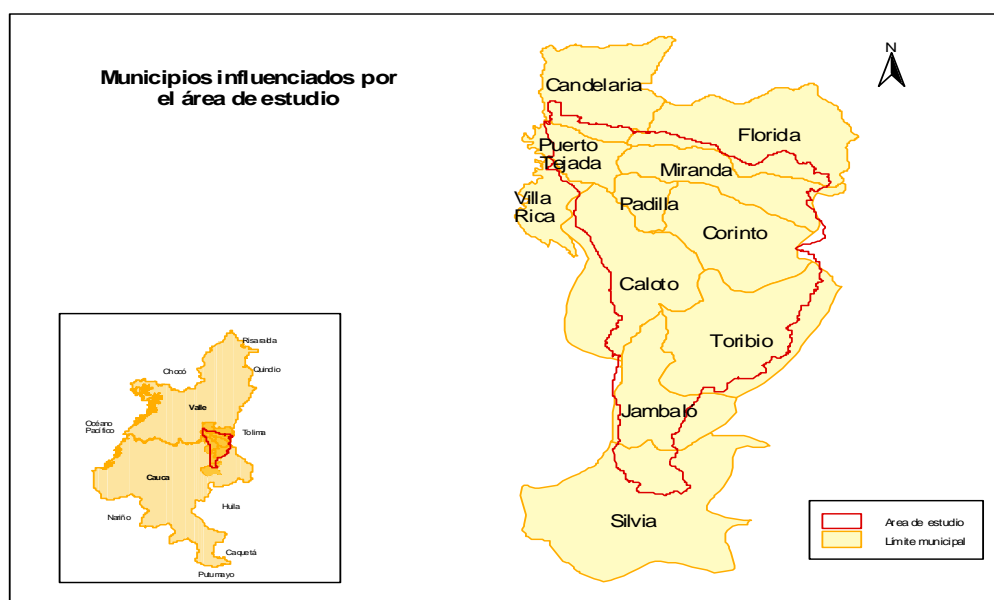
Fuente: Este estudio

7 CONTEXTUALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

Este estudio, abarca la Cuenca Palo ubicada al nor-oriente del Departamento del Cauca, dónde el río más importante es el Río Palo siendo uno de los más caudalosos y el que recibe la mayoría de vertimientos industriales y domésticos de la población, adentrándose en el valle geográfico del Río Cauca tras recorrer 71 kilómetros desde su nacimiento y entregando aproximadamente 36.000 L/s como afluente principal del Río Cauca¹¹.

Esta cuenca comprende una extensión de aproximadamente 150.000 Has, conformada por los siguientes municipios: Caloto, Corinto, Jambaló, Miranda, Padilla, Puerto Tejada, Silvia, Toribío y Villarrica, los que a su vez comprenden 8 resguardos: Tacueyó, Toribío, San Francisco, Jambaló, Huellas, Pitayó, Toez, y territorios indígenas en los municipios de Corinto, los cuales se ilustran en el siguiente mapa.

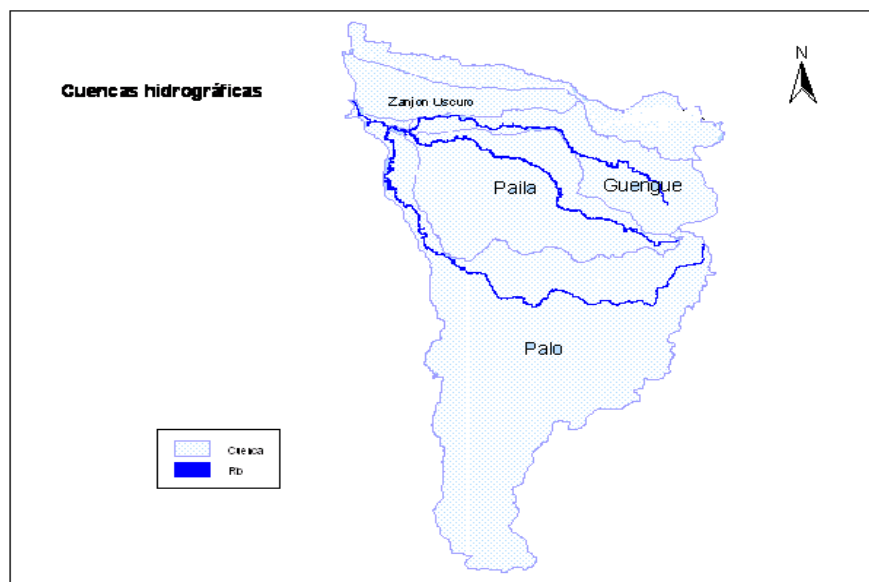
Mapa 2. Municipios que conforman la cuenca palo



Fuente: Convenio CRC – UNICAUCA, 2008

La Cuenca Palo, hace parte de la zona de páramo y amortiguamiento del parque del Nevado del Huila, uno de los de mayor importancia del país y posee cuencas hidrográficas de gran impacto en la región, éstas cuencas son catalogadas como **corredores de vida**, por dónde transcurre el ir y venir de la vida de la comunidad desde las zonas de páramo hasta la zonas planas de clima caliente en torno al agua como elemento vital de la cultura y las principales corrientes naturales de la cuenca se representan en el mapa 3.

Mapa 3. Cuenca Hidrográfica del Río Palo



Fuente: Convenio CRC – UNICAUCA, 2008

7.1 RIO PALO

Siendo este río el de interés para este estudio y al cual se le definirán los objetivos de calidad, a continuación se hace una descripción detallada del río, teniendo en cuenta campañas de monitoreos, estaciones de calidad y usuarios más importantes.

7.1.1 Descripción General del Río Palo

El Río Palo, es el principal río de la cuenca Palo, nace en el Páramo de Santo Domingo en el flanco occidental de la cordillera Central al nororiente del Departamento del Cauca y desemboca por la margen derecha del río Cauca en el sector llamado Bocas del Palo a aproximadamente 100 km aguas abajo de la represa de Salvajina¹². Los municipios de influencia del río Palo son: Toribio, Caloto, Villa Rica, y Puerto Tejada¹³

En la parte baja de la cuenca, se encuentran situados ingenios azucareros de gran producción para el país, industrias de procesamiento de alimentos y bebidas, fábricas de producción de papel y un sin número de factorías livianas instaladas en los Parques Industriales y Comerciales del Cauca (PICC), beneficiadas por la Ley Páez o La Ley 218 de 1994. En esta zona también se encuentran cultivos semipermanentes de buen nivel tecnológico, donde la principal actividad económica y productora es la caña de azúcar, seguido el maíz, la soya y el sorgo.

En la parte media y alta de la cuenca, se caracteriza por ser una zona agrícola, no tan tecnificada como la descrita anteriormente, basada en la aplicación de prácticas culturales tradicionales utilizadas por los grupos asentados en esta zona.

Según INGESAM -2002, en la parte alta, el río presenta aguas de muy buena calidad utilizadas para diferentes usos como el abastecimiento para acueductos, generación de energía, riego agrícola, entre otros. Sin embargo, al llegar a la zona media y baja, sus aguas se deterioran progresivamente al recibir vertimientos del sector industrial, aguas residuales de cabeceras municipales y de asentamientos humanos, además desechos líquidos provenientes de actividades agropecuarias

Por lo anterior, ha dado lugar a que en el área de estudio, en lo correspondiente al uso del suelo, coexistan sistemas complejos de producción comercial de alta productividad y rentabilidad, tanto en el sector agropecuario, manufacturero como en el industrial que han respondido a modelo de desarrollo industrializados vigente, con sistemas de producción orientados básicamente a la subsistencia, mediante la aplicación de prácticas culturales tradicionales utilizadas por grupos humanos.

7.1.2 Localización de Estaciones de Monitoreo

La Corporación ha venido efectuando campañas de monitoreos de calidad sobre el río Palo, dentro de su Programa anual de Monitoreo de Fuentes Hídricas, en el cual se han establecido estaciones de monitoreo, con el fin de obtener información en tiempo y en espacio, sobre calidad del recurso hídrico en un punto determinado.

La tabla 5, presenta la ubicación geográfica de las estaciones de calidad en coordenadas planas determinadas en trabajo de campo y en estudios realizados por la CRC sobre el río.

Tabla 5. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo, en el área de estudio en el río Palo.

N° ESTACION	ESTACIÓN	COORDENADAS PLANAS		ALTURA msnm
		NORTE	ESTE	
I	Bocatoma Cedelca	829986	1081353	1086.167
II	Antes PTAR Guachene	837387	1076280	1015.271
III	Antes Bocatoma Propal	843586	1073934	991.718
IV	Antes Vertimiento Propal	845416	1074101	1025.85
V	Puente PICC	845869	1074088	995.804
VI	Barrio el Triunfo	847904	1073542	989.075
VII	Rio Paila antes rio Palo	848477	1074172	986.912
VIII	Rio Palo (puente Puerto Tejada)	848665	1073196	998.688
IX	Desembocadura rio Cauca	851847	1069109	980.183

Fuente: Este Estudio

7.1.3 Campañas Realizadas

Durante los años 2005 a 2008, la corporación ha realizado 12 campañas de monitoreo sobre las estaciones de calidad de agua, identificadas en la tabla 6.

Tabla 6. Número y fecha de realización de campañas de monitoreo del río Palo.

CAMPAÑA N°	FECHA
1 ^a	Marzo 30 de 2005
2 ^a	Junio 23 de 2005
3 ^a	Mayo 31 de 2006
4	Julio 17 de 2006
5 ^a	Agosto 10 de 2006
6 ^a	Octubre 30 de 2006
7 ^a	Diciembre 05 de 2006
8 ^a	Septiembre 17 de 2007
9 ^a	Marzo 05 de 2008
10 ^a	Mayo 22 de 2008
11	Agosto 06 de 2008
12	Octubre 28 de 2008

Fuente: Este Estudio

7.1.4 Parámetros Analizados

Los parámetros analizados en cada campaña del río, están especificados en la tabla 4 de este estudio. Las actualizaciones, modificaciones y resultados de estadísticas de cada parámetro de los inventarios, a lo largo del tiempo se presentan en el libro de Excel “Información de Análisis de calidad” Microsoft office del CD.

7.1.5 Cargas Contaminantes que Recibe el Río Palo

El Río Palo en su recorrido tiene gran cantidad de usuarios, que se benefician de sus aguas ya sea para hacer uso directo, tales como captaciones o derivaciones, como para dilución de residuos líquidos (vertimientos industriales, domésticos y municipales), estos usuarios fueron georreferenciados identificados en estudios de la CRC y se presentan en la tabla 7 en coordenadas planas.

Tabla 7. Ubicación de: descargas Municipales, industriales y naturales sobre el Río Palo.

TRAMO	USUARIO	UBICACIÓN		
		ESTE	NORTE	ALTITUD
1- Estación #1 Bocatoma Cedelca hasta Desembocadura Quebrada la Trampa. Longitud 5 Km	Desembocadura Quebrada La Trampa			
2- Desembocadura Quebrada	Derivación acequia la Cabaña	1075173,13	837847,857	1004,696

TRAMO	USUARIO	UBICACIÓN		
		ESTE	NORTE	ALTITUD
La Trampa hasta Descarga PTAR Guachené. Longitud 8Km	Descarga PTAR Guachené	1075374,15	837875,86	1010,464
3- Descarga PTAR Guachené hasta Captación Bocatoma Propal II. Longitud 12Km	Captación Bocatoma Propal			
	Descarga Ingenio la Cabaña (efluente y Reservorio)	1074177,89	843519,475	1047,474
	Descarga Colbesa y Alpina	1074063,13	845370,512	995,323
	Descarga Propal	1073734,92	845712,486	1001,331
	Descarga ARI Etapa I	1074003,7	845482,272	990,5
4- Captación Bocatoma Propal II hasta Confluencia Río Paila. Longitud 6Km.	Descarga ARD Etapa I	1073994,45	845457,691	990,517
	Descarga ARI Etapa II	1073177	846086,852	996,525
	Descarga ARD Etapa II			
	Descarga Familia y Sancela	1073617,35	846166,86	990,276
	Descarga ARD Etapa III			
	Descarga ARD Etapa IV	1073133,55	846139,751	1017,914
	Desembocadura Río Paila			
5- Desembocadura. Río Paila hasta Desembocadura Río Palo al Río Cauca	Descarga Matadero Municipal	1073237,09	848652,385	983,547
	Descarga Gallina la Campeona	1070927,47	849821,145	995,083
	Río Palo Callejón la Gaviota	1071174,42	849188,623	979,942

Fuente: Este Estudio

De los anteriores usuarios, y para una mejor interpretación de ellos, se han dividido en sector Municipal, Sector Mataderos Municipales, Sector Industrial, Afluentes naturales y fuentes dispersas, los cuales se describen a continuación:

➤ *Sector Municipal*

Los vertimientos municipales que drenan directamente sobre al río Palo determinados en este estudio, son: descarga PTAR-D Guachené, descarga del Barrio el Triunfo y descargas Sur, en el Municipio de Puerto Tejada, dónde la primera NO cumple con las remociones del 80%, exigidas en el Decreto 1594 de 1984 según los informes de monitoreo y las otras descargas (Barrio el Triunfo y Sur de Pto Tejada), que se hace a través de colectores municipales sin ningún tratamiento previo.

A continuación, en la tabla 8 se reportan el promedio de las cargas contaminantes vertidas, encontradas en campañas de monitoreo de la PTAR-D.

Tabla 8. Cargas contaminantes vertidas de la PTAR -D guachené

PTARD GUACHENÉ					
Estadísticas	Q (L/s)	DBO Kg/d	DQO Kg/d	SST Kg/d	G Y A Kg/d
Min	37,0	32,3	160,0	64,0	1,6
Prom	42,8	97,2	584,9	132,6	64,1
Máx	48,5	162,2	1009,8	201,1	126,5

Fuente: Adaptado CRC 2006-2008

En la tabla 9, se reportan las cargas contaminantes del Barrio el triunfo, las del sector sur de puerto Tejada, con datos de aforo y caracterización de parámetros del 10 de agosto de 2006. Y se presenta el total de cargas de este sector sumando, los las cargas contaminantes por la PTAR-D Guachené descrita anteriormente, junto con las del Barrio el Triunfo y las de Sur de Puerto Tejada.

Tabla 9. Cargas contaminantes vertidas del Barrio el Triunfo

DESCRIPCIÓN	Q (L/s)	DBO Kg/d	DQO Kg/d	SST Kg/d
Barrio el triunfo	50,0	1512,0	2592,0	864,0
Sur de Pto Tjada	42,0	5,0		
TOTAL	<u>134,8</u>	<u>1614,2</u>	<u>3176,9</u>	<u>996,6</u>

Fuente: Adaptado CRC 2006-2008

➤ Sector Mataderos Municipales

El Matadero Municipal de Puerto Tejada, es el único matadero georreferenciado que vierte sus aguas al Palo. Según información de registros y expedientes, este no está en debido cumplimiento con normatividad de Salud Pública porque está dentro de la zona urbana, ni tampoco con Normatividad Ambiental, debido a que sus aguas se vierten directamente a la fuente, sin ningún tratamiento previo.

El dato que se registra, es obtenido a partir de las cargas contaminantes de mataderos del año 2006 por el programa de Tasa Retributivas de la CRC y se reporta en la tabla 10.

Tabla 10. Cargas contaminantes del Matadero Municipal de Puerto Tejada al Río Palo-2006.

MATADERO	SACRIFICIOS				CARGAS GENERADAS			
	Q (L/s)	D.B.O. (Kg/día)	D.Q.O (Kg/día)	S.S.T. (Kg/día)				
PUERTO TEJADA	1,0	197	216	173				

Fuente: Adaptado CRC-2006

➤ *Sector Industrial*

En el norte del Departamento, se encuentra la zona industrial, zona en la cual laboran más de 30 industrias, que en sus actividades es inevitable generar aguas residuales domésticas e industriales, y las cuales directa o indirectamente son vertidas sobre fuentes naturales.

La mayoría de estas industrias ubicadas en la parte baja de la cuenca Palo, cuentan con sistemas de tratamiento de efluentes industriales y/o domésticos, y según el Informe Técnico Análisis de monitoreos de vertimientos -2008 presentado por la Subdirección de Defensa y Patrimonio de la Corporación, la mayoría de ellas NO cumplen con las eficiencias mínimas exigidas en el decreto 1594 de 1984.

En total, las industrias formales a las cuales se les realiza vigilancia y control en la zona norte del Departamento, incluidas en la zona de estudio son 15, de las cuales cinco (5) vierten directamente al río Palo con previo tratamiento y las restantes lo hacen a través de los PICC (Parques industriales y Comerciales del Cauca) distribuidos en etapas I, II, III y IV.

Teniendo en cuenta los registros desde el año 2004 hasta el 2008, en la tabla 11, se resumen los promedios de cargas contaminantes y caudales, que cada empresa que vierte sobre el río Palo. Los registros de cargas son reportadas en el Libro de Excel “Porcentajes de Cargas vertidas al Palo” Microsoft office en el CD.

Tabla 11. Promedios de cargas contaminantes vertidas del sector industrial al Río Palo, años 2004 - 2008

DESCRIPCIÓN	EMPRESA	ESTADISTICA	PARAMETROS ANALIZADOS				
			Q (L/s)	DBO Kg/d	DQO Kg/d	SST Kgd	G Y A Kg/d
Vierte directamente al Río Palo	PROPAL	Min	380,9	32,6	89,0	280,0	2,0
		Max	544,9	3066,0	17553,0	7532,1	588,4
		Prom	431,4	2069,3	12683,4	4082,6	269,6
	COLBESA Y ALPINA	Min	3,1	5,1	11,3	3,0	0,0
		Max	13,7	563,4	587,2	150,6	138,8
		Prom	10,8	115,1	142,4	47,6	25,9
	GALLINA LA CAMPEONA	Min	1,3	5,0	21,9	8,0	1,2
		Max	1,3	5,0	21,9	8,0	1,2
		Prom	1,3	5,0	21,9	8,0	1,2
	FAMILIA Y SANCELA	Min	0,1	0,2	0,9	0,0	0,0
		Max	0,5	3,6	6,8	2,2	1,0
		Prom	0,2	1,1	3,0	0,5	0,3
	INGENIO LA	Min	156,7	8682,8	28677,4	2635,4	4735,8

DESCRIPCIÓN	EMPRESA	ESTADISTICA	PARAMETROS ANALIZADOS				
			Q (L/s)	DBO Kg/d	DQO Kg/d	SST Kgd	G Y A Kg/d
	CABAÑA	Max	6,1	13,7	26,5	4,3	0,0
		Prom	71,5	3117,9	6478,3	678,7	366,5
PICC I ARI	PRODISPEL	Min	0,2	19,0	26,7	1,6	0,3
	OMNILIFE	Max	13,5	1040,3	1894,6	32,5	57,3
	Prom	5,4	251,2	457,8	14,3	13,6	
PICC I ARD	PRODISPEL	Min	0,2	0,5	1,1	0,9	0,3
	OMNILIFE	Max	1,8	8,1	17,3	7,5	9,3
	Prom	0,9	4,7	7,4	2,9	2,0	
PICC II ARI	CIA INTERNACIONAL DE ALIMENTOS	Min	0,9	8,9	14,6	1,1	0,6
	PERFICOL	Max	1,8	10,9	35,7	14,0	1,1
	RICA RONDO						
	INDUCOLSA	Prom	1,2	10,1	22,6	5,4	0,8
PICC II ARD	CIA INTERNACIONAL DE ALIMENTOS	Min	0,9	8,9	14,6	1,1	0,6
	PERFICOL	Max	1,2	10,1	22,6	5,4	0,8
	RICA RONDO						
	INDUCOLSA	Prom	1,1	11,5	23,0	6,3	0,8
PICC III ARI	ICN (YUPPI)						
	IMPRESIONES PERIÓDICAS	Min	1,4	0,7	2,5	0,7	0,8
	METAL SUR	Max	2,6	12,5	22,0	4,9	14,9
Prom	2,0	4,7	10,1	3,1	6,2		
PICC III ARD	IMPRESIONES PERIÓDICAS	Min	0,3	0,2	0,5	0,1	0,1
	METAL SUR	Max	0,7	0,8	2,6	1,0	0,9
	Prom	0,4	0,4	1,5	0,6	0,5	
PICC I ARD	ACUA PAEZ	Min	0,6	0,7	1,4	0,0	0,2
	Max	13,4	746,4	1400,2	938,5	260,4	
	Prom	4,0	187,5	352,2	234,9	65,9	
TOTAL DE CARGAS CONTAMINANTES			<u>534,5</u>	<u>5983,1</u>	<u>20492,4</u>	<u>5124,1</u>	<u>794,9</u>

Fuente: Este Estudio

➤ *Afluentes Naturales*

Son seis (6) subsistemas hidrológicos asociados al río Palo, la mayoría se describen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Descripción de los subsistemas hidrológicos de la subcuenca del Río Palo

Sistema Hidrológico	Subsistema/cuenco de agua asociado	Descripción
RIO PALO	Río Santo Domingo	Es el primer sistema del cual se forma el Río Palo, su nacimiento se da a 3800 m.s.n.m., luego el río recibe el nombre de <i>Río Tacueyo</i> , debido a que recorre toda la cabecera municipal ubicado en el Mpio de Toribio
	Río La Isabelilla	Nace en la cota 3700 m.s.n.m, recorriendo grandes distancias del Mpio de Toribío y pasando por diferentes asentamientos, este sistema es destinado para diferentes usos, como pesca, doméstico, agricultura, entre otros, y por lo tanto recibe los residuos líquidos dichas actividades.
	Río Tominio	Nace en la cota 4100 m.s.n.m en límites con el Mpio de Corinto y Toribío, dista de 5 Km hasta desembocar sobre el río palo, recorre pocos asentamientos humanos, es de buena calidad el agua.
	Río Jambaló	Localizado en el Mpio del mismo Nombre, a una altura de 2700 m.s.n.m., y desemboca sobre el Río Palo, recorre todo el Mpio de Jambaló y parte del Mpio de Toribío, sus aguas son destinadas para diferentes usos, se abastecen diferentes acueductos veredales. La calidad del agua se ve afectada, por factores de riego, deficiente manejo de los residuos sólidos y líquidos del municipio.
	Río La Paíla	Nace en el Mpio de Corinto y desemboca sobre el Río Palo en el Mpio de Puerto Tejada, recibe vertimientos urbanos y de actividades agrícolas, en este sistema la corporación ha fijado una estación de calidad, la cual evidencia que ayuda a la recuperación en los niveles de oxígeno del río receptor, es de buena calidad, aunque el deficiente manejo de los residuos sólidos y líquidos del Mpio y de los habitantes están siendo alteradas de forma considerable.

