

**ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL RÍO UBATÉ POR
EL MODELO QUAL2K**

FELIPE SANTAMARÍA ALZATE

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
NOVIEMBRE, 2013**

**ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE OXÍGENO DISUELTO EN EL RÍO UBATÉ POR
EL MODELO QUAL2K**

FELIPE SANTAMARÍA ALZATE

**Proyecto de Grado en la modalidad de profundización para obtener el Título
de Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental**

Asesor

**Ing. JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
Director Especialización en Saneamiento Ambiental**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
NOVIEMBRE, 2013**

Nota de aceptación

Firma. Presidente del jurado

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D. C., Noviembre de 2013.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO.....	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. AREA DE ESTUDIO	12
3. MARCO CONCEPTUAL.....	19
4. METODOLOGIA	30
4.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES.....	30
4.2 CURVAS DE CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	36
4.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO	39
5. RESULTADOS.....	49
5.1 ESCENARIO 1. Condiciones actuales con caudales mínimos	49
5.2 ESCENARIO 2. Con tratamiento primario de los afluentes al río Suta	52
5.3 ESCENARIO 3. Con tratamiento secundario de los afluentes al río Suta.....	55
5.4 RESUMEN DE RESULTADOS.....	57
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE MAPAS

	pág.
Mapa 1. Subcuenca Río Hato o Alta Río Ubaté.....	13
Mapa 2. Subcuenca Río Suta	14
Mapa 3. Subcuenca Baja Río Lenguzaque.....	15
Mapa 4. Localización Puntos de Monitoreo río Ubaté – Suárez Cuenca Alta.....	31
Mapa 5. Localización Puntos de Monitoreo río Ubaté – Suárez Cuenca Alta.....	32

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Criterios de calidad según la clase [4].	18
Tabla 2. Estaciones de monitoreo	30
Tabla 3. Localización estaciones de monitoreo del río Ubaté	33
Tabla 4. Resultados campaña de 2009	33
Tabla 5. Estaciones Limnigráficas y Limnimétricas	33
Tabla 6. Valores de caudal mínimo mensual	34
Tabla 7. Registro de caudales, velocidad y profundidad Est. La Malilla.....	36
Tabla 8. Registro de caudales, velocidad y profundidad Est. Pte. Barcelona	37
Tabla 9. Datos calibración del modelo.....	41
Tabla 10. Constantes de calibración	48
Tabla 11. Resultados de la simulación OD y DBO.....	58

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización cuenca río Ubaté.....	17
Figura 2. Balance de Oxígeno.....	22
Figura 3. Curva SAG.....	27
Figura 4. Perfil de OD.....	35
Figura 5. Perfil de DBO.....	35
Figura 6. Curva característica Est. La Malilla.....	36
Figura 7. Curva característica Est. La Malilla.....	37
Figura 8. Curva característica Est. Pte. Barcelona.....	38
Figura 9. Curva característica Est. Pte. Barcelona.....	38
Figura 10. Perfil de referencia del río Ubaté.....	40
Figura 11. Curva de calibración del modelo.....	42
Figura 12. Datos de cabecera. Estación La Malilla.....	43
Figura 13. Datos de estaciones y puntos de muestreo.....	43
Figura 14. Entrada de datos de estaciones y puntos de muestreo.....	44
Figura 15. Entrada de coeficientes K1 y K2.....	44
Figura 16. Extracciones de caudal.....	45
Figura 17. Aportes de Caudal.....	45
Figura 18. Entrada de datos de caudal.....	46
Figura 19: Entrada de datos de parámetros de calidad.....	46
Figura 20. Curva de OD. Condiciones actuales.....	47
Figura 21. Curva de DBO. Condiciones actuales.....	48
Figura 22. Perfil escenario 1.....	49
Figura 23. Curva de OD para Qmin y condiciones actuales.....	50

Figura 24. Curva de DBO para Qmin y condiciones actuales.	51
Figura 25. Perfil escenario 2.....	52
Figura 26. Curva de OD para Qmin, 40% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta.....	53
Figura 27 Curva de DBO para Qmin, 40% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta.....	54
Figura 28. Perfil escenario 3.....	55
Figura 29. Curva de OD para Qmin, 80% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta.....	56
Figura 30. Curva de DBO para Qmin, 80% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta.....	57
Figura 31. Curvas de OD en todos los escenarios.....	57
Figura 32. Curvas de DBO en todos los escenarios.	58
Figura 33. Valores de OD mínimo de los escenarios modelados.....	58
Figura 34. Valores de DBO máximo de los escenarios modelados.....	59

GLOSARIO

AFLUENTE: agua, agua residual u otro líquido que ingrese a un río, reservorio o algún proceso de tratamiento.

AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA: desecho líquido proveniente de la actividad doméstica en residencias, edificios, instituciones y establecimientos comerciales.

AUTORIDAD AMBIENTAL: es la encargada de la vigilancia, recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso, aprovechamiento y control de los recursos naturales renovables y del medio ambiente.

CALIDAD DEL AGUA: es el conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas del agua.

CARGA CONTAMINANTE: resultado de multiplicar el caudal por la concentración de la sustancia contaminante.

CONTAMINACIÓN DEL AGUA: alteración de las características organolépticas, físicas, químicas, radiactivas y microbiológicas del agua, como resultado de las actividades humanas o procesos naturales, que producen o pueden producir rechazo, enfermedad o muerte al consumidor.

CUENCA: área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

CUERPO RECEPTOR: masa de agua natural o de suelo que recibe la descarga de un afluente final

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO): cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados. Se utiliza como un indicador de la contaminación por materia orgánica biodegradable. Se mide con el requerimiento de oxígeno, expresado en mg/l, que ejercen los microorganismos para oxidar materia orgánica carbonácea degradable en un periodo de 5 días, a una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

OXÍGENO DISUELTO (OD): oxígeno molecular presente en la columna de agua. El valor mínimo de oxígeno disuelto que representa condiciones adecuadas para la supervivencia de los peces es aproximadamente 4 mg/l, según el decreto 1594 de 1984.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL: conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales.

POLUCIÓN DEL AGUA: alteración de las características organolépticas, físicas, químicas o microbiológicas del agua como resultado de las actividades humanas o procesos naturales.

PUNTO DE DESCARGA: sitio o lugar donde se realiza un vertimiento.

SEDIMENTACIÓN: proceso físico de clarificación de aguas por efecto de la gravedad.

VALOR ADMISIBLE: valor establecido como permisible para la concentración de un componente o sustancia.

VERTIMIENTO: cualquier descarga final de un elemento, sustancia, compuesto que esté contenido en un líquido residual de cualquier origen, ya sea agrícola, minero, industrial, de servicios, aguas negras o servidas, a un cuerpo de agua, a un canal, al suelo o al subsuelo.

VERTIMIENTO NO PUNTUAL: aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al recurso. Tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares.

VERTIMIENTO PUNTUAL: aquel realizado en un punto fijo, directamente o a través de un canal u otro medio.

1. INTRODUCCIÓN

El río Ubaté se encuentra ubicado en el departamento de Cundinamarca y se le considera el principal tributario de la laguna de Fúquene, que a su vez pertenece a la gran cuenca del Ubaté-Suarez. Esta cuenca se caracteriza por ser un área de gran actividad lechera y de pastoreo, con gran demanda del recurso hídrico para sustentar la economía local y para abastecimiento de municipios como el casco urbano de Ubaté y veredas colindantes a lo largo de todo el río. Así mismo es fuente receptora de las descargas de aguas residuales domésticas e industriales y de la afluencia de ríos como el Lenguazaque y Suta.

En el capítulo 2 se resume las condiciones del área de estudio.

En el capítulo 3 se sintetiza el concepto de autopurificación de ríos de Streeter y Phelps y la norma de calidad de agua para la cuenca en estudio.

En el capítulo 4, se expone la calibración del modelo en estado estacionario, de acuerdo con el perfil de OD medido en el río.

En el capítulo 5 se presentan los resultados de la modelación para 3 diferentes escenarios, modificando valores de OD, DBO y caudales en estado estacionario.

Por último, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones pertinentes a los resultados de la modelación de los tres diferentes escenarios.