Fuente: Modelo adaptado de Objetivos de Calidad microcuenca Río Apartadó

La tabla 12, presenta las cargas aportadas por los ríos de mayor influencia sobre la subcuenca Palo, en el sector de interés, tomados a partir de la campaña de monitoreo del 10 de agosto del 2006.

Tabla 12. Cargas contaminantes de fuentes naturales en el Río Palo, 10 de agosto 2006

DESCRIPCIÓN	Q (Lps)	DBO	DQO	SST
Quebrada la trampa	6000,0	570,2	1555,20	1762,56
Río Paíla	2217,0	287,3	574,65	32754,84
TOTAL	8217,0	857,5	2129,85	34517,40

Fuente: Adaptado CRC 2006-2008

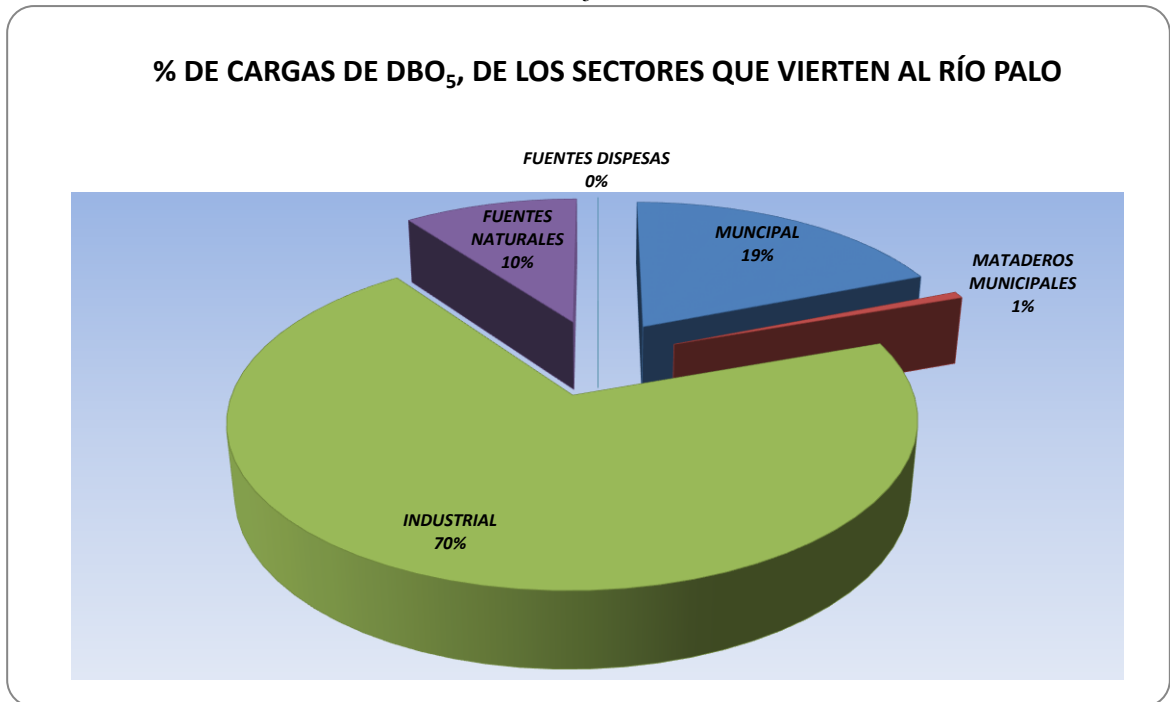
➤ **Fuentes Dispersas**

Debido a la dificultad que estas representan para conocer con certeza la proveniencia y la cantidad de cargas que aporta y a las limitaciones de los modelos utilizados, para este estudio no serán tenidas en cuenta para los análisis y conclusiones del mismo.

7.1.6 Análisis de los sectores que aportan cargas contaminantes al río palo

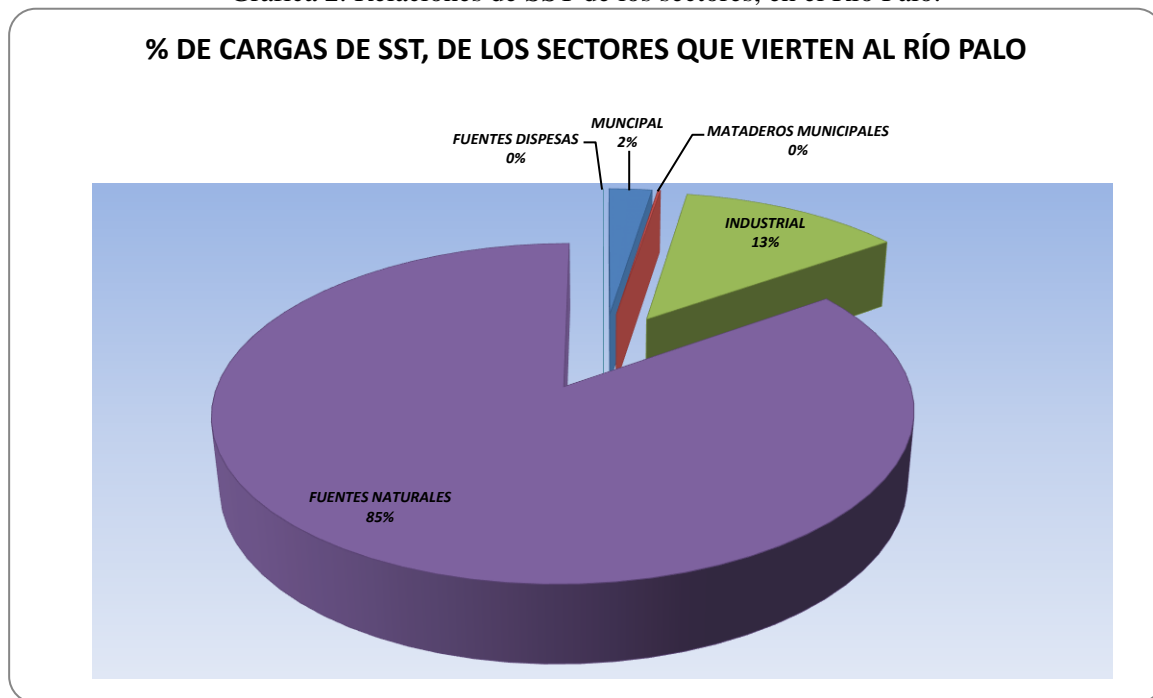
Retomando, los sectores anteriormente estudiados, las siguientes gráficas, muestran la relación de los tributarios del río palo, en DBO₅ y SST con relación a los sectores estudiados.

Gráfica 1. Relaciones de DBO₅ de los sectores en el Río Palo.



Fuente: Este Estudio

Gráfica 2. Relaciones de SST de los sectores, en el Río Palo.



Fuente: Este Estudio

Más del 60% de las industrias del Departamento del Cauca se encuentra asentadas en la zona norte, generando algunos beneficios a la región pero con un alto costo ambiental, en cuanto a contaminación de las aguas de las fuentes superficiales. La incorporación de aguas residuales de los diferentes sectores analizados al río Palo, sin duda el sector industrial tiene una mayor participación en la incorporación de materia orgánica figurando con un 70% como se puede mostrar en la gráfica 1, considerando que las industrias que más aportan a estos niveles son el Ingenio azucarero la Cabaña y la de celulosa y papel -Propal, estas cargas pueden ser o no degradadas por el río, provocando afectación sobre los ecosistemas y alteraciones en las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas. Otro sector que aporta también es el sector Municipal con un 19%, a través de las descargas municipales y domésticas como la PTARD Guachené, y el matadero Municipal de puerto Tejada en menor proporción, pero con la misma incidencia sobre las aguas.

Aunque la cuantificación de la contaminación por fuentes naturales no se determinan de manera precisa en este estudio, la mayoría del contenido de los sólidos suspendidos en el río se generan gracias a ellas, representando un 85% según la gráfica 2, esto indica que por medio de las fuentes naturales se hacen descargas municipales o de materiales sólidos de construcción que pueden llegar con mayor turbulencia ocasionando arrastre de materiales del río que favorecen el incremento significativo de este parámetro.

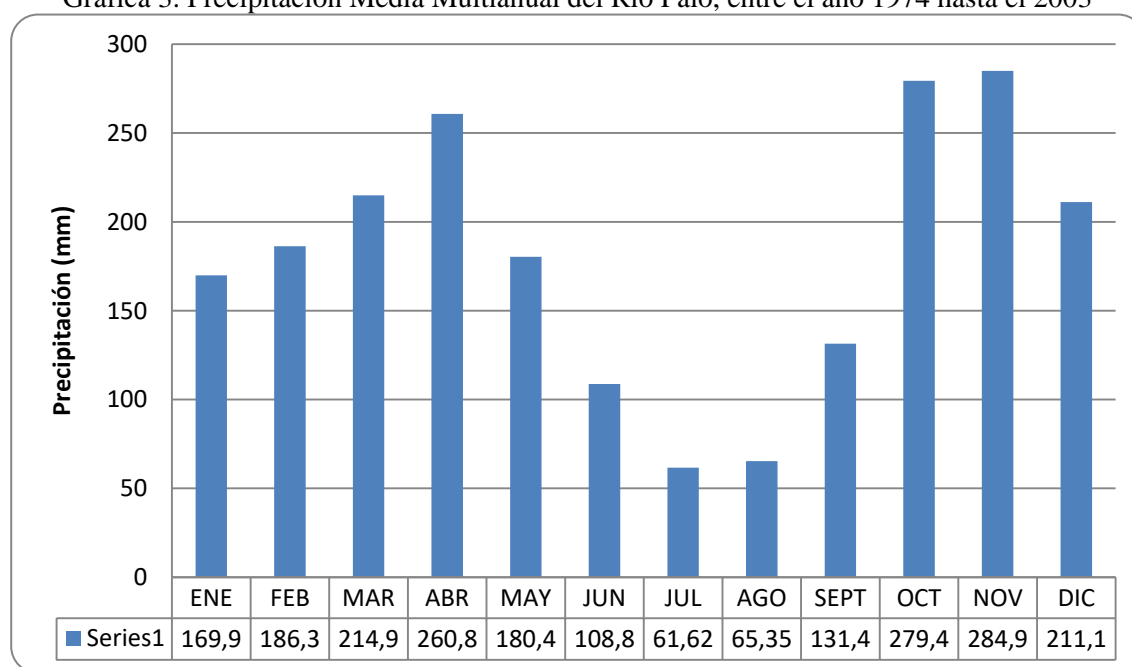
8 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO PALO

En esta etapa del trabajo, se analizarán los perfiles de calidad de cada parámetro tomados en las campañas de monitoreo presentando un breve análisis de cada uno. También se dan los resultados de los índices de calidad ICA y los de contaminación ICO que mejor se ajusten a los datos obtenidos, finalmente se presentan el análisis de ellos.

8.1 PERFILES DE CALIDAD Y ANÁLISIS DE CADA PARÁMETRO

A continuación, se presentan los perfiles de calidad de las 12 campañas de monitoreo realizadas desde el año 2005 hasta el 2008, por parte de la subdirección de Gestión Ambiental, evaluando cada parámetro de acuerdo al decreto 1594 de 1984 y criterios de normatividad estándar utilizados en algunos países. Además se correlacionan con los valores de las precipitaciones medias mensuales multianuales del río Palo, serie comprendida entre 1974 y 2003, presentados en la gráfica 3.

Gráfica 3. Precipitación Media Multianual del Río Palo, entre el año 1974 hasta el 2003



Fuente: Universidad del Cauca - 2009

De la grafica anterior, se deduce que la época de estiaje sobre la cuenca palo se presenta en los meses de Julio y agosto, la de invierno en los meses de Marzo, Abril, Octubre, Noviembre y Diciembre, mientras los demás meses Enero, Febrero, Mayo y Junio son los de transición.

Las gráficas representan las variaciones de los parámetros en cada una de las estaciones en función del tiempo, donde el eje “X” indica las estaciones a lo largo del río, desde la parte alta hasta la parte baja definidas en la tabla 5, el eje “Y” indica las unidades del parámetro analizado.

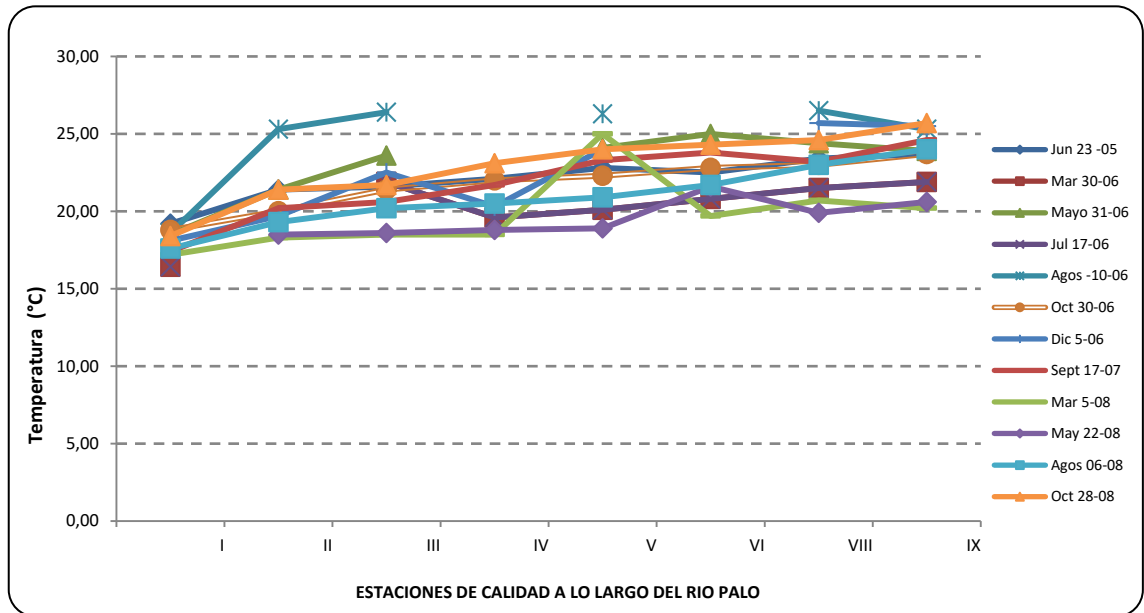
Para efectos de evaluar únicamente las condiciones del río Palo, no se tendrá en cuenta la estación VII, porque esta evalúa únicamente las condiciones del río Paila, aclaración que evitará interpretaciones erróneas en el análisis.

8.1.1 Grupo de parámetros Físico-Químicos

Temperatura

De la gráfica 4, se deduce que en la primera estación los valores de temperatura son inferiores a 20°C, mientras que al final del recorrido, en la mayoría de las campañas los valores llegan hasta los 25°C, este aumento de temperatura se puede dar de forma natural debido a la altitud y las épocas climáticas, se puede dar por vegetación menos densa y espesa que hace que lleguen con más frecuencia e incidencia los rayos solares, por mayor ancho y menor profundidad del río lo que representa ganancia en grados de sus aguas; descargas con temperaturas altas sobre la fuente hídrica, como también en el momento de toma de muestra debido a que la radiación solar se hace intensa a determinadas horas. Para este parámetro NO se encuentran restricciones para ningún uso genérico según los criterios definidos en el Decreto 1594 de 1984 y la Metodología Estadística para la Medición de la Calidad de los Recursos Hídricos en los Países de la Comunidad Andina.

Gráfica 4. Variación de Temperatura a lo largo del río.

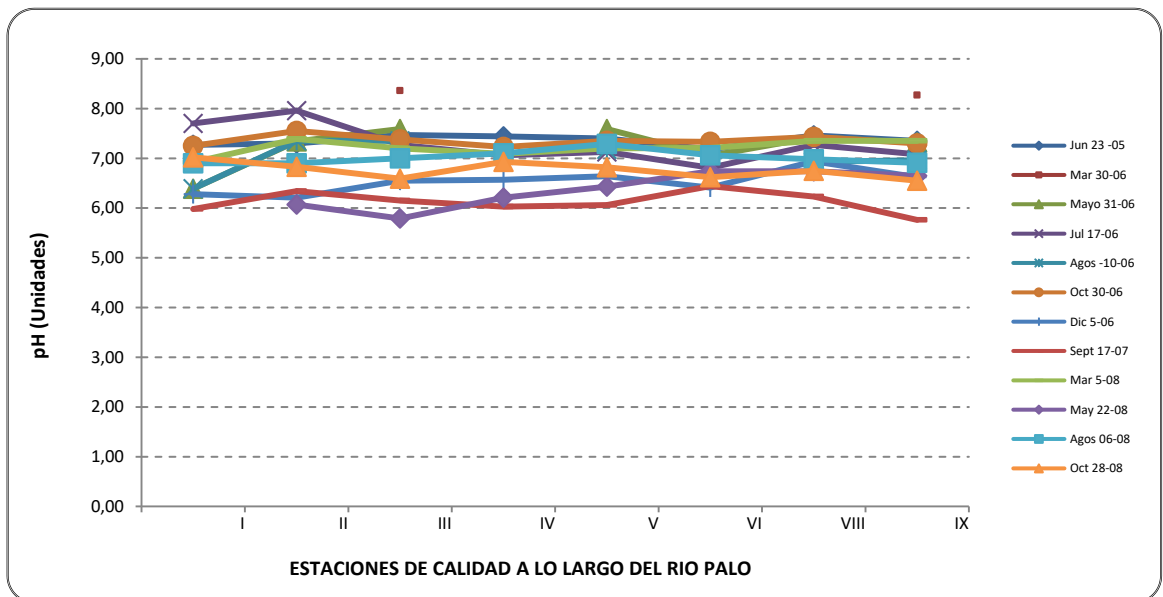


Fuente: Este Estudio

Este parámetro oscila alrededor de 21 °C, encontrando el registro más bajo de 16,42 °C y el más alto de 25.80 °C, con una desviación estándar de 1,56.

Potencial de Hidrógeno - pH

Gráfica 5. Variación del pH a lo largo del río.



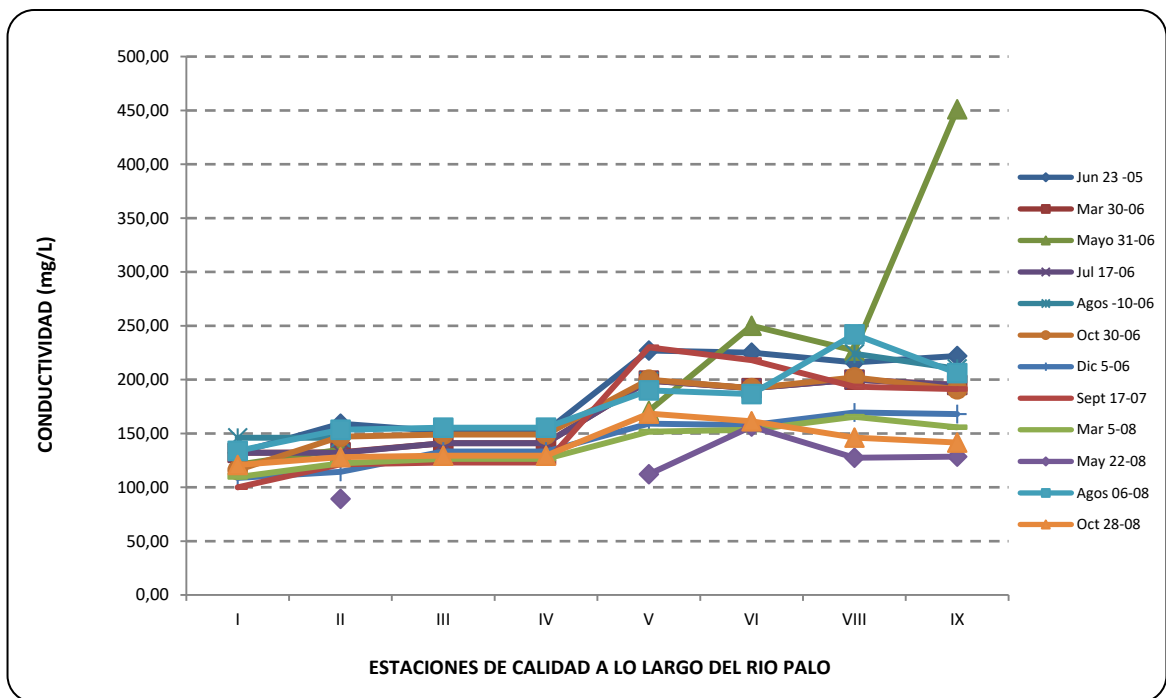
Fuente: Este Estudio

De acuerdo a la gráfica 5, se observa que en la mayoría de las campañas no se presentan fluctuaciones considerables de pH, encontrando una tendencia homogénea en cada una de las series, este parámetro se encuentra en rangos normales de un río, a excepción del mes de Marzo de 2006 y del mes de septiembre del 2007, en los que se reportan valores máximos y mínimos respectivamente, que puede ser debido a una situación atípica o anormal de ese día, errores instrumentales y/o errores humanos por la manipulación de los elementos.

Este parámetro oscila alrededor de 6,93 Unid y de manera general está dentro de los niveles de tolerancia de las especies acuática (pH entre 5 y 9) y cumplen con el criterio del Decreto 1594 de 1984 (rango igual al anterior), y para el consumo humano y doméstico.

Conductividad

A lo largo del Río Palo, la presencia de iones es de forma ascendente, conforme a la gráfica 6. En ella se observa un aumento en el tramo de las estaciones IV y V, lo que puede deberse a las descargas industriales encontradas en esta zona, representando una afectación en cuanto la productividad de los ecosistemas del río. Después se observa un ligero descenso debido al efecto *dilución* por la confluencia del río Paila en la estación VIII, lo que puede volver a crear condiciones favorables para la biota acuática.



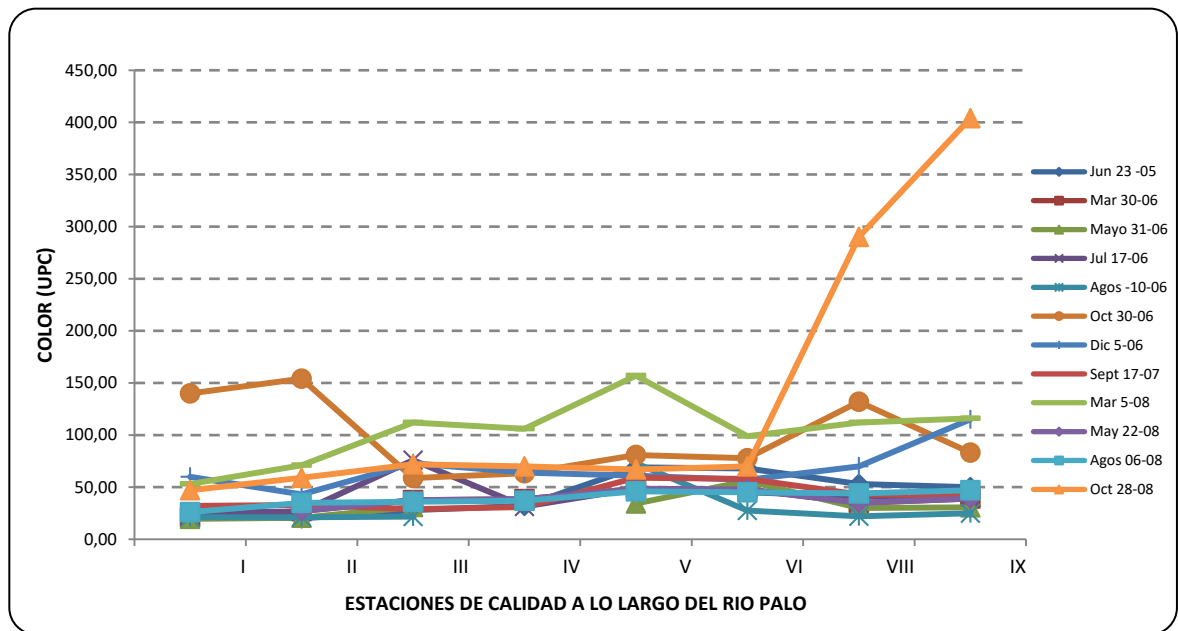
Gráfica 6. Variación de Conductividad a lo largo del río Palo

Fuente: Este Estudio

La mayoría de las mediciones de conductividad realizadas en este periodo se encuentran por encima de los 100 y no superan los 250 μ siemens/cm, sin embargo no hay restricciones para uso como doméstico, recreación en el decreto 1594 de 1984.

Color

Gráfica 7. Variación del Color a lo largo del Río



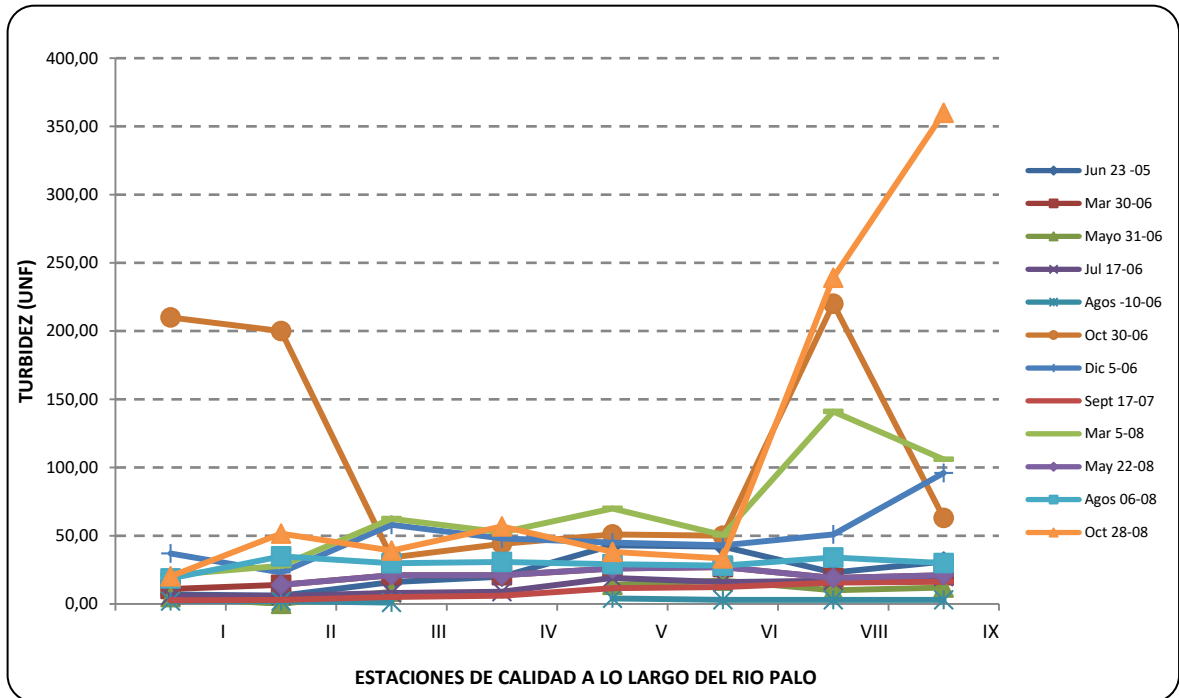
Fuente: Este Estudio

En el perfil de calidad de este parámetro (gráfica 7), los datos registrados de color en el mes de octubre del último año a partir de la estación VI, presentan los niveles máximos debido a una situación atípica en ese momento, con excepción de estas mediciones, los niveles de color indican que desde la bocatoma se tienen los menores niveles que van aumentando hasta la desembocadura del Río Palo, esto va de la mano con el aumento de conductividad, SST, debido al arrastre de materiales, al incremento en la velocidad del flujo y/o a las descargas de vertimientos sobre la fuente con contenidos de material, influyendo en las características organolépticas del agua.

Todos los promedios de los registros en cada estación NO cumplen con el criterio de Color Real definido por el Decreto 1594 de 1984 que debe ser de 75 UPC, para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico.

Turbidez

Gráfica 8. Variación de Turbiedad a lo largo del Río



Fuente: Este Estudio

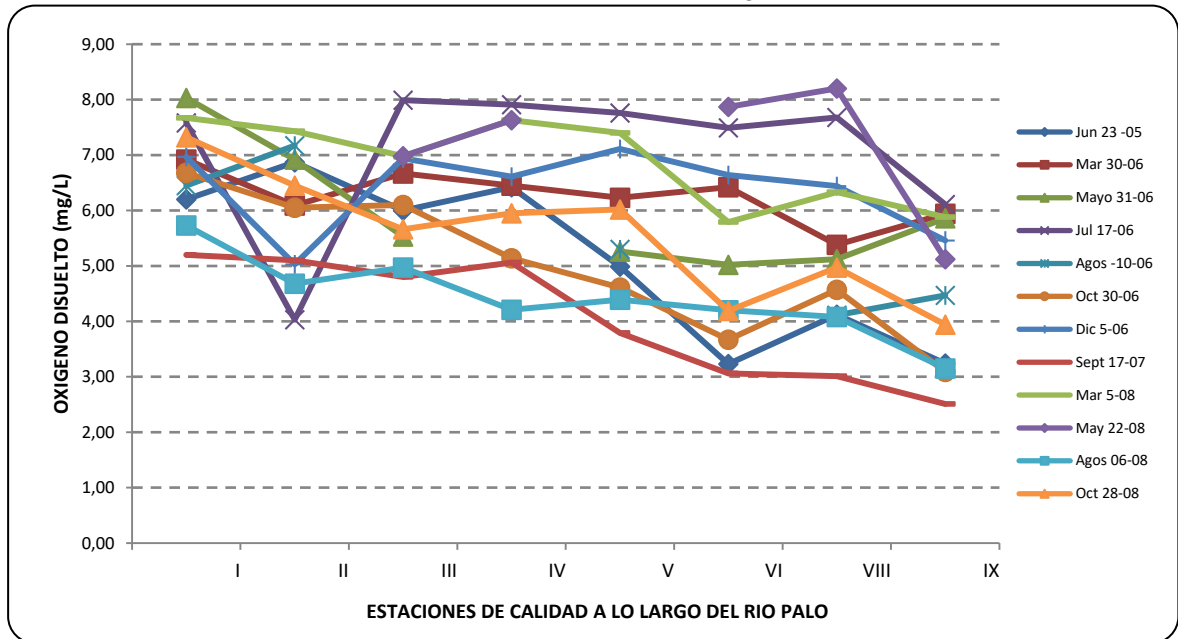
Según la Gráfica 8, se observa que los datos registrados en el mes de Octubre del año 2006, presentan mayor fluctuación y en Octubre del 2008 después de la estación VII (Río Paila) se presentan los valores extremos, que puede deberse a situaciones del momento, es de resaltar que la tendencia de las series es de aumento, y se presenta por el aporte de altas concentraciones de sólidos en suspensión, coloidales o finos materiales al agua por vertimientos industriales y municipales a lo largo del río, o a las condiciones climáticas de la región. Lo anterior, afecta la calidad y productividad de los ecosistemas del río, debido a que los sólidos en suspensión aumentan la turbiedad, influyendo de manera directa en la transparencia, impidiendo la penetración de la luz, por el aumento de color en las aguas y por consiguiente disminuye la incorporación del oxígeno disuelto en el cuerpo de agua.

Según las estadísticas de los rangos, la variación es de 2,62 (en la estación I) y hasta de 360 (en la estación IX) y por consiguiente hace que el agua del Río Palo NO sea apta para la ingesta, ya que valores por encima de 10 unidades son considerados como no admisibles para consumo humano según el decreto 1594 de 1984.

8.1.2 Parámetros de Contaminación.

Oxígeno Disuelto – OD

Gráfica 9. Variación del OD a lo largo del Río



Fuente: Este Estudio

Los valores de oxígeno disuelto a lo largo del Río Palo evidencia una tendencia descendente en todas las campañas de monitoreo, según la gráfica 9. El abatimiento de oxígeno presentado en la mayoría de las campañas podría deberse a la mayoría de vertimientos que se encuentran en esta zona en especial los industriales lo que lleva a entender que el efecto de los vertimientos en todas las zonas estudiadas influyen de manera negativa en los ecosistemas del río, como también va de la mano con los factores anteriormente analizados, aumento de turbidez, aumento de color, de SST, de DBO₅ y de DQO, disminuyendo las condiciones de buena salud de sus aguas.

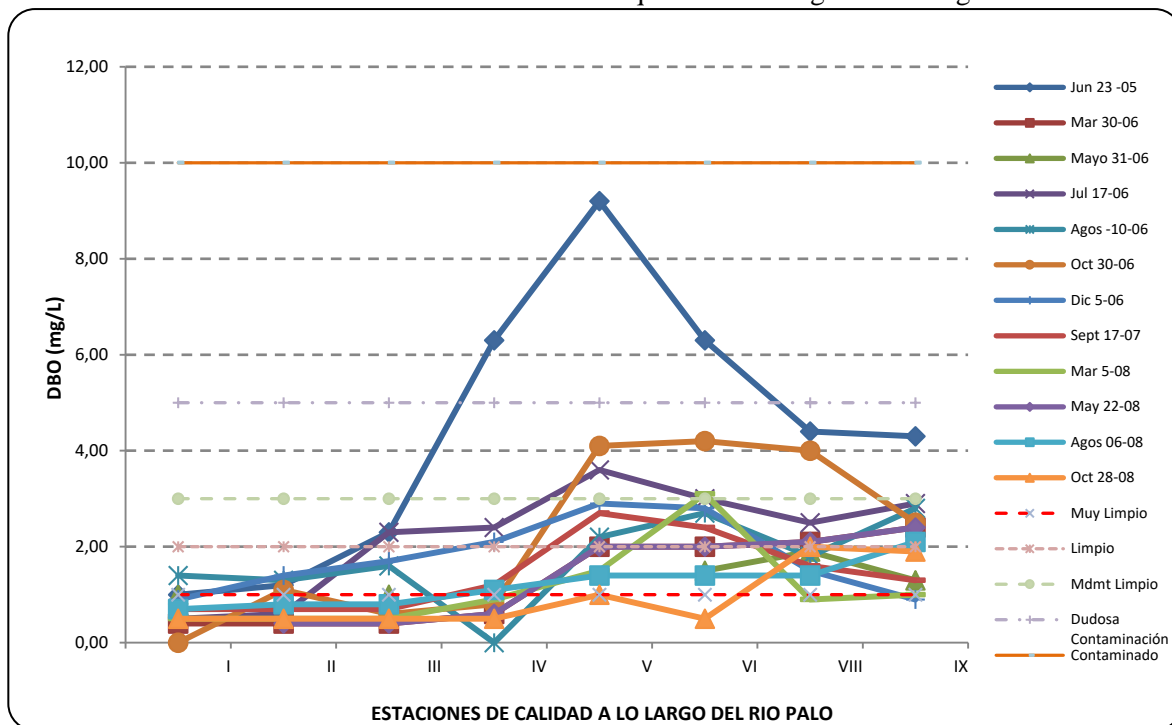
La posible recuperación de este parámetro en la estación VII se da por la confluencia del Río Paila. Los registros más bajo y el más alto reportados en todas las campañas fueron de 2.51 y 8.20 mg/L respectivamente, con una desviación de 1,33.

Es normal que la diseminación de materiales orgánicos y/o inorgánicos que demandan oxígeno, agotan o consumen el que está disuelto en el cuerpo de agua, lo que se constituye una amenaza para los peces y demás ecosistemas acuáticos. Conforme al análisis anterior, a la información encontrada y la normatividad vigente el promedio de OD de 5,33 mg/L, se

concluye que el río mantiene condiciones de calidad de agua que se pueden destinar para cualquier uso.

Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO₅

Gráfica 10. Variación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a lo largo del Río



Fuente: Este Estudio
MODMT= Moderadamente

La tendencia de los valores de este parámetro a lo largo del río es ir en aumento hasta la estación V, y de recuperación en la estación VI (a excepción de la campaña de octubre 28 de 2008 que presenta un aumento) y después de ella seguir con la tendencia anteriormente descrita. El aumento de concentración de DBO₅, se debe a la incorporación de materia orgánica por los vertimientos (industriales, domésticos, agrícolas y/o municipales) sobre la fuente y la reducción o recuperación se debe gracias a la confluencia de la fuente natural (Río Paila) conforme a la gráfica 10.

Según la información reportada en esta gráfica, y en relación con los resultados contenidos en la misma, se deduce que en la estación I (Bocatoma Cedelca) y la estación II (antes PTAR Guachené), el río tiene la condición de ser muy limpio ya que el contenido de materia orgánica bajo los promedios en estas estaciones son de 0,65 y 0.75mg/L respectivamente. En las estaciones restantes se registra un ligero aumento de DBO₅, con un promedio máximo de 3.04 mg/L en la estación V convirtiéndose en un río entre

moderadamente limpio a uno de dudosa contaminación, lo anterior puede deberse a la mayoría de vertimientos encontrados en este tramo.

Tabla 13. Criterios presuntivos de calidad para la estimación de la DBO₅

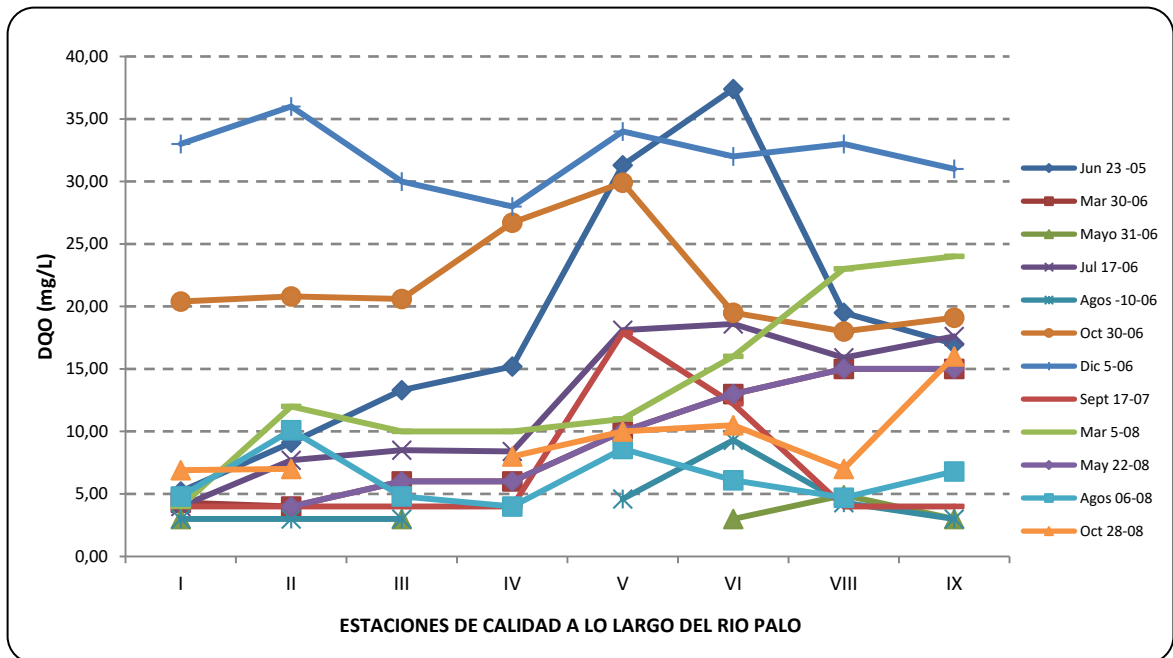
Condiciones del río	DBO ₅ a 20 ^o C (mg/L)
Muy limpio	1
Limpio	2
Moderadamente limpio	3
Dudosa contaminación	5
Contaminado	10

Fuente: (JICA, et al, Documento Técnico CTESB 1998)

Desde el punto de vista de usos del cuerpo de agua en cuanto a la normatividad vigente, con excepción de los datos registrados en el mes de junio de 2005, cumple con todos los criterios de calidad para cualquier uso.

Demanda Química de Oxígeno – DQO

Gráfica 11. Variación de la Demanda Química de Oxígeno a lo largo del Río



Fuente: Este Estudio

Al analizar la gráfica 11, puede decirse que la tendencia general de los valores es ascendente, desde la primera hasta última de las estaciones, en todas las campañas realizadas.

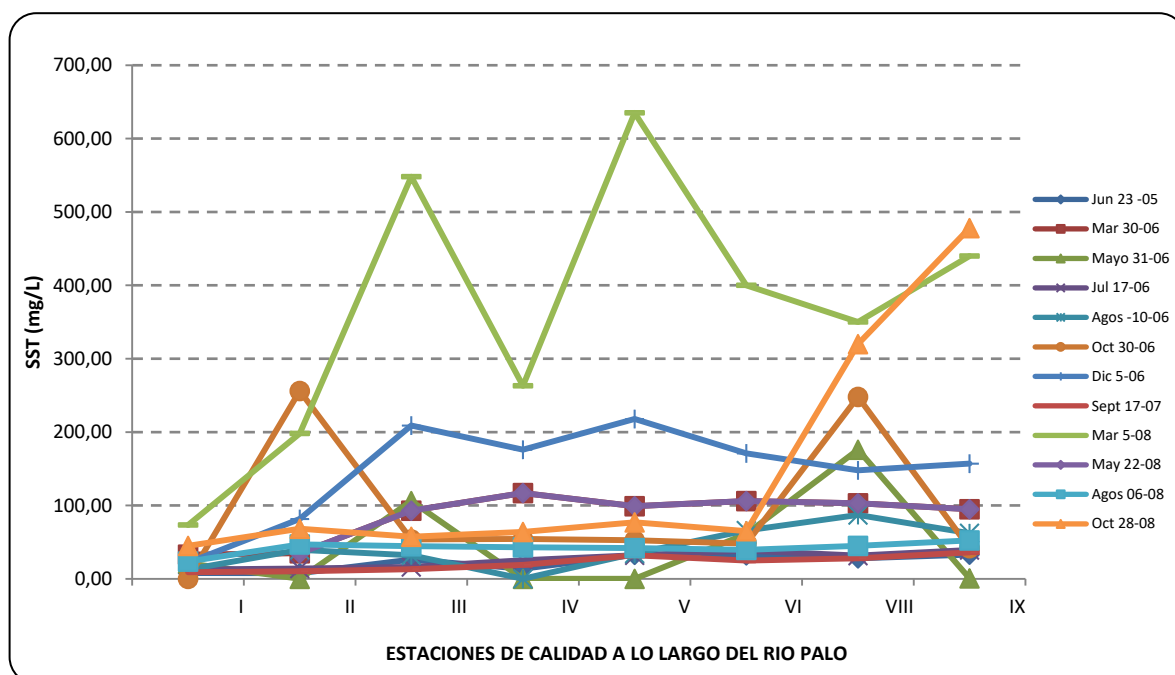
Las anteriores variaciones se ven incididas por diversos factores, el aumento de la DQO se produce por los vertimientos de aguas residuales, domésticas y/o industriales, lo que se traduce en el incremento del contenido de materia orgánica en el agua, y por consiguiente la disminución del oxígeno disuelto en ella.

La recuperación (disminución de la DQO) en el tramo de las estaciones V a VI se debe a la dilución del caudal que le aporta el Río Paila, confluente en este tramo. En las estaciones siguientes (VIII y IX), nuevamente se ve un incremento de este parámetro por el aporte de materia orgánica de los vertimientos domésticos encontrados en este tramo.

Se observa que en octubre y diciembre de 2006 en la estación I, II, III y IV se registran valores superiores a 20 mg/L a lo largo de su trayecto lo cual puede deberse a situaciones climáticas de estos días como por ejemplo, condiciones de creciente de la corriente, y/o a grandes aportes de vertimientos domésticos e industriales

Como es de esperar la DBO₅ y la DQO son directamente proporcionales, y el incremento de ella representa una disminución de oxígeno disuelto, afectando de manera directa la vida acuática de los ecosistemas del Río Palo y por consiguiente una restricción en los usos del agua.

Sólidos Suspendidos Totales – SST



Gráfica 12. Variación de los Sólidos Suspendedos a lo largo del Río

Fuente: Este Estudio

Al analizar la gráfica 11, se observa que la tendencia de los valores es su incremento, desde la estación I hasta la IX pasando por fluctuaciones en especial la campaña de marzo de 2008, en la cual se registraron valores extremos, dentro de ella está el de 635 mg/L, el valor más elevado que puede obedecer a condiciones climáticas particulares de esos días.

El incremento de este parámetro puede obedecer a la fuerte condición climática de lluvias del momento, a la intrusión de sólidos en los vertimientos, a la afluencia de corrientes naturales o al movimiento del cuerpo de agua porque a medida que se avanza de estación en estación va ganando velocidad.

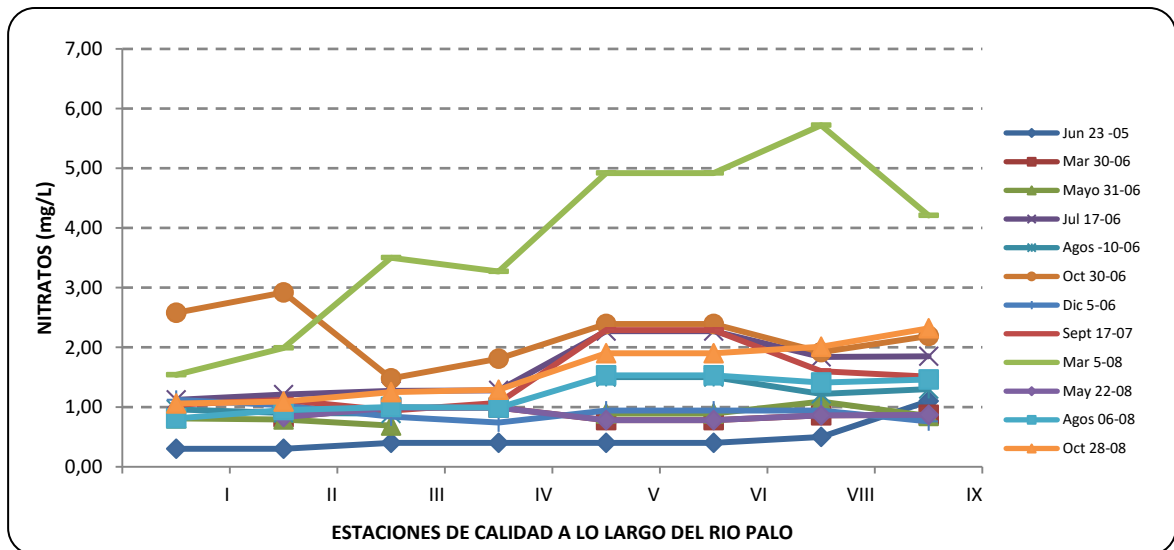
Los sólidos suspendidos y disueltos en las corrientes superficiales afectan de manera negativa la calidad de agua para consumo como también se convierte en un limitante de desarrollo de la vida acuática, debido a que altas concentraciones de este parámetro impiden la penetración de la luz, y por consiguiente la disminución del contenido de oxígeno disuelto en las corrientes.

Aunque para este parámetro no se han establecido criterios en la normatividad colombiana, es de resaltar que los promedios encontrados en las estaciones de calidad hacen que el agua posea niveles de contaminación por diversos orígenes (antrópicos y naturales), que hacen que sea un agua NO segura ni apta para consumo. En relación con criterios de otros países, esta agua puede ser destinada para riego.

8.1.3 Parámetros de Fertilización

Nitratos – NO₃

Gráfica 13. Variación de Nitratos a lo largo del Río



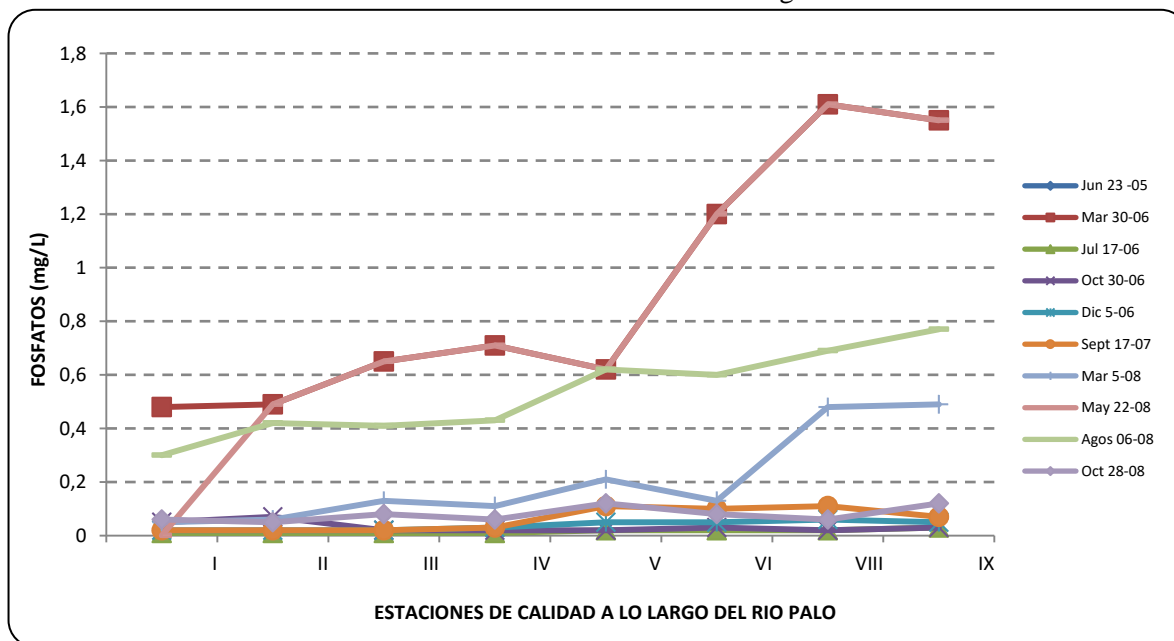
Fuente: Este Estudio

De acuerdo con la Gráfica 13, la concentración de nitratos tiende a aumentar desde la estación I hasta la IX, registrando valores menores a 1 en la estación inicial de monitoreos, y al final valores que no sobrepasan 3 mg/L, a excepción de la campaña de marzo 5 de 2008 pues en ella se presentan valores extremos, esta situación es atípica lo cual puede representar un periodo de mayor influencia de actividad agrícola en el sector

El aumento en la concentración de nitratos limita el uso del agua para consumo humano. Desde el punto de vista de potabilidad las normas actuales vigentes en Colombia admiten hasta 10 mg/l de nitratos, concentraciones superiores son perjudiciales para la salud. Es decir este parámetro en el Río Palo cumple con lo establecido con el Decreto 1594 de 1984.

Fosfatos – PO₃⁴

Gráfica 14. Variación de Fosfatos a lo largo del río



Fuente: Este Estudio

Los fosfatos a lo largo del Río Palo tienden a aumentar, presentando fluctuaciones según la gráfica 14. Las campañas de mayo de 2006 y marzo de 2008, son las que presentan valores extremos que pueden deberse a situaciones de mayor contaminación por fertilizantes ingresados a la fuente originados por actividades agrícolas. En esta gráfica se observa que en la mayoría de los registros en la estación I la concentración de este parámetro es menor de 0.2 mg/L.

Teniendo en cuenta las estadísticas, los datos fluctúan en un rango de 0.01 y 1.61 mg/L, con un promedio 0.32 mg/L y una desviación estándar de 0,4.

De manera general los fosfatos favorecen la eutrofización, lo cual conlleva al aumento en el medio, de materias orgánicas, bacterias heterótrofas, que modifican el carácter fisicoquímico del agua, y hacen que disminuya el oxígeno disuelto. Desde el punto de vista de ingesta de agua según los criterios de la normatividad Colombiana se admite este parámetro hasta 10 mg/L, lo que el cuerpo de agua del río cumple.

8.1.4 Parámetros de Contaminación Bacteriológica

Coliformes Totales - CT y Coliformes Fecales - CF

La principal característica de los microcontaminantes orgánicos son su complejidad y variedad, estos grupos se derivan de las actividades domésticas, industriales y agrícolas, los cuales modifican las características organolépticas de las aguas y presentan dificultades para su determinación analítica, llegando a causar enfermedades en la salud humana.

El método de cuantificación de estos parámetros utilizados por el Laboratorio Ambiental de la corporación no permite cuantificar con mayor precisión el grado de contaminación bacteriológica presente en las agua del Río Palo.

Teniendo en cuenta los registros de estos parámetros, reportados por el laboratorio, la mayoría superan el límite de detección de 2419 NMP, registros que indican el deterioro de la calidad del agua y según los criterios de calidad, en todas las estaciones del Río Palo no es conveniente para el consumo humano.

8.2 RESULTADOS DE ÍNDICES DE CALIDAD ICA E ICO

Con el fin de mejorar y reducir la complejidad del manejo e interpretación de la información de calidad del río, se realizan los índices de calidad para complementar el panorama ambiental del estado de las aguas del Palo, para ello se tiene en cuenta, los ICAs e ICOs de mejor aplicación en función de los parámetros requeridos, llegando a la conclusión que el ICA que mejor se ajusta es el creado por la Fundación Nacional de Saneamiento (FNS) de Estados Unidos, y los ICOs son: el de Contaminación por Materia Orgánica ICOMO y el de contaminación por Sólidos suspendidos ICOSUS, dónde los resultados se reportan de manera gráfica.

Sin embargo, registros de valores encontrados, no presentan la información necesaria de los parámetros fisicoquímicos para la determinación de los Índices de Calidad de Agua “ICA” por la técnica NSF, y los Índices de Contaminación ICO, por lo cual fue necesario determinar algunos parámetros tales como:

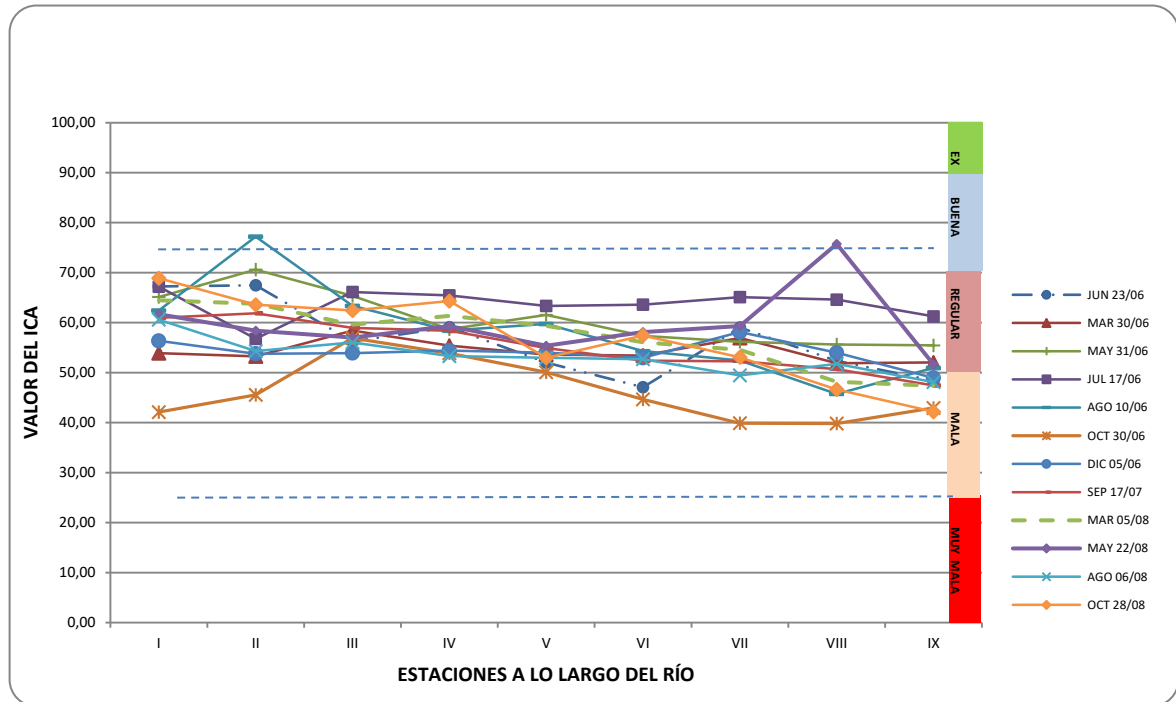
- Asumir un Δ de temperatura de 3 °C debido a la falta de información acerca de la temperatura ambiente (parámetro in situ) de la zona de estudio.
- La técnica NSF utiliza sólidos totales para la determinación de los subíndices, pero este dato no se encuentra disponible en los estudios tomados como base, por lo cual se utiliza Sólidos Suspendidos Totales.
- Para los datos faltantes, se eligieron los promedios de cada estación con el fin de obtener resultados confiables,

NOTA: Los datos, cálculos y resultados de las estadísticas para el análisis de calidad y determinación de ICAs e ICOs, se reportan en el CD. “ICA NSF e ICOs” en hojas de Excel.

8.2.1 Resultados de los ICA

La gráfica 15, muestra los ICA por cada campaña y estación a lo largo del río, en el tiempo establecido (2006-2008).

Gráfica 15. ICA en el río Palo



Fuente: Este Estudio
EX= Excelente

En cuanto a la evaluación del río Palo por ICA NSF, presentada en la anterior gráfica, se observa una variación de *regular* a *mala* calidad, desde dónde comienza el estudio del análisis (Estación Bocatoma) hasta dónde termina (Bocas del Palo o Desembocadura del Palo al Cauca), debido a la fluctuación de las características físicas, químicas y microbiológicas del recurso, producto de las modificaciones introducidas por las actividades antrópicas fundamentalmente, sin dejar a un lado que dichas fluctuaciones también son producto de la incorporación de contaminantes al cuerpo de agua por vertimientos domésticos de poblaciones a las riveras del río en colectores municipales o las descargas directas de las mismas.

Se observa que la pérdida de la calidad del agua, se presenta de manera homogénea en todas las campañas de monitoreo, y los extremos o los picos de la gráfica generalmente son

datos atípicos que se pueden presentar por errores instrumentales, humanos y/o condiciones del momento de monitoreo.

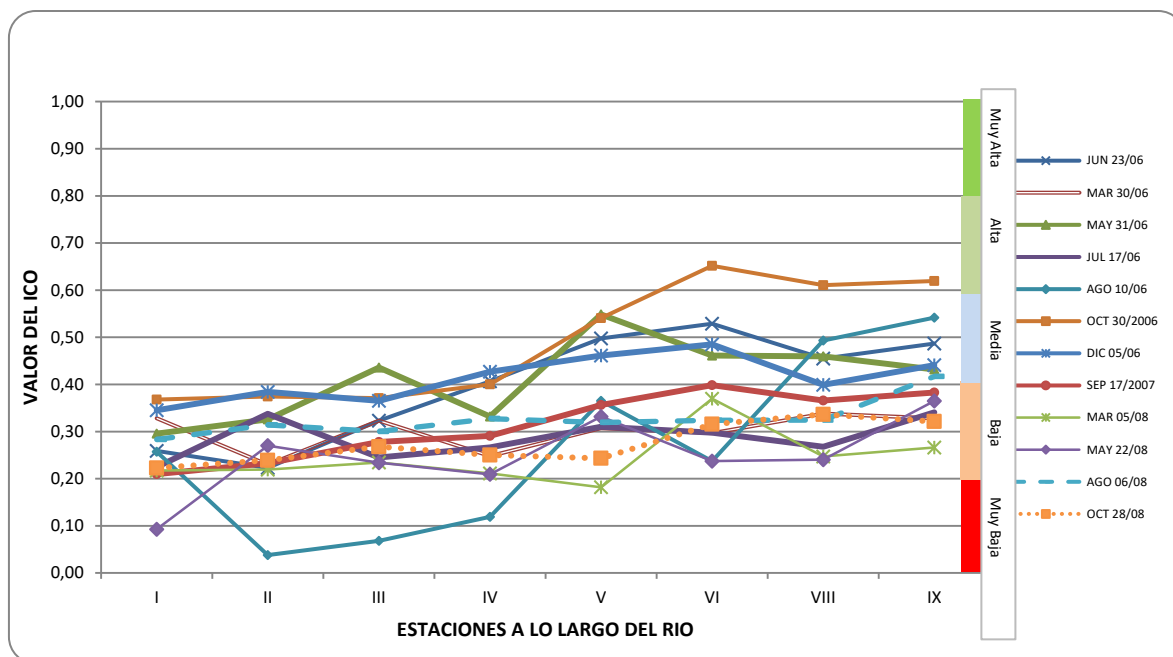
Es de resaltar que el comportamiento del ICA en las estaciones I, II, VI, VII y VIII muestran mayor fluctuación en los resultados. En las estaciones I, VI y VIII de las doce (12) campañas se presenta que los valores de octubre 30 de 2006 clasifica al agua de mala calidad, mientras que en las demás fechas la mayoría de resultados se mueven en la franja de regular calidad, que se atribuye a factores anteriormente descritos.

En la estación II al igual que la VII, la clasificación de la calidad del agua, se encuentra entre buena, regular y mala, evidenciando mayor desviación en los valores del ICA, por los errores anteriormente descritos o por condiciones del momento que se ven reflejados en los resultados.

8.2.2 Resultados de los ICOs

La gráfica 15, muestra los valores del ICOMO por cada campaña y estación a lo largo del río, desde el 2006 hasta el 2008.

Gráfica 16. ICOMO a lo largo del río



Fuente: Este Estudio

El ICOMO representa el Índice de Contaminación respecto al contenido de materia orgánica, por tanto entre mayor sea éste contenido, mayor es el valor del índice, indicando menor cantidad de oxígeno disuelto, y por consiguiente el deterioro de los ecosistemas naturales de la corriente.

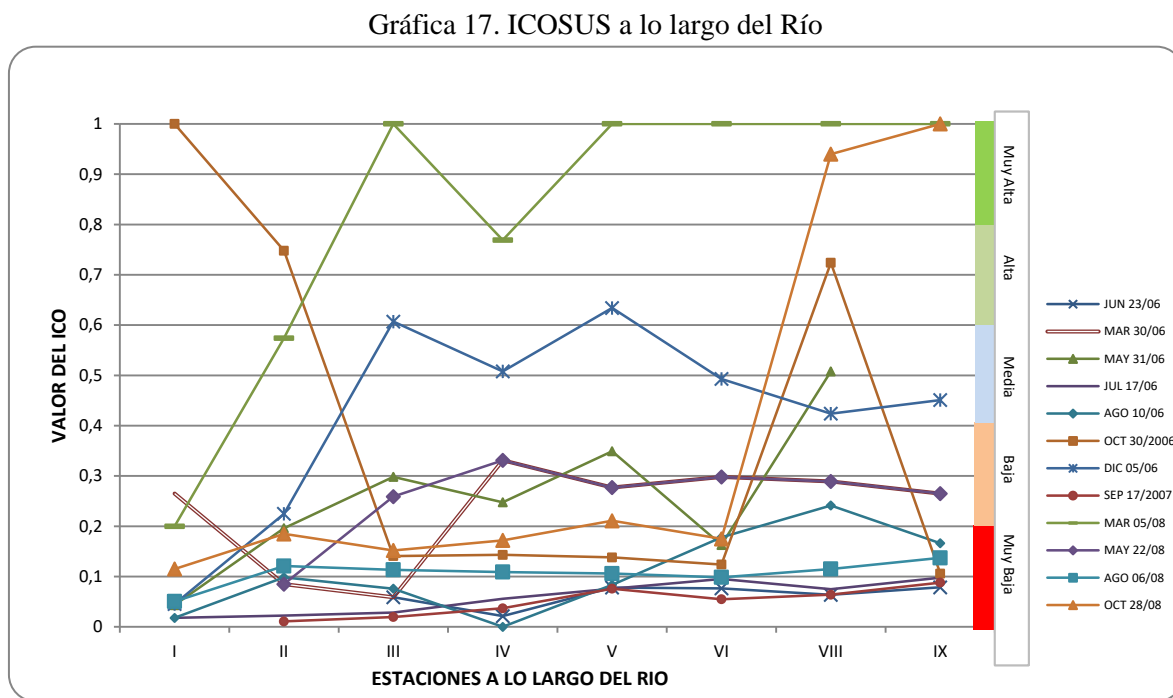
A lo largo de la zona de estudio sobre el río Palo y según los resultados del ICOMO, presentados en la gráfica 16, se puede observar que la tendencia de los valores en la mayoría de las campañas es su incremento, pasando de una clasificación de contaminación generalmente de *baja* a *media*, cabe resaltar que también se encuentran pocos resultados que la clasifican en muy baja y alta, durante las campañas del 10 de agosto de 2006 y octubre 30 del mismo año respectivamente.

Los cambios de contaminación, y pérdida de calidad puede deberse a la incorporación de material biodegradable por los asentamientos humanos en las riveras del río, desechos orgánicos que se incorporan al cuerpo y/o vertimientos industriales, a los niveles de coliformes fecales que están por encima de los valores admisibles establecidos del decreto 1594 de 1984, que conllevan a la modificación de la calidad del agua, al daño de los ecosistemas y a la limitación de los usos que puede ser destinada.

Desde la tercera estación hasta la sexta, se observa con mayor frecuencia el cambio de calidad, que se debe a la zona donde se encuentran la mayoría de descargas al río, mientras

que en la octava, se nota se nota una recuperación de sus aguas, que se infiere por la incorporación del río Paila modificando forma positiva las características del río Palo.

La gráfica 17, muestra los valores del ICOSUS por cada campaña y estación a lo largo del río, desde el 2006 hasta el 2008.



Fuente: Este Estudio

El Índice de contaminación ICOSUS, representa la Contaminación del agua respecto al contenido de sólidos suspendidos presentes en ella. En la gráfica 16 se observa que los valores de este Índice son muy variados, van desde 0.0 hasta 1.0, pasando por todas las clasificaciones de contaminación (muy alta, alta, media, baja y muy baja). Los valores altos o máximos generalmente se dan en época de lluvias tal como se observa en esta gráfica, debido a que se genera mayor remoción del subsuelo, influyendo de manera directa al incremento de sólidos presentes en el agua; mientras que en las épocas de verano se mantiene en un rango de 0.0 a 3.0, lo que indica que hay menor arrastre de materiales con respecto a la turbulencia de las aguas.

La contaminación por sólidos suspendidos al inicio del análisis, es generalmente muy baja, excepto en la fecha de monitoreo del 10 de agosto del 2006. En las demás estaciones los resultados del índice son muy variables, lo que se infiere que las desviaciones son grandes.

8.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE CALIDAD DE AGUAS DEL RÍO PALO

El análisis de, los perfiles de calidad, los Índices de Calidad de Agua (ICA) y de Contaminación (ICO) del río Palo, pretenden evaluar el panorama ambiental, además conocer y estimar el comportamiento de la calidad del agua del río, como también los cambios de las características fisicoquímicas y microbiológicas.

Por lo tanto, los perfiles evaluados y analizados en el periodo 2005-2008, y la agrupación de los mismos en: físico-químicos, de contaminación, de fertilización y de contaminación bacteriológica, se establece que la calidad del agua del Río Palo se ve afectada principalmente por el grupo de contaminación físico- química y bacteriológica, debido a que estos NO cumplen con la normatividad y por lo tanto no es apta para consumo humano y doméstico, según los criterios de calidad del decreto 1594 de 1984, mientras que los parámetros de contaminación se encuentran dentro del rango permisible por dicha norma.

De manera general se observa una recuperación desde la estación VIII hasta la desembocadura, lo que obedece a la disminución de la contaminación ocasionada por todos los vertimientos industriales y domésticos gracias al efecto diluyente de las aguas del Río Paila al Río Palo en este tramo.

Los valores bajos de DBO₅ en las estaciones I y II, Bocatoma Cedelca y antes PTAR Guachené, reflejan un cuerpo de agua de calidad ecológica oligosapróbica es decir muy limpia, con condiciones de baja turbiedad, color y SST, dónde el OD es próximo a la saturación, permitiendo la existencia de fauna acuática de gran riqueza y diversidad, en tanto a medida que se avanza de estaciones, el cuerpo comienza a tornarse moderadamente limpio a uno de contaminación dudosa, cambiado de aspecto hasta llegar a la desembocadura.

Los parámetros que indican contaminación por fertilizantes, no superaron concentraciones mayores de 10 mg/L ni en fosfatos, ni en nitratos, por ello se deduce que la calidad del agua del Río Palo presenta bajos niveles de contaminación asociados a actividades agrícolas, a uso de fertilizantes y detergentes.

En cuanto a la contaminación bacteriológica del Río Palo, se considera que son aguas NO aptas para consumo humano y doméstico, al analizar los reportes del laboratorio, es de resaltar que la técnica utilizada para estos parámetros debe ser reemplazada por una de mayor sensibilidad y así, sustentar mejor los análisis en cuanto a dicha contaminación.

En cuanto a la evaluación de la calidad del agua por ICA, se observa un decaimiento en relación a la distancia, pasando de un agua de *Regular* calidad a *Mala*, desde la Bocatoma Cedelca hasta la desembocadura del río Palo, observando que en la zona donde se vierten los residuos industriales comienza el descenso de la calidad debidos particularmente a la mala calidad de los parámetros como SST, y especialmente a la deficiente precisión de Coliformes Fecales y Totales.

En cuanto a los promedios de los índices de contaminación por materia orgánica y por sólidos suspendidos, a lo largo del río Palo, representados en las gráficas 15 y 16, se establece que es de forma ascendente llegando a una *clasificación de contaminación media*, lo que infiere que esta pérdida de la calidad del recurso, se debe al ingreso de contaminantes degradables y no degradables al río, debido a diversos usos al que es destinado, y que por la naturaleza del contaminante hace que cambien o modifiquen sus condiciones fisicoquímicas y microbiológicas iniciales.

8.4 IDENTIFICACIÓN DE TRAMOS Y DEFINICIÓN DE CONSTANTES PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MESOCA Y EL MODELO DE STREETER Y PHELPS

En esta etapa del trabajo, se preparará la información para la aplicación de la Metodología y el modelo de Streeter y Phelps, teniendo como referencias: alguna información disponible en el proyecto de modelación del río Palo realizado en 2002 por Ingesam para la CRC, cuya metodología fue la implementación del modelo Qual2E, los registros obtenidos de la campaña con fines de modelación realizada por la CRC en el año 2006 en temporada de estiaje, y las estadísticas de los monitoreos en condiciones similares de tiempo desde el 2005 hasta el 2008.

8.4.1 Identificación de los tramos

Ahora bien, es de suma importancia conocer los usuarios del río, de los sectores descritos en el análisis de calidad: sector industrial, sector municipal, Matadero Municipal, fuentes dispersas y afluentes naturales, que dentro de ellos se distinguen tres tipos de aportes de cargas contaminantes, los cuales son:

- Aportes por corrientes superficiales, tales como quebradas o ríos, que además de contribuir con el caudal del río, lo hacen en carga contaminante.
- Descargas puntuales de industrias o de aguas residuales municipales.

- Descargas dispersas, que corresponden a escorrentías, sobrantes de riego o pequeños aportes de actividades agrícolas o viviendas.

La información de campo de la campaña de verano del 10 de agosto del 2006 se tuvo en cuenta para esta fase del trabajo, la cual describe las características hidráulicas y las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas que se reportan en las tablas 20 y 21 respectivamente.

En el anexo B del presente trabajo, se reportan los resultados del laboratorio de la campaña del 10 de Agosto de 2006.

En primer lugar se adoptó información hidráulica y morfológica existente en el estudio por Ingesam 2002, que consiste en dividir el sector en estudio en cinco (5) tramos junto con su longitud tomando como base la morfología de la cuenca, además se complementó esta información en cuanto a observación y descripción de los tramos de acuerdo al trabajo de campo realizado en el presente estudio, donde esta información se presenta en la tabla 14.

Tabla 14. Descripción de tramos del Río Palo

TRAMO No.	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	LONG. Km.
1	Después de Bocatoma CEDELCA a Q La Trampa	Tramo dónde recibe aportes de ríos y se encuentran las estaciones de calidad I y II	4.26
2	Después de Q La Trampa a descarga de PTAR Guachené	Tramo dónde hay pocos vertimientos municipales y aporte de fuentes dispersas.	8.28
3	Después de descarga de PTAR Guachené a Bocatoma Propal.	Tramo donde empieza a hacerse más frecuente los vertimientos domésticos y agrícolas, influenciando de manera negativa los ecosistemas	12.32
4	Después de Bocatoma Propal a Confluencia con R Paila	Tramo dónde se descargan la mayoría de vertimientos industriales, y municipales.	5.60
5	Después de R Paila hasta descarga al R Cauca	En este tramos el Río Palo, recibe las aguas del Paila y los vertimientos del Matadero Municipal	9.12

Fuente: Adaptado Ingesam – CRC 2002.

Para completar la anterior información, se registran los usos actuales y predominantes por cada tramo, definidos a través de estudios realizados por la corporación, entes externos, y el trabajo desarrollado en campo, registrándola en la tabla 15.

Tabla 15. Usos actuales y potenciales de los tramos del río

	TRAMO	USOS ACTUALES	USO PREPONDERANTE
1	Bocatoma Cedelca – Confluencia Quebrada La Trampa	Generación de Energía, consumo, recreación, agrícola, receptor de aguas residuales	Generación de Energía y Doméstico
2	Confluencia Quebrada La Trampa – Descarga Ptar. Guachené	Consumo humano, recreación, agrícola (caña de azúcar), receptor de Aguas Residuales Domésticas	Agrícola y recreativo
3	Descarga Ptar. Guachené – Bocatoma de Propal	Industrial, receptor de ARD y ARI, sobrantes de riego, como fuente para materiales de construcción	Industrial
4	Bocatoma de Propal – Confluencia R Paila	Industrial, receptor de ARD y ARI, sobrantes de riego, como fuente para materiales de construcción y agrícola.	Receptor de ARD y ARI
5	Confluencia R Paila – Desembocadura en el R Cauca	Descargas de ARD, Uso para riego, Vertimientos sobrantes de riego	Agrícola

Fuente: Adaptado Ingesam – CRC 2002.

8.4.2 Definición del Valor de las Constantes de Consumo y de Reaireación

Seguidamente se revisó la información de los parámetros hidráulicos del río Palo, tomando como guía los datos hidráulicos correspondientes a los aforos realizados en la campaña de monitoreo del 10 de Agosto de 2006, con ellos se obtuvieron las constantes para la representación hidráulica en Mesoca y en el modelo. En la tabla 16 se reportan las características hidráulicas de la corriente, relacionando el caudal, el área superficial, la velocidad y la profundidad del agua.

Tabla 16. Características hidráulicas del Río Palo -10 de Agosto de 2006

TRAMO	LUGAR DE MUESTERO	CAUDAL Q (L/s)	AREA A (m²)	VELOCIDAD V (m/s)	ALTURA H (m)
1	R. Palo -Bocatoma Cedelca	5437	7,21	0,754	0,306
2	R. Palo -Puente Vía Guachené	7882	11,95	0,66	0,47
3	R. Palo - Puente Campamento el Maíz	9132	16,64	0,594	1,1
4	R. Palo Puente P ICC	9362	6,71	1,395	0,67
5	R. Palo Estación CVC Puerto Tejada	12656	12,65	1	1,054

Fuente: Este Estudio

Enlazando la anterior información: cargas vertidas (industriales, domésticas y municipales), captaciones, vinculando: caudales, kilometrajes, usos, caudal promedio, los promedios de las cargas contaminantes de DBO₅ y SST, y características hidráulicas se relacionan en el siguiente esquema.

Esquema 4. Tributarios, usuarios, tramos y usos del río Palo
Fuente: Este Estudio

➤ **Constante de reaireación K2**

La tasa de reaireación o incorporación de oxígeno está representada por la constante K2, determinada a partir de tres ecuaciones sustentadas en la literatura en función de los parámetros expuestos en la tabla 16, entre las que debe escogerse la que más se ajuste al caso específico. En la tabla 17 se reportan los resultados de la constante de reaireación (K2), con correcciones de temperatura.

Tabla 17. Coeficiente de reaireación Ka, con las diferentes ecuaciones

TRAMO	PARÁMETROS			ECUACIONES			K2	K2
	T °C	VEL (m/s)	h (m)	O'CONNOR Y DOBINS	CHURCHILL	OWENS	Definida 20°C	Corregida a T°C
I	18,60	0,71	0,39	13,68	17,98	<u>24,29</u>	24,29	23,50
II	25,30	0,63	0,79	4,48	<u>4,92</u>	<u>6,09</u>	5,50	6,24
III	26,40	0,99	0,88	4,71	<u>6,38</u>	<u>6,64</u>	6,51	7,58
IV	26,30	1,19	0,85	5,38	<u>8,03</u>	<u>7,90</u>	7,96	9,25
V	26,50	1	1,0	3,63	<u>4,79</u>	<u>4,82</u>	4,81	5,61

Fuente: Este Estudio

Al evaluar las restricciones de altura y velocidad en cada ecuación, se presenta que los valores resaltados en la tabla son los aplicables a los tramos, demostrando que los resultados de O'connor y Dobins no cumplen para ningún tramo, para los que aplican se hace el promedio de los resultados y la respectiva corrección por temperatura. Estos valores son aceptables, encontrando que para el primer tramo del río Palo el resultado de la constante es mayor a las demás, debido a que en este el caudal es más pequeño por la captación de la Bocatoma Cedelca, haciendo que se genere una mayor turbulencia en el río y por consiguiente se incorpore más oxígeno al agua, además la pendiente es un poco mayor en esta zona que en la parte baja del río favoreciendo el aumento de la constante. En los demás tramos el valor de la constante no es muy variable debido a que los parámetros hidráulicos se mantienen relativamente constantes.

➤ **Constante de remoción de DBO₅ (Kr)**

El consumo de oxígeno dentro de un sistema hídrico se expresa en este trabajo a través de las constantes K1, que es el coeficiente de absorción de oxígeno para la degradación de DBO; Ks que es el coeficiente de consumo de oxígeno por el sedimento del río (demanda béntica); y Kr es la constante de remoción de la DBO₅.

Ahora bien, se procede a determinar la constante de remoción de DBO₅ (Kr), la cual está en función de la DBO₅ y DBO_u, a partir de la ecuación de primer orden de la DBO, teniendo

en cuenta los reportes del laboratorio de estos parámetros en la campaña de seleccionada, reportados en la tabla 18.

Tabla 18. Constante de Remoción de DBO₅, con la ecuación de 1^{er} Orden de DBO

TRAMO	PARÁMETROS			DEFINIDA	CORRECCIÓN
	T°	DBO ₅	DBO ₂₀	K1=Kr	de °T a Kr
I	18,6	1,4	2	0,23	0,22
II	25,3	1,3	1,9	0,23	0,26
III	26,4	1,7	2	0,16	0,19
IV	26,3	2,2	4,8	0,24	0,28
V	26,5	1,8	3,8	0,24	0,28

Fuente: Este Estudio

Por literatura se encontró que $K_r = K_s + K_1$: descritos anteriormente los coeficientes. Debido a la complejidad de determinación de K_s , no se tendrá en cuenta en este estudio tomando como valor de 0.0; quedando finalmente que K_r debe ser mayor o igual a K_1 .

➤ *Constante de Desoxigenación*

La constante de desoxigenación es la velocidad de oxidación bioquímica de la materia orgánica, se determina a partir de una ecuación en función del caudal, los resultados se reportan en la tabla 19.

Tabla 19. Constante de Desoxigenación del río Palo

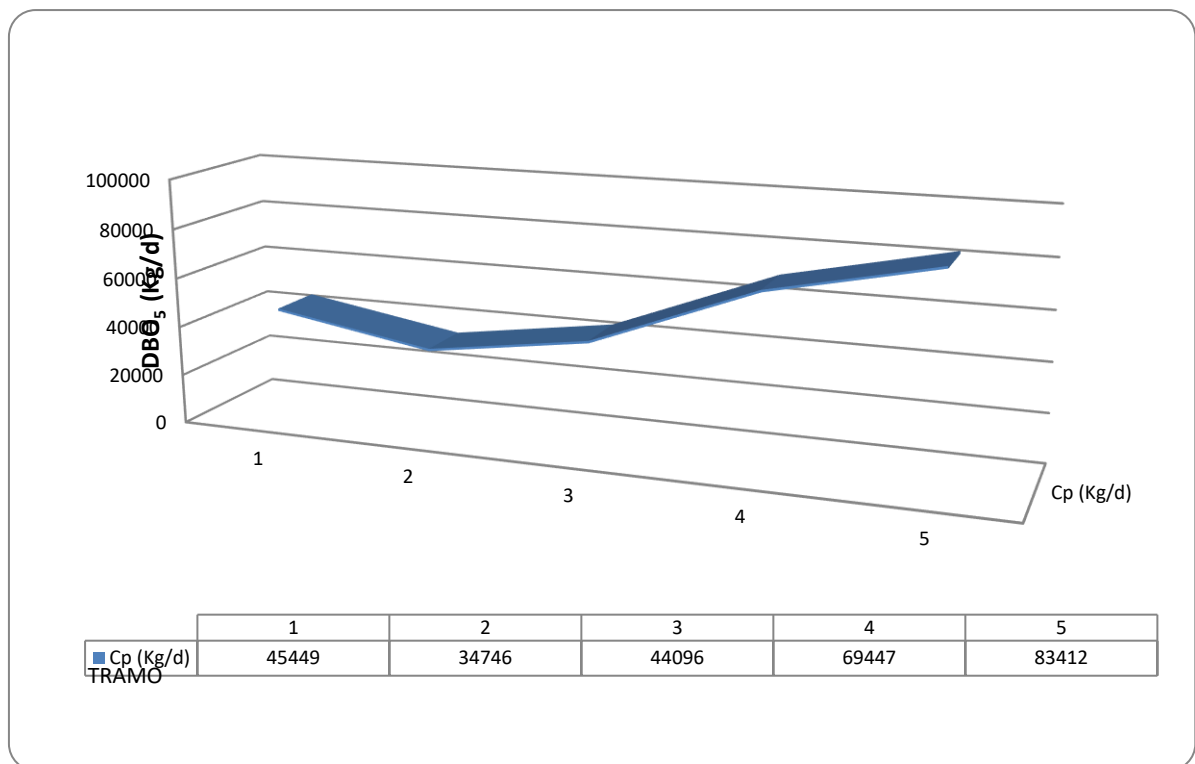
TRAMO	CAUDAL Q (m ³ /s)	$K_d = 1,8(Q)^{-0,49}$	T °C	Kd T
I	5,437	0,79	18,6	0,74
II	7,882	0,65	25,3	0,83
III	9,132	0,61	26,4	0,82
IV	9,362	0,60	26,3	0,80
V	12,656	0,52	26,5	0,70

Fuente: Este Estudio

8.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA MESOCA

La Metodología MESOCA, es una metodología simplificada, fundamentada para casos con bajo nivel de información disponible, desarrollada por MAVDT. Esta se propone para el establecimiento de objetivos de calidad que cumpla con condiciones de: definir escenarios objetivos de calidad para los cuerpos de agua; que dichos escenarios puedan ser retomados y validados en el proceso integral y definitivo de ordenamiento del recurso hídrico; esta metodología debe adaptarse temporalmente a la mejor información disponible encontrada en los registros de la corporación.

En la gráfica 18, se reportan los resultados de la aplicación de la Metodología Mesoca, esta aplicación tiene en cuenta la selección de tramos, constantes y parámetros descritos anteriormente.



Gráfica 18. Cargas Permisibles de DBO₅ al río Palo, según la Metodología Mesoca

Fuente: Este Estudio

Al analizar la gráfica, se concluye que la autopurificación o depuración natural del río Palo es alta, con capacidad de soportar cargas diarias aproximadamente de 83 mil Kg/d de DBO₅, en su parte baja final, la cuenca presenta la mayor capacidad, manifestando una gran dilución y disponibilidad de oxígeno disuelto, en todos los tramos analizados del río.

Estos resultados tan altos se pueden explicar a partir del aumento del caudal, porque la determinación de la capacidad de carga del río es directamente proporcional a este parámetro, iniciando con un caudal de 5 m³/s en la Bocatoma Cedelca y entregando aproximadamente 12 m³/s de agua al río Cauca.

Por lo anterior el oxígeno disuelto permisible, en los tres primeros tramos se mantendrán por encima de 6 mg/L, manteniendo un déficit de oxígeno considerable (oxígeno de saturación reportados en estos tramos entre 9,3 y 7,9 mg/L) para crear las condiciones favorables que den sostenimiento a los ecosistemas acuáticos y además pueda ser destinada a diferentes usos, mientras que para los tramos posteriores el oxígeno disuelto permisible podrá llegar como mínimo a 4 mg/L, destinada a la conservación de la flora y la fauna. Por ello se entiende que en los tramos IV y V se podrán verter en mayor proporción cargas orgánicas tal como lo muestra la Metodología Mesoca, lo que se convierte en otra explicación de los resultados de ella.

Ahora bien, la metodología desarrollada por el MAVDT, presenta limitaciones en su aplicación, por su simplicidad, debido que únicamente tiene en cuenta los procesos, cambios y/o condiciones en un determinado punto o tramo, dejando a un lado las cargas puntuales, condiciones de mezcla o toma valores con profundidad de estudio como, lo son alturas, precipitaciones y/o temperaturas locales, que en su conjunto pueden generar variaciones en los resultados.

De lo anterior se deduce que la Metodología Mesoca es un método muy simple, que expone las cargas máximas de DBO₅ sólo en un punto, y únicamente se limita a las condiciones más desfavorables que fueron las realizadas en la campaña de verano de 2006.

De acuerdo a los resultados y al análisis anteriormente expuestos, se entiende que la mayoría de usuarios del río, pueden hacer sus descargas sin ningún tratamiento previo y que éste es capaz de autopurificarse, por lo tanto, se establece que estas capacidades de carga son altas para la corriente, por consiguiente, se toman como resultados NO válidos o NO aceptables, debido a que actualmente se están vertiendo cargas superiores a los 6 mil Kg/d de DBO₅, interfiriendo de manera negativa en la calidad de las aguas, por lo tanto, no es conveniente ni viable para prevención, reestructuración y aprovechamiento de los recursos naturales, reportar las metas de reducción de cargas, con estos resultados.

Por lo anterior, es apropiado buscar mejores resultados por medio de otros mecanismos, que permitan acercarse con mayor objetividad a la identificación de los procesos reales que se desarrollan en el río Palo.

Se eligió realizar y aplicar la modelación de corrientes superficiales, basada en las ecuaciones de Streeter y Phelps, por su eficiencia en los resultados, fácil manejo y por ser más accesible en cuanto a las condiciones de tiempo, recursos humanos, físicos, de equipamiento y costos económicos. Además porque la Corporación ya tiene unos antecedentes en la aplicación de este modelo.

8.6 MODELACIÓN POR STREETER Y PHELPS DEL RÍO PALO

El modelo aplicado en esta fase, se basa en las ecuaciones de Streeter y Phelps, que es uno de los primeros modelos desarrollados para predecir los efectos de las descargas de material orgánico sobre el oxígeno disuelto de un río o corriente de agua.

Para determinar los fenómenos de mezcla y asimilación de los contaminantes en el río Palo; en este modelo, se consideran entradas, salidas, cambios bioquímicos y físicos para reproducir las condiciones reales de la corriente; se dice que está calibrado cuando es capaz de determinar con precisión las características de campo y entonces se pueden realizar proyecciones del río para cambios por aumento o reducción de las cargas contaminantes.¹⁴

El empleo del modelo matemático se hará bajo tres etapas:

- a) Preparación del modelo a las condiciones hidrológicas (frecuencia de permanencia de caudales) y de infraestructura hidráulica (caudal, profundidad, área superficial y velocidad del agua), además recopilar información sobre calidad, cantidad y localización de las descargas o de las salidas, en los tramos seleccionados.
- b) Calibración del modelo a las condiciones de estiaje, que son las condiciones de calidad más desfavorables, para lo cual se seleccionan los valores de los parámetros dinámicos y cinéticos del modelo.
- c) Uso del modelo calibrado para estimar la respuesta de calidad de agua de los tramos seleccionados del río ante diferentes escenarios de manejo.

Para el desarrollo de la etapa a), se tuvo en cuenta: los datos reportados en las tablas 14 hasta la 19 que contienen las características dinámicas y cinéticas de la corriente, considerando el efecto de la temperatura y corrigiendo cada una de las constantes a las temperaturas del medio; la información del esquema tercero; sobre estadísticas de calidad y el anexo A del presente estudio. El modelo requirió de muchas variables y parámetros, las

cuales fueron identificadas y posteriormente seleccionadas las más importantes. Es así que fue necesario realizar balances de materia, para calcular concentraciones que requería el modelo, como datos de entrada. También se realizó un balance de energía, para la obtención de la temperatura de mezcla, luego de la descarga de todos los vertimientos presentes en el río, con la cual se estima la concentración de saturación de oxígeno.

Aunque NO se efectuó una calibración rigurosa del modelo, el desarrollo de la etapa b, se realizó bajo las condiciones de estiaje en los parámetros de DBO₅ y de OD del 10 del agosto de 2006, a partir de valores promedios de intervalos de confianza. Las desviaciones estándar para ellos, se estimaron de la siguiente manera:

Para la DBO₅, $\sigma = 0.100 (\text{Valor teórico de DBO}) + 0,547 \text{ mg/L}$

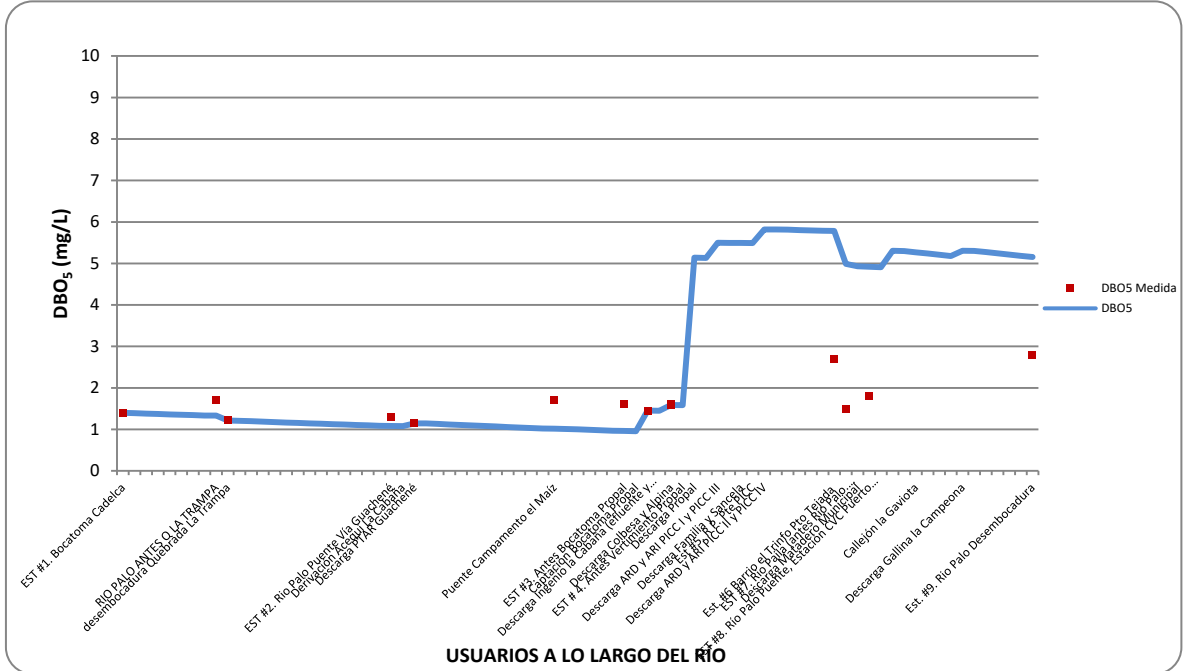
Y para el caso del Oxígeno Disuelto, se admitió que el modelo arroje resultados que se encuentren en $\pm 1,0 \text{ mg/L}$ alrededor el valor observado en cada estación de muestreo.

En la aplicación del modelo, que constituye la etapa c, se utilizaron las cargas promedio industriales y domésticas, en las condiciones de estiaje desde el 2006 hasta el 2008 y bajo ellas, se realizaron pronósticos de condiciones de bajo caudal, con aumento de cargas contaminantes, para llegar a un oxígeno disuelto de 4.0 mg/L, convirtiéndose en una herramienta de planeación para el manejo y administración de la corriente.

Bajo las mismas condiciones de la Metodología Mesoca, se observó el comportamiento del modelo, cuyos resultados obtenidos se reportan en las gráficas 18 y 19, de DBO y OD respectivamente.

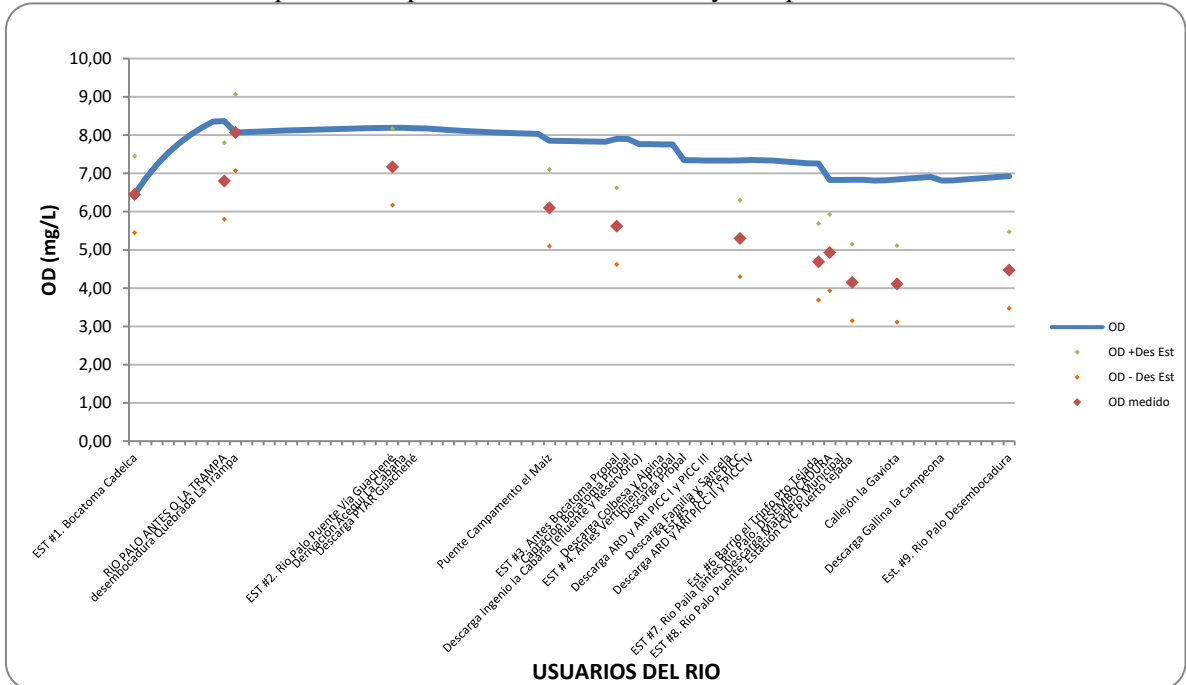
Presentación del Modelo con constantes determinada por literatura

Gráfica 19. DBO₅, Representada por el modelo de Streeter y Phelps con constantes de literatura



Fuente: Este Estudio

Gráfica 20. OD, Representada por el modelo de Streeter y Phelps con constantes de literatura



Fuente: Este Estudio

Con base en los resultados de la caracterización del río en tiempo seco, se realizó la reproducción del modelo, con las constantes de transformación de la materia orgánica y de reaeración para cada tramo definido del río Palo, determinadas en la Metodología Mesoca, a partir de Coeficientes o Constantes Cinéticas encontrados en literatura.

Los resultados muestran que hay una zona de baja contaminación entre la bocatoma de CEDELCA y la bocatoma de PROPAL (Tramos 1, 2 y 3), caracterizada por concentraciones de oxígeno disuelto siempre superiores a 5 mg/L y concentraciones de DBO₅ menores de 1.5 mg/L. A partir de la bocatoma de Propal II, se inician las descargas industriales (Tramo 4) ocasionando un aumento importante en la concentración de DBO₅ y con ello, un descenso continuo del oxígeno disuelto, hasta la desembocadura en el Río Cauca; el Tramo 5, después de la confluencia del río Paila, no presenta una recuperación del oxígeno disuelto, ni descenso importante de la DBO₅. Las concentraciones tienden a mantenerse constantes en este tramo.

Es de entender que el modelo bajo estas condiciones, refleja una sobreestimación en las constantes de aireación y de remoción de DBO, demostrado en las gráficas, porque los valores arrojados por él, siempre se encuentran por encima de los encontrados en campo. Por lo tanto se procede al proceso de calibración, de tal forma que coincidan los valores determinados en campo, con los arrojados por el modelo.

Calibración del Modelo

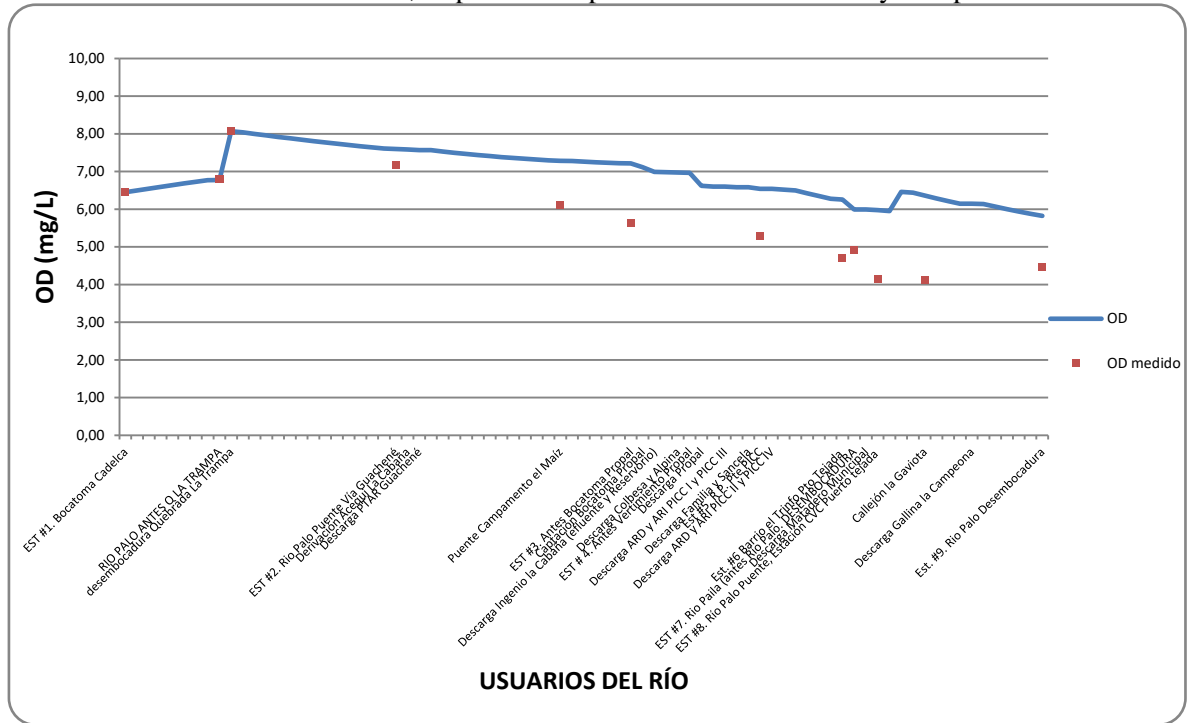
Para esta etapa, se estimaron inicialmente las constantes, teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos reportadas en la literatura y se definieron los que más se ajustaron a la gráfica. Por consiguiente, se determina que los valores que mejor representan la secuencia de los resultados obtenidos en el campo, son los reportados en la tabla 20.

Tabla 20, Constantes tomadas para la Calibración

TRAMO	Kr	K2
I	0,10	2,00
II	1,20	1,00
III	2,90	1,00
IV	3,00	1,00
V	2,50	1,00

Fuente: Este Estudio

Gráfica 24. Gráfica de OD, Representada por el modelo de Streeter y Phelps sin PICC



Fuente: Este Estudio

Como puede observarse en las gráficas 23 y 24 de DBO₅ y OD sin efluentes industriales como las de los PICC precisamente, sigue la misma tendencia de los resultados anteriores, pero con una mejor aproximación al comportamiento de estas dos variables, en relación a los datos de campo del río Palo y en relación a las gráficas anteriormente analizadas. Esta suposición puede explicarse, si se tiene en cuenta que las descargas industriales de los Parques son por bombeo una o dos veces al día y son de tipo instantáneo, las cuales pueden distorsionar y dificultar su representación con el modelo y no verse reflejadas en las campañas de monitoreo realizadas.

Sin embargo, se sigue apreciando la sobreestimación de la constante de reaireación, en los tramos IV y V, por consiguiente el modelo muestra algunas limitaciones porque no logra representar adecuadamente los fenómenos existentes en el río Palo, de acuerdo a los datos que sirvieron como guía y soporte para las condiciones más desfavorables. Sin embargo se puede obtenerse que los resultados reflejados por el modelo sean verdaderos, porque la contaminación que aportan los diversos vertimientos a las aguas del río, como los de la industria de celulosa y papel – Propal, pueden aumentar y mantener en determinados momentos la DBO₅ niveles altos de contaminación.

Escenarios de aplicación de los modelos

Una vez calibrado el modelo propuesto y confirmada la validación del mismo, se realizaron las corridas iterativas de este; primeramente se hizo una verificación de caudales mínimos multianuales de verano, registrados en los diferentes estudios de la CRC en la Cuenca Palo, y tomando como base el caudal mínimo promedio anual reportado en el estudio de Ingesam 2002, en Bocatoma Cedelca, de 7300 L/s debido a que es el más acorde a la realidad, y luego, se plantearon los escenarios a partir de situaciones reales e ideales, que se describen a continuación:

Escenario 1:

Considera un caudal base para los meses de estiaje (junio, julio y agosto) conforme a las precipitaciones de la cuenca Palo, registradas en la tabla 1 del anexo A, Además se reportan los promedios de los parámetros de T°, OD y DBO₅, las estadísticas de calidad de aguas del río (2005-2008) y a partir de ellas se conforma este escenario.

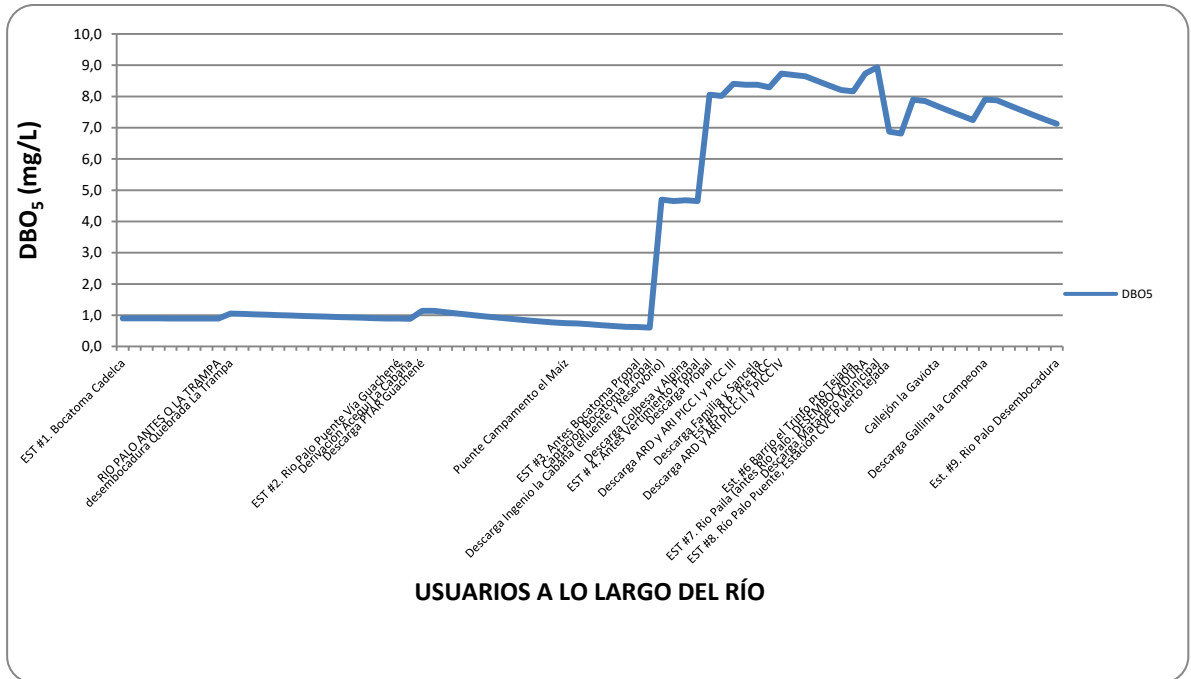
Escenario 2:

Según el criterio de calidad establecido por el decreto 1594 de 1984, sobre preservación de flora y fauna, el Oxígeno Disuelto debe ser de 4mg/L, por lo tanto para este escenario se adoptará ese criterio de calidad, para encontrar las cargas máximas permisibles de DBO₅, en cada uno de los tramos seleccionados.

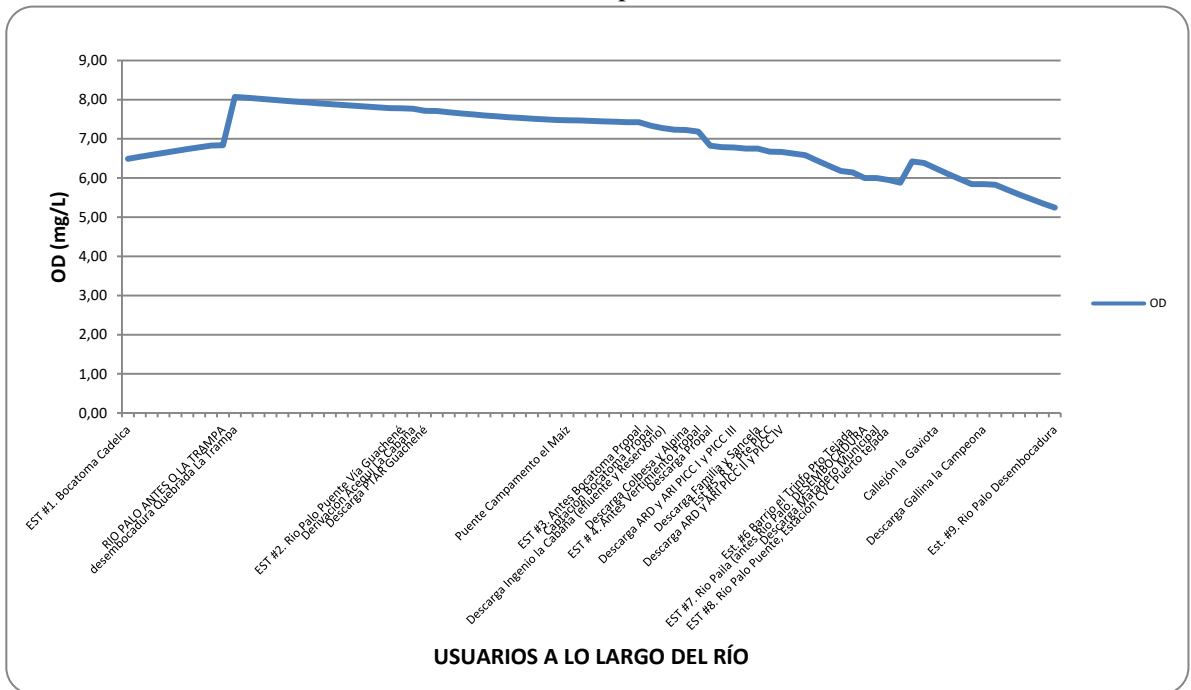
A continuación se reportan los resultados, de los anteriores escenarios.

Resultados del escenario 1

Gráfica 25. Modelación de DBO₅, con datos promedios desde el 2004 hasta el 2008



Gráfica 26. Modelación de OD, con datos promedios desde el 2004 hasta el 2008



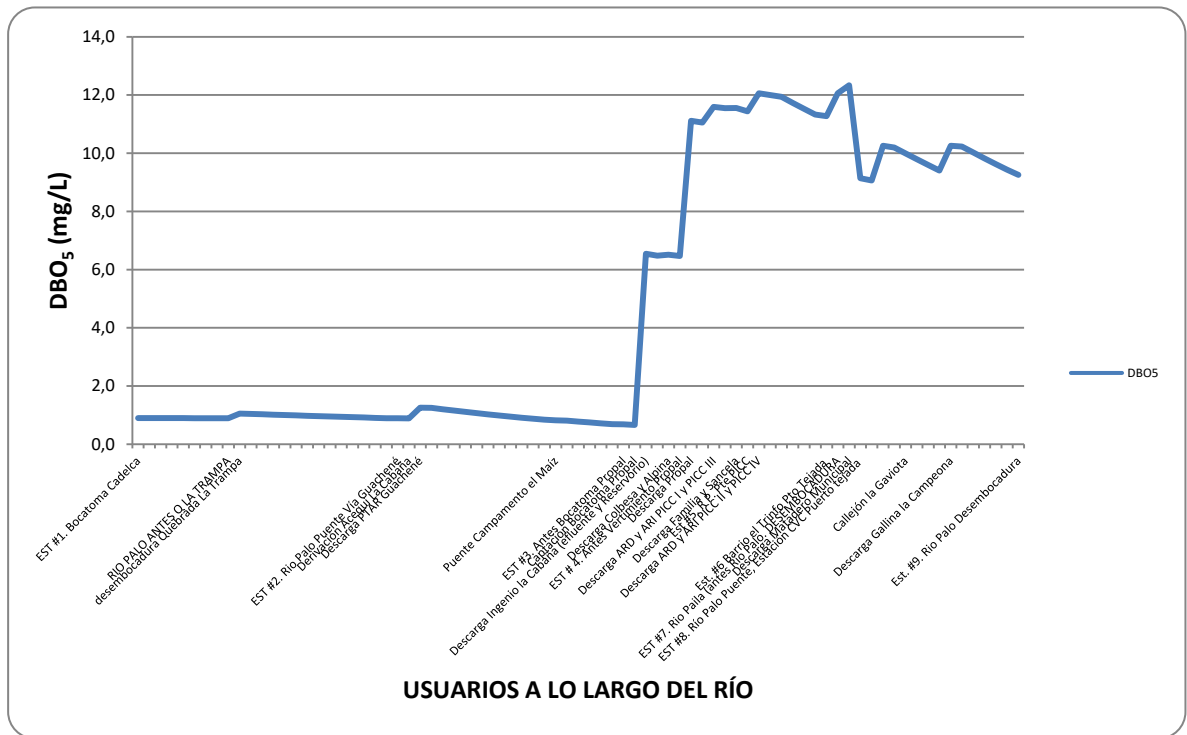
Fuente: Este Estudio

Por lo anterior, para llegar al límite permisible de 4.0 mg/L de oxígeno disuelto, para la conservación de la flora y la fauna, estimado por el decreto 1594 de 1984, se requerirían aumentos de cargas contaminantes, según este estudio. Para llegar a esta concentración, se realizaron aumentos en porcentajes de caudal, debido a que este parámetro es directamente proporcional a las cargas contaminantes y a sí, obtener las metas de calidad.

En las gráficas 27 y 28, se reportan los resultados de DBO₅ y OD, respectivamente, con el aumento de las cargas para llegar al límite permisible.

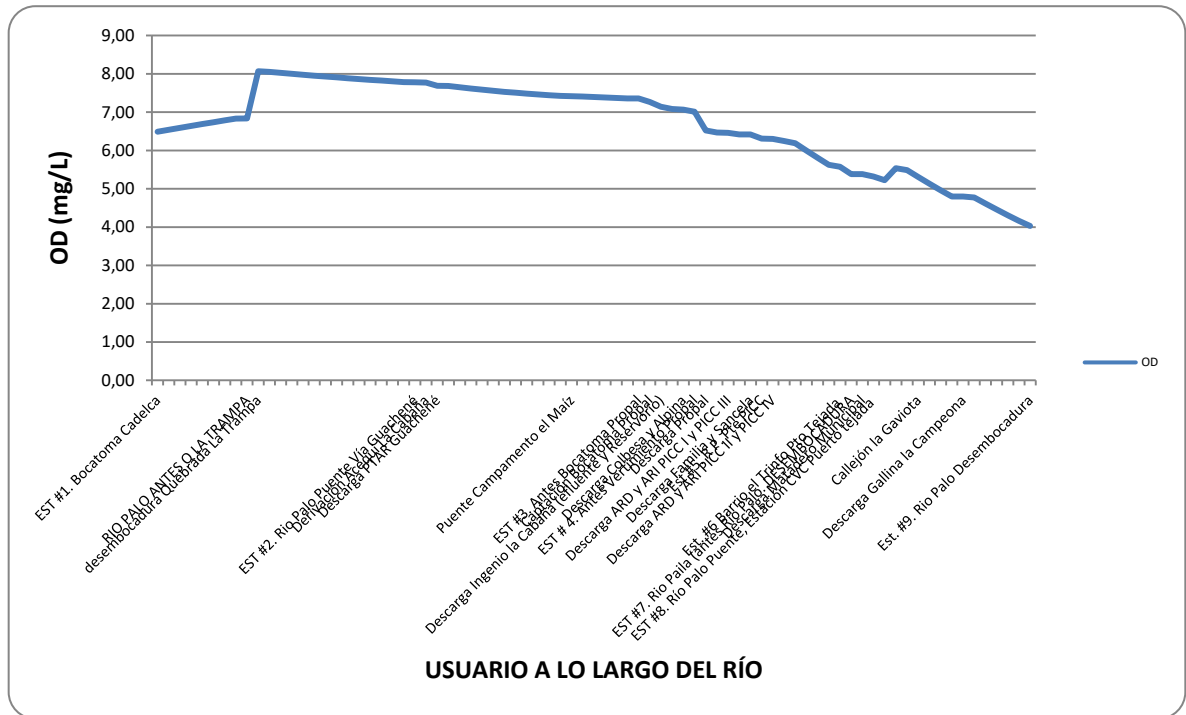
Resultados del escenario 2

Gráfica 27. Modelación de DBO₅, con incremento



Fuente: Este Estudio

Gráfica 28. Modelación de OD con incremento



Fuente: Este Estudio

En este procedimiento, se evidencia que la fuente estudiada, río Palo, receptora de la mayoría de vertimientos industriales, municipales y agrícolas del departamento del Cauca, dispone de una reserva de oxígeno disuelto bastante grande, con una capacidad de dilución y autopurificación significativa, evitando la generación de condiciones anóxicas e indeseables en los tramos estudiados.

Lo anterior, porque al comenzar a aumentar las cargas contaminantes sobre el río Palo, se determina que se necesitaría incrementar en un 45% el caudal de los vertimientos industriales que llegan a la corriente, para alcanzar el nivel mínimo, en cuanto a la conservación de la flora y la fauna, establecido en el decreto 1594 de 1984.

Es de esperar, que al aumentar el caudal, la carga orgánica lo hiciera en igual proporción, como también, que en el tramo más intervenido, se agudizara la problemática de contaminación, como se refleja en la grafica 27, la cual sobrepasa los 10 mg/L, que es un indicativo de contaminación de aguas del río según la tabla 13. Ésta gráfica sigue la tendencia de las anteriormente analizadas, mostrando poca contaminación al inicio, e ir incrementándola a medida que avanza el río, y recibiendo mayor cantidad de materia orgánica en el tramo más intervenido que es el cuarto.

De igual forma, y de manera análoga en correlación a estos dos parámetros analizados, DBO y OD, se evidencia el abatimiento del oxígeno disuelto, revelado en la gráfica 28, que muestra la misma tendencia con que se inició en la calibración del modelo. Con oxígeno abundante capaz de sostener los ecosistemas acuáticos y de conservar las formas de vida de este recurso, en los primeros tramos, y mientras que el río avanza, en distancia la concentración de este parámetro va disminuyendo, por las causas anteriormente expuestas.

NOTA: Los resultados completos del proceso de calibración del modelo “*Reducción de oxígeno*” basado en las ecuaciones de Streeter y Phelps, para el Río Palo en temporada de estiaje, se pueden observar en el archivo del CD, del libro de Excel, con el nombre de “Modelación de Palo”. CD/Modelación/hoja de Excel “modelación de Palo”.

8.7 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE MODELACIÓN DEL RIO PALO

Al analizar la DBO₅ en el río Palo, se evidencia que este parámetro es bajo en los primeros tramos, porque no hay materia orgánica presente para que se de el consumo de oxígeno por parte de las bacterias anaeróbicas, infiriendo que los procesos de aireación o reoxigenación son mayores a los de desoxigenación o de remoción de DBO, y por lo tanto su proximidad al oxígeno de saturación, las definen como aguas bajas en contaminación, con valor ecológico apreciable y admisibles para cualquier uso.

Al evaluar los promedios estadísticos de los parámetros regulados por la normatividad en todo el trayecto estudiado del río Palo, se deduce que presenta condiciones aerobias, es decir, condiciones de contaminación baja, capaces de sostener las formas superiores de vida acuática; sin embargo es de entender, que mientras mayor sea la cantidad orgánica presente en el agua, mayor será el requerimiento de oxígeno¹⁵, como lo explica el comportamiento de las gráficas anteriores de calibración y modelación de DBO y de OD; en ellas se evidencia, que a partir del tramo cuarto es donde se presenta la mayor incorporación de material orgánico por efectos de la zona industrial, como también se observa el abatimiento de oxígeno disuelto, reflejándose así lo establecido por Tchobanoglous -2000 quien sustenta que la DBO₅ es una medida de oxígeno, que usan los microorganismos para descomponer la materia orgánica; si hay una gran cantidad de desechos orgánicos en el suministro de agua, también habrá muchas bacterias presentes que realicen el proceso de descomposición. En este caso, la demanda de oxígeno será alta (debido a todas las bacterias), así que el nivel de la DBO será también alto.

El comportamiento de las condiciones del río en cuanto a estos dos parámetros, se puede describir de la siguiente manera: el río Palo antes de llegar al sector industrial tramos I, II y III, se considera como una fuente limpia debido a que posee concentraciones de DBO bajas

y de OD altas, con condiciones para la vida acuática¹⁶, en el tramo tercero, dónde recibe la primera descarga doméstica de la PTARD Guachené, el río es capaz de asimilarla y diluirla de tal manera que no presenta alteraciones en sus características físicas y químicas, luego, cuando el río empieza a recorrer la zona industrial, recoge las descargas del Ingenio la Cabaña, la Industria de Papel Propal, Industria Familia y Sancela, los Parques Industriales y Comerciales Etapas I, II, III y IV, entre otras, que en su conjunto le proporcionan cargas contaminantes que hacen que este tramo se convierta en una zona de descomposición¹⁷; según Nemerrow –1998, la adición de una carga de DBO₅, producida por un incremento en los vertimientos orgánicos exige mayor actividad bacteriana, más oxígeno y una mayor capacidad de sostenimiento de ecosistemas, por lo tanto en este tramo se hace notorio el aumento de este parámetro. Sin embargo, por las características hidráulicas del río, éste no llega aún, a condiciones anóxicas o a convertirse en una zona séptica. También es notable que el Río La Paila sirve como fuente de dilución y de recuperación, dada la tendencia leve a mejorar varios de los parámetros, dejando la presión sobre él y mejorando el proceso de degradación de la materia, considerándolo como tramo de recuperación, sin embargo en el trayecto no alcanza las condiciones iniciales para poder lograr la recuperación completa de las aguas y poderlas catalogar al mismo nivel que en los primeros tramos.

Ahora bien, al comparar los datos modelados con los de campo en cuanto a los parámetros que se han venido analizando, el modelo representa de manera congruente los dos primeros tramos, encontrándose dentro del margen de desviación, con errores en la calibración sin PICC de 0.0% en la Bocatoma Cedelca para los dos parámetros y en la Estación #2 Puente Vía Guachené de 18,9% y 6.0% de DBO₅ y de OD respectivamente, tal como lo muestran las gráficas 23 de DBO₅ y 24 de OD. A medida que se avanza dentro de los 40 Km desde la Bocatoma Cedelca hasta la desembocadura al Cauca, se observa que desde el tramo tercero, el modelo no representa adecuadamente los datos de campo, presentando sobreestimación en las constantes de remoción y de reaeración con errores desde 62,2 y -212.2% de DBO₅, en la Estación #3 Bocatoma Propal y en la Estación #7 río Paila antes desembocadura a Palo respectivamente y de OD de 28,30 y 54,78% en la Estación #3 Bocatoma Propal y en Callejón la Gaviota respectivamente.

La incertidumbre que presenta el modelo, puede relacionarse en las limitaciones en los datos disponibles para el cálculo de constantes cinéticas, además que las ecuaciones empleadas han sido formuladas a partir de ríos de otros países, como Estados Unidos, entre otros, como también los valores de las constantes sugeridos por literatura, porque cada corriente presenta procesos físicos, químicos y biológicos propios que determinan el valor de cada parámetro.

Otro factor que se le atribuye al incremento de la incertidumbre del modelo, es que la contaminación con materia orgánica, provocada por la descarga de las industrias, es posible que algunos contaminantes de los vertimientos industriales inhiban los procesos biológicos o químicos de la degradación de la materia orgánica favoreciendo las condiciones de DBO₅ del río, lo que no permite detectar de manera analítica las concentraciones verdaderas en el sistema hidrológico, sin embargo buscando una evidencia para este error, esto se puede explicar por la falta de modelación de cargas contaminantes provenientes de fuentes dispersas, las cuales contribuyen en materia orgánica al río y por lo tanto en la disminución del OD, situación que podría justificar el tamaño del error en los tramos IV y V, o también puede ser explicada según Neverrow -1998, debido a que no toda la materia disuelta o coloidal orgánica se oxida en la misma proporción, con la misma facilidad o al mismo grado, la proporción de la descomposición de la materia orgánica industrial puede ser, por tanto, más lenta o rápida que las aguas residuales o urbanas, a modo de ejemplo los azúcares se descomponen más rápidamente que los almidones, las grasas o los aceites, y la industria papelera sobre el río Palo es el claro ejemplo de que maneja una DBO₅ lenta, como se observa en las gráficas de esta fase.

La variación de la concentración de oxígeno disuelto es inversamente proporcional con el aumento de la temperatura, y como el cuerpo de agua del río Palo pertenece a una zona de clima cálido, esto puede explicar el hecho de que el modelo no pueda representar bien los procesos biológicos de oxidación de la materia orgánica.

Otra explicación para el error del modelo basado en las ecuaciones de Streeter y Phelps, es que las descargas son de manera continua, mientras que en la realidad se dan de forma intermitente o esporádica lo que se refleja en el aumento de la carga orgánica y que en comparación con los datos tomados como guía para el desarrollo de la modelación, no se vean reflejados correctamente por el modelo.

Los resultados de simulación son contundentes. Desde el punto de vista de la calidad del agua de la fuente receptora, del análisis de los usos potenciales del agua de acuerdo a los estándares vigentes y de los impactos ambientales causados en la fuente receptora, no se requeriría un mayor tratamiento de las aguas residuales de los usuarios del río Palo. Sin embargo debido a las condiciones locales se recomienda estudiar la fuente receptora con mucho más detenimiento.

8.8 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DE CALIDAD

Relacionando la información general del río Palo, anteriormente descrita, con los resultados de la modelación de aguas y la información de estadísticas promedio en las estaciones en

condiciones más desfavorables en el sistema hidrológico, se definen a continuación los Objetivos de Calidad por Tramos estudiados, identificando el uso predominante y el uso potencial, confrontados con la normatividad.

De igual manera, para la definición de estos Objetivos, se tiene en cuenta las cargas máximas permisibles al río Palo, basadas en el análisis de los resultados del modelo aplicado, de tal manera que se correlacionen con la fase de calidad anteriormente expuesta.

Tramo 1. Bocatoma Cedelca – Confluencia Quebrada La Trampa

Uso predominante: Generación de Energía y Consumo Doméstico

Uso potencial: Consumo doméstico

Tabla 21. Objetivos de Calidad para el Tramo 1

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
OD	mg/L	6,49	>4,0 RAS	7,0	>6,0	No existen límites normativos para OD para uso doméstico. Sin embargo, el RAS contempla valores > 4mg/l para fuentes aptas para abastecimiento previo tratamiento.
DBO ₅	mg/L	0,9	<5,0	<2,0	<2,0	Aguas con más de 5,0 mg/l, son problemáticas para potabilización, sin embargo se establece 2.0 mg/l como objetivo, con el fin de mantener las condiciones actuales de la corriente.
SST	mg/L	14,13	Sin norma	0,0-20	20	No existen normas. El objetivo se estableció con relación al comportamiento de la corriente en los últimos años.
Olores Agresivos	Presente/ausente	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	El Decreto 1594/84 establece que para el uso estético del agua no se deben presentar olores ofensivos.
pH	Unid	7,07	5-9	5-9	5-9	El decreto 1594 señala que para consumo humano previo tratamiento el pH debe estar entre 5-9
°T	°C	17,96	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	Por normatividad se requiere que la temperatura del agua esté +/- 5°C, de la del ambiente para conservar los ecosistemas.

Fuente: Este Estudio

Tramo 2. Confluencia Quebrada La Trampa – Descarga Ptar. Guachené

Uso predominante: Agrícola y recreativo

Uso potencial: Recreativo

Tabla 22. Objetivos de Calidad para el Tramo 2

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
<i>OD</i>	<i>mg/L</i>	5,69	>5,0	6,0	>5,0	Según referencias de la metodología presentada por el MAVDT, se establece una concentración cercano o al límite de saturación de oxígeno para uso recreativo, sin embargo el objetivo se establece con base en la calidad actual del cuerpo de agua.
<i>DBO₅</i>	<i>mg/L</i>	0,98	<5,0	<2,0	<2,0	Según referencias de la metodología presentada por el MAVDT, se establece una concentración mínima de 5mg/L para uso recreativo, sin embargo el objetivo se establece con base en la calidad actual del cuerpo de agua.
<i>SST</i>	<i>mg/L</i>	27,05	Sin norma	0,0-30	0,0-50	No existen normas. El objetivo se estableció con relación al comportamiento de la corriente en los últimos años.
<i>Olores Agresivos</i>	<i>Presente/ausente</i>	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	El Decreto 1594/84 establece que para el uso estético del agua no se deben presentar olores ofensivos. Según la Metodología Mesoca el agua debe ser clara y sin materia visible de aguas negras.
<i>pH</i>	<i>Unid</i>	7,38	5-9	5-9	5-9	El decreto 1594 señala que para consumo humano previo tratamiento el pH debe estar entre 5-9

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
°T	°C	22,0	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	Por normatividad se requiere que la temperatura del agua esté +/- 5°C, de la del ambiente para conservar los ecosistemas.

Fuente: Este Estudio

Tramo 3. Descarga PTAR D. Guachené – Bocatoma de Propal

Uso predominante: Industrial

Uso potencial: Industrial

Tabla 23. Objetivos de Calidad para el Tramo 3

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
OD	mg/L	5,99	>2,0	>6,0	>5,0	Un nivel de OD por encima de 2mg/l, contribuye a la reducción de olores, se propone 5mg/L como objetivo de calidad de acuerdo a las condiciones actuales medidas en la corriente.
DBO ₅	mg/L	1,41	Sin norma	<2,0	<5,0	Según referencias de la metodología presentada por el MAVDT, se establece una concentración máxima de 30mg/l para uso estético, sin embargo el objetivo se establece con base en la calidad actual del cuerpo de agua.
SST	mg/L	32,81	<1000, no perceptibles a los sentidos	<80,0	<80,0	Al no existir referencias, el objetivo se estableció con base en el comportamiento de la corriente en los últimos años.
Olores Agresivos	Presente/ausente	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	El Decreto 1594/84 establece que para el uso estético del agua se deben eliminar los olores ofensivos, lo cual se logra mediante el aumento del nivel de Oxígeno disuelto en el agua.

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
pH	Unid	7,27	4,5-8,5	4,5-8,5	4,5-8,5	El decreto 1594 señala que para consumo humano previo tratamiento el pH debe estar entre 5-9
°T	°C	22,27	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	Por normatividad se requiere que la temperatura del agua esté +- 5°C, de la del ambiente para conservar los ecosistemas.

Fuente: Este Estudio

Tramo 4. Bocatoma de Propal – Confluencia R Paila

Uso predominante: Receptor de ARD y ARI

Uso potencial: Receptor de ARD y ARI

Tabla 24. Objetivos de Calidad para el Tramo 4

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
OD	mg/L	5,76	Sin norma	>4,0	>4,0	No existen límites en la normatividad colombiana para OD. Sin embargo, en algunas referencias bibliográficas se recomienda un nivel mínimo de 2mg/L.
DBO ₅	mg/L	5,12	25-30	<10	<10,0	Según referencias de la metodología presentada por el MAVDT, la DBO debe estar entre límites de 25 a 30, sin embargo este objetivo se opta por la calidad de agua del cuerpo según los registros históricos.
SST	mg/L	52,07	40-80	<80,0	<80,0	El objetivo se estableció con base en los valores de referencia y en el comportamiento de la corriente en los últimos años.
Olores Agresivos	Presente /ausente	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	El Decreto 1594/84 establece que para el uso estético del agua se deben eliminar los olores ofensivos, lo cual se logra mediante el aumento del nivel de Oxígeno disuelto en el agua.

<i>pH</i>	<i>Unid</i>	7,12	5,0 – 9,0	5,0 – 9,0	5,0 – 9,0	El decreto 1594 señala que para consumo humano previo tratamiento el pH debe estar entre 5-9
<i>°T</i>	<i>°C</i>	22,18	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	Por normatividad se requiere que la temperatura del agua esté +/- 5°C, de la del ambiente para conservar los ecosistemas.

Fuente: Este Estudio

Tramo 5. Confluencia R Paila – Desembocadura en el R Cauca

Uso predominante: Agrícola

Uso potencia: Agrícola

Tabla 25. Objetivos de Calidad para el Tramo 5

PARÁMETRO	UNIDAD	ÍNDICE			OBJETIVO DE CALIDAD	NOTA DE SUSTENTACIÓN
		ACTUAL	NIVEL TÉCNICO O NORMATIVO	DESEADO		
<i>OD</i>	<i>mg/L</i>	4,9	>4,0	>4,0	>4,0	No existen límites en la normatividad colombiana para OD. Sin embargo, en algunas referencias bibliográficas se recomienda un nivel mínimo de 2mg/L.
<i>DBO₅</i>	<i>mg/L</i>	3,05	<5,0	<10,0	<10,0	Según referencias de la metodología presentada por el MAVDT, valores >20mg/L, no son recomendados para el uso agrícola. Sin embargo se opta por los registros históricos para mantener la calidad del agua.
<i>SST</i>	<i>mg/L</i>	58,64	Sin norma	<100	<100	El objetivo se estableció con base en los valores de referencia y en el comportamiento de la corriente en los últimos años.

<i>Olores Agresivos</i>	<i>Presente/ausente</i>	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	El Decreto 1594/84 establece que para el uso estético del agua se deben eliminar los olores ofensivos, lo cual se logra mediante el aumento del nivel de Oxígeno disuelto en el agua.
<i>pH</i>	<i>Unid</i>	7,12	4,5-8,5	4,5-8,5	4,5-8,5	El decreto 1594 señala que para consumo humano previo tratamiento el pH debe estar entre 5-9
<i>°T</i>	<i>°C</i>	23,9	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	+/- 5 °C Temp Amb	Por normatividad se requiere que la temperatura del agua esté +- 5°C, de la del ambiente para conservar los ecosistemas.

Fuente: Este Estudio

Según los resultados de simulación, la corriente superficial, río Palo, posee gran capacidad de dilución de la carga contaminante que recibe diariamente, sin embargo los niveles mínimos de oxígeno disuelto como meta de calidad propuesta en el presente estudio, no será menor de 4,0 mg/L de OD y no mayor de 10 mg/L de DBO₅, con lo cual se busca la preservación y aumento de la calidad en las aguas en los tramos analizados.

La definición de objetivos en cuanto al parámetro de coliformes fecales y coliformes totales, no se realizaron debido que no se tienen estadísticas confiables, por lo tanto se deja a disposición de la Corporación a establecer el criterio que sea más adecuado.

El fin de la administración de la calidad del agua, realizado en la modelación y la definición de los objetivos de calidad propuestos anteriormente, es controlar las descargas de contaminantes, de tal modo que no se degrade las aguas del río Palo, hasta llegar a un punto inaceptable, inferior al natural del ambiente, es por ello, que de acuerdo a estos resultados de modelación, y el aumento de cargas, se estima que el río es capaz de soportar cargas máximas permisibles del orden de 9 mil Kg/d de DBO₅, en el tramo 4, cuyos resultados se reportan en la tabla 26.

Tabla 26. Cargas Máximas Permisibles

TRAMO	CARGAS DE DBO₅ (mg/L) VERTIDAS ACTUALES	CARGAS PERMISIBLES DE DBO₅ (mg/L)
1	-	-
2	-	-
3	132,56	192,21
4	6767,94	9353,56
5	201,68	292,43

Fuente: Este Estudio

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A manera de conclusión en cuanto a la calidad del agua analizada, desde los perfiles de calidad, los Índices de Calidad -ICA y los índices de Contaminación -ICO, se establece que el Río Palo, según el estudio, comienza en la bocatoma de la hidroeléctrica de Cedelca con agua de *buena calidad*, y que a medida que avanza, se van perdiendo sus características iniciales, hasta entregar sus aguas al Río Cauca con calidad *Regular*, es de resaltar que la sensibilidad que tienen los índices obedecen a la concentración de coliformes fecales, por consiguiente limita sus usos.

Es de anotar que la aplicación de ICAs e ICOs, se realiza de manera presuntiva debido a que el método de cuantificación de CT y CF, por parte del Laboratorio Ambiental de la CRC, no permite medir con precisión el grado de contaminación bacteriológica presente en las estaciones, en cada una de las campañas realizadas.

El deterioro de la calidad del río Palo, generalmente es ocasionado por las diferentes actividades socio-económicas que se realizan en la zona, como los cultivos tecnificados de caña de azúcar, extracción de material de construcción y recepción de aguas residuales domésticas e industriales.

De la Metodología MESOCA, propuesta por el MAVDT, se deduce que los resultados son poco confiables, pues determinaron que el río Palo era capaz de asimilar cargas mayores a los 80 mil Kg/d de DBO₅, infiriendo que los vertimientos actuales se pueden hacer sin ningún tipo de tratamiento y que aún así el río sostiene las formas de vida acuáticas; por lo tanto esta no se tuvo en cuenta para la definición de Objetivos de Calidad.

En cuanto a los Objetivos de Calidad propuestos en el presente estudio, se definieron en relación a la normatividad, a la modelación y a las concentraciones de los parámetros históricos en condiciones más desfavorables de la corriente, quedando como mínimo permisible en el tramo 5 llegar a un oxígeno disuelto de 4mg/L con una carga de 292Kg/d de DBO, mientras que para el tramo más intervenido (tramo 4) una carga máxima permisible de 9353Kg/d de DBO₅.

El río Palo en todo el trayecto analizado, no ha mostrado evidencia de insostenibilidad, debido a que el OD no es inferior al 5,0 mg/L, pero la mayor tendencia del deterioro de la calidad de sus aguas, se presenta en la parte baja desde el tramo IV que es dónde se presentan los vertimientos industriales.

La tendencia general del Oxígeno Disuelto, que se observa en la gráfica 25, es su agotamiento; en el punto de confluencia del agua captada por la hidroeléctrica, el oxígeno disuelto se encuentra próximo a su saturación, y en cuanto avanza el río, comienza su agotamiento de manera progresiva. Es de resaltar que el oxígeno disuelto cumple con la normatividad en todos los tramos analizados, superando los 5 mg/L, presentando así, una buena calidad para el desarrollo de la vida, por lo tanto se analiza que se podrían permitir mayores descargas de las actuales.

Los resultados arrojados por el *Modelo de Reducción de Oxígeno*, presentan una recuperación del cuerpo de agua analizado, en relación con los resultados de estudios anteriores, como los de Ingesam y la Universidad del Cauca. No obstante, se deja claro que el modelo aplicado en el presente trabajo es de simple manejo, no es dinámico en cuanto a variables y condiciones reales del río, además, fue realizado con ecuaciones que pudieron aumentar el grado de incertidumbre, por esto se recomienda a la Corporación, profundizar en esta modelación y mejorar las técnicas aplicadas en su desarrollo, con el fin de evitar desviaciones y/o llegar a conclusiones erróneas.

Según diversos estudios realizados en el río Palo, junto con este estudio, sus aguas tienen diversas destinaciones de sus aguas pasando desde consumo doméstico llegando hasta la destinación de preservación de flora y fauna, es decir debería mantenerse el oxígeno disuelto igual o superior a los 4 mg/L, para estar en cumplimiento con la normatividad y los objetivos de calidad anteriormente definidos

Los reportes de campo y de laboratorio, de las condiciones más desfavorables en el curso de agua del río Palo, del año 2006, que constituyeron el punto de partida y apoyo para el desarrollo de este trabajo, generan un cierto grado de incertidumbre, por ser datos que no son representativos de la realidad, en cuanto a sus características hidráulicas, físicas químicas y bacteriológicas; por lo tanto se recomienda a la CRC, revisar los mecanismos y procedimientos empleados en la obtención de los parámetros de campo y de laboratorio.

Para contrarrestar el efecto de contaminación por sólidos suspendidos, Turbiedad y Color que afectan en altas temporadas de lluvias, es necesario realizar programas de reforestación y revegetalización en las zonas más intervenidas de la cuenca Palo y sus riveras, con especial interés, en las zonas de asentamiento poblacional, como el caso de Puerto Tejada, pues allí se presenta la mayor intervención sobre la cobertura vegetal. Como también dar cumplimiento a los 30 m reglamentarios

Se recomienda también la capacitación a todo nivel de la población sobre el manejo, protección y preservación de los recursos naturales.

Se debe estudiar la necesidad de la implementación de PTARs para los vertimientos que llegan directamente a la fuente, como es el caso del matadero de Puerto Tejada con el fin de reducir la contaminación por materia orgánica sobre el recurso.

La evaluación de los sistemas de tratamiento, debe ser efectuada con un control más efectivo por la AAC, que garantice las eficiencias de remoción, contempladas en el decreto 1594 de 1984, teniendo en cuenta que la mayoría de las industrias que vierten al río Palo, son industrias que en la práctica han demostrado poco compromiso con la responsabilidad de contribuir a mejorar las condiciones ambientales del sector dónde operan.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 RESOLUCIÓN 0845, Expedida por la corporación Autónoma Regional del Cauca, 2006.
- 2 AGUIRRE GÓMEZ, Mauricio. Programa de Monitoreo de Vertimientos y Fuentes Hídricas Superficiales. Popayán, Febrero del 2008.
- 3 CARSUCRE, Objetivos de calidad en el río Pichilin, en el Municipio de Colocos Tolú, 2002.
- 4 En <http://www.crc.gov.co/docs/generalidades>. Febrero 2009
- 5 En <http://www.crc.gov.co/docs/generalidades>. Febrero 2009
- 6 FERNANDEZ P., Josue Nelson y SOLANO ORTEGA, Fredy. Índices de calidad y de Contaminación del Agua. Copyright, Colombia 2007.
- 7 CASTILLO, J y ESPINOZA, C. Modelo de Simulación para la Calidad de Agua en un Rio. 2005.
- 8 Ibid
- 9 OYARZÚN, Jessica Paola. Modelación y Simulación de Oxígeno Disuelto, Materia Orgánica y Relación Distribucional de Macroinvertebrados en La subcuenca del Río Traiguén. Universidad Catolica de Temuco. Temuco 2004, PDF.
- 10 Ibid
- 11 Asociación de Cabildos Indígenas del Norte del Cauca -ACIN, Corporación Autónoma Regional del Cauca –CRC. Estudio de Calidad de Agua Balance Hídrico y Morfometría en las Cuencas y Subcuencas de los Resguardos Indígenas del Norte del Departamento del Cauca. Convenio Interadministrativo. Santander de Quilichao Cauca 2005 - 2006.
- 12 Ibid.
- 13 Loucks, D *et al.*, Linear programming models for water pollution control, Management Science, 1967: P 14.
- 14 INGESAM. Estudio de modelación de la calidad del agua y disposición de cargas contaminantes sobre el Río Palo, Santiago de Cali, mayo de 2002.

15 TCHOBANOGLIOUS, George. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. McGraw Hill, Bogotá, 2000.

16 ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana De Ingeniería. Bogotá, 1999.

- 17 MACKENZIE L., Davis y SUSAN J., Masten. Ingeniería y Ciencias Ambientales Mac Graw-Hill, México 2005. P: 286.



Anexo B. REPORTE DE CALIDAD DE AGUA DEL RÍO PALO DEL 10 DE AGOSTO DE 2006

Reporte N° 0266



**CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA
SUBDIRECCIÓN DE DEFENSA DEL PATRIMONIO AMBIENTAL
LABORATORIO AMBIENTAL REPORTE DE RESULTADOS -MUESTRA DE AGUA**

Código: FT-TC-RR047
Versión: 01
Fecha:10/08/06
Pág. 1 de 4

Parámetro / Método

Parámetro	Método	Unidad
Color	Platino-Cobalto	UPC
Turbidez	Fotométrico	UNF
Nitratos	Acido clorhídrico	mg /L N
Fosfatos	Ácido Ascórbico	mg /L P
Nitrógeno Amoniacal	Azul de Indofenol	mg/L NH ₄ -N
Nitrógeno Total	Disgregación de Koroleff	mg N /L
Coliformes totales	Sustrato Definido	NMP Microorganismos/100ml.
Coliformes fecales	Sustrato Definido	NMP Microorganismos/100ml.
DBO ₂₀	Incubación 20 días - Electrométrico	mg/L
DBO ₅	Incubación 5 días - Electrométrico	mg/L
DBO ₅ - Filtrada	Filtración 0.45µm – Incubación 5 días – Electrométrico	mg/L
DQO	Oxidación Ácido Cromosulfúrico	mg/L
DQO - Filtrada	Filtración 0.45µm - Oxidación Ácido Cromosulfúrico-	mg/L
SST	Gravimétrico	mg/L
Grasas y Aceites	Soxhlet-Gravimétrico	mg/L



Resultados Laboratorio

Código Muestra	Parámetro								
	Color	Turbiedad	Nitratos	Nitrógeno Amoniacal	Nitrógeno Total	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	SST	Grasas y Aceites
W0506	21.2	2.0	0.96	0.11	1.2	16740	2550	12.3	*
W0507	25.1	4.0	1.01	< 0.01	*	20140	3840	89.1	*
W0508	5.6	< 1	0.16	0.02	0.9	9050	100	3.4	*
W0510	21.6	2.0	0.88	0.02	*	14.90	1730	29.2	*
W0511	21.2	2.0	0.90	0.12	1.0	77010	8130	39.5	*
W0512	*	*	*	0.03	*	>241920	>241920	35.6	6.4
W0513	21.6	2.0	0.90	0.26	*	16640	3090	18.9	*
W0514	21.7	1.0	0.89	0.14	1.0	*	*	32.0	*
W0515	*	*	*	0.04	9.0	77010	1460	115	9.7
W0509	*	*	*	0.03	*	77010	1990	100	11.5
W0516	47.6	10	2.19	0.06	*	*	*	35.1	7.3
W0517	*	*	*	32.30	*	120331	510	163	19.8
W0518	*	*	*	*	13.9	>241920	82970	72.8	16.1
W0519	73	4	1.50	0.40	*	92080	3950	34.5	*
W0520	*	*	*	0.41	*	*	*	295	*
W0521	*	*	*	0.22	*	*	*	250	*
W0522	27.5	3.0	1.43	0.78	1.7	*	*	66.0	*
W0523	80	9.0	1.28	0.21	0.9	87040	19350	171	*
W0524	22.1	3.0	1.22	0.29	*	>241920	86640	87.1	*
W0525	24.4	3.0	1.28	0.07	*	>241920	64880	99.7	*
W0526	24.9	3.0	1.30	0.47	1.6	120331	16070	62.1	*
W0527	*	*	*	10.5	*	155307	20350	34.8	
W0528	*	*	*	0.18	*	>241920	20360	82.2	17.9
W0529	*	*	*	0.09	*	>241920	15760	93.6	11.7



Código Muestra	Muestra sin Filtrar			Muestra Filtrada		
	Ortofosfatos	Ortofosfatos Hidrolizables	Fósforo Total	Ortofosfatos	Ortofosfatos Hidrolizables	Fósforo Total
W0506	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0507	< 0.01	0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0508	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0510	< 0.01	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0511	< 0.01	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0512	< 0.01	0.90	0.90	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0513	< 0.01	0.02	0.02	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0514	< 0.01	0.03	0.011	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0515	< 0.01	0.09	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0509	< 0.01	0.09	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0516	< 0.01	0.08	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0517	0.05	1.04	1.05	< 0.01	0.06	0.29
W0518	0.07	1.09	1.23	< 0.01	0.09	0.32
W0519	< 0.01	0.08	0.08	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0520	0.36	2.85	5.31	0.04	0.09	0.34
W0521	0.22	2.53	5.03	0.05	0.02	0.18
W0522	< 0.01	0.10	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0523	< 0.01	0.08	0.08	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0524	< 0.01	0.2	0.2	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0525	< 0.01	0.12	0.11	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0526	< 0.01	0.08	0.08	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0527	0.011	0.71	0.80	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0528	< 0.01	0.12	0.10	< 0.01	< 0.01	< 0.01
W0529	< 0.01	0.06	0.06	< 0.01	< 0.01	< 0.01



Resultados Laboratorio

Código Muestra	Parámetro				
	DBO ₅	DBO ₅ -Filtrada	DQO	DQO - Filtrada	DBO ₂₀
W0506	1.4	0.4	< 4	< 4	2.0
W0507	1.7	0.2	< 4	< 4	2.3
W0508	1.1	0.2	< 4	< 4	1.8
W0510	1.3	0.3	< 4	< 4	2.1
W0511	1.3	0.4	< 4	< 4	1.9
W0512	39	5.1	85	12	54
W0513	1.7	0.4	< 4	< 4	2.0
W0514	1.6	0.7	< 4	< 4	2.5
W0515	1.7	0.9	18	10	6.9
W0509	1.2	0.6	< 4	< 4	3.1
W0516	28	5.0	59	10	55
W0517	69	26.1	220	476	205
W0518	67	20.9	245	72	290
W0519	2.2	0.7	4.6	< 4	4.8
W0520	341	158	500	235	1170
W0521	261	139	400	221	720
W0522	2.7	0.8	9.3	< 4	5.5
W0523	1.5	0.5	< 4	< 4	2.0
W0524	1.8	0.7	4.3	< 4	3.8
W0525	2.1	1.1	< 4	< 4	4.6
W0526	2.8	0.6	< 4	< 4	4.7
W0527	80	0.5	176	< 4	138
W0528	9.4	3.2	21	7.0	21
W0529	18	6.2	43	15.4	30

OBSERVACIONES:

✓ Para la cuantificación de Coliformes totales y fecales se realizó una dilución de 100 veces la muestra.

DIEGO ZULUAGA VERA
Laboratorio Ambiental CRC