2. AREA DE ESTUDIO

La Cuenca del río Ubaté se halla en la parte norte del departamento de Cundinamarca y al sur occidente de Boyacá. El río Ubaté nace en el municipio de Carmen de Carupa, en la confluencia de los ríos Hato y La Playa. Sus principales afluentes son los ríos Suta y Lenguazaque. Alcanza un área de drenaje de 624.91 km², es el principal afluente de la laguna de Fúquene, eje de recolección de aguas en el valle. La cuenca presenta en su parte inicial una pendiente fuerte que comienza en la cota 3200 msnm que se va atenuando hasta llegar a una planicie a los 2530 msnm en la desembocadura en la laguna de Fúquene.

En la cuenca se encuentran asentamientos humanos de importancia como son los municipios de Leguazaque, Ubaté, Sutatausa, Carmen de Carupa, Tausa, Susa, Cucunubá, Suesca, Guachetá y Fuquene, siendo los primeros cuatro los de influencia directa sobre las características del estudio.

El área de estudio está conformada por tres subcuencas (mapas 1, 2 y 3).

1. Cuenca del río Hato o del alto Ubaté con un área de 223.15 km² en cuya cabecera se encuentra el nacimiento del Río Hato, a la altura del Páramo de Salinas, el cual es represado conformando el Embalse del Hato, cuya descarga drena hacia la parte media de la cuenca, en su recorrido recibe las aguas del río La Playa, punto desde el cual se continúa con el nombre de río Ubaté.
2. Cuenca del río Suta tiene un área de 113.14 Km², conformada por los ríos Agua Sal y Agua Clara en cuya confluencia se conforma el río Suta que le da el nombre a la cuenca, el río sirve de drenaje para los Municipios de Sutatausa y Ubaté.
3. La cuenca del Río Lenguazaque nace en la confluencia de la Quebrada Ovejeras y El Río Tibita, a la que corresponde un área de 288.62 Km², el río transcurre por los municipios de Lenguazaque y Guachetá, para luego tributar al igual que el Río Suta en el Río Ubaté conformando un solo cauce que tributa sus aguas a la Laguna de Fúquene.

Mapa 2. Subcuenca Río Suta



La distribución de la población en esta región es la siguiente:

Subcuenca	N° de Habitantes (hab)	Densidad (hab/Km²)
Río Lenguazaque	49556	37
Río alto Ubaté	93831	60
Río Suta	4530	40

La tabla anterior indica una presión más alta sobre el recurso en la cuenca alta.

Las principales actividades económicas de la región se basan en:

- Agricultura y siembra de papa, arveja, trigo y cebada.
- La mediana minería como la extracción de material pétreo como arenas y gravas, explotación de carbón y actividad extractiva de acilla para la fabricación de ladrillos.
- Ganadería, con el sostenimiento de ganado especializado en producción lechera y comercialización de razas bovinas.

El recurso hídrico del área de estudio está sometido a usos diversos: doméstico, pecuario y agrícola (riego), abrevadero, comercial y recreativo, entre otros.

HIDROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

La hidrología es de carácter bimodal para las tres subcuencas del río Ubaté.

Subcuenca	Época de llluvias	Precipitación media (mm)
Río Lenguazaque	Marzo-Junio y Octubre- Noviembre	870
Río alto Ubaté	Marzo-Junio y Octubre- Noviembre	785,22
Río Suta	Marzo-Junio y Octubre- Noviembre	723,58

Las condiciones de temperatura, humedad relativa, brillo solar y radiación solar en la cuenca del río Ubaté son homogéneas:

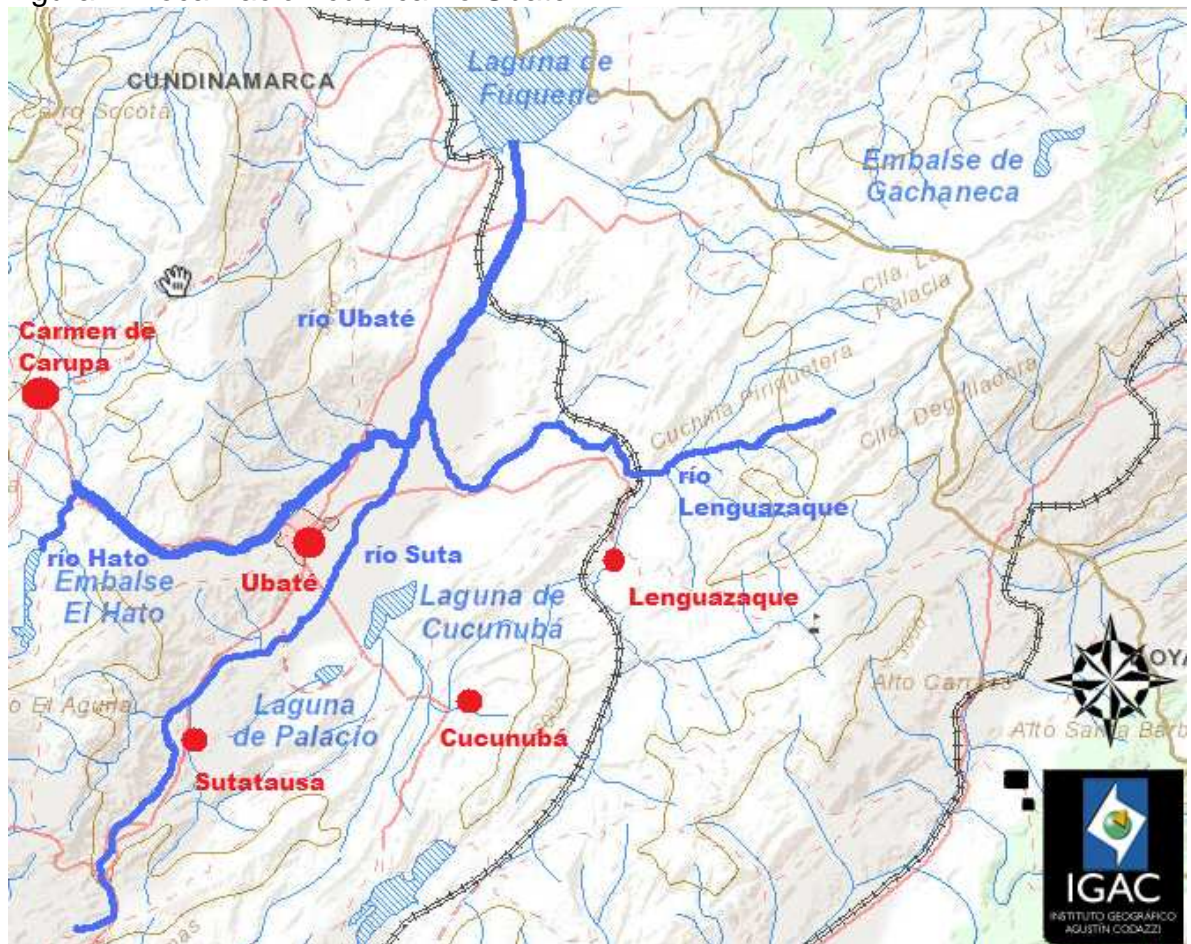
Parámetro	Dato
Temperatura	14°C
Humedad Relativa	70 %
Brillo Solar	157 h/d
Radiación Solar	471,5 cal/cm ²
Velocidad del Viento	2,0 m/s
Dirección del Viento	SE
Evaporación	22 mm - 30 mm

En concordancia con la hidrología la distribución de caudales es bimodal en las tres cuencas de estudio.

Subcuenca	Caudal Máximo (m ³ /s)
Río Lenguazaque	0,476
Río alto Ubaté	1,51
Río Suta	0,915

En la figura 1 se muestra la localización general de los tres ríos de la cuenca y de la laguna de Fúquene.

Figura 1. Localización cuenca río Ubaté.



Fuente: IGAC. [en línea] 2012. Disponible en Internet: < <http://geoportal.igac.gov.co/> />.

La Corporación Autónoma Regional –CAR- adelantó con los municipios pertenecientes a esta cuenca y mediante Resolución N° 3371 de 21 de octubre de 2010 [5], el inicio del proceso de mesas de consulta para establecimiento de

metas de carga contaminante puntuales de DBO5 y SST sobre los principales cuerpos de agua del área de estudio y así también dar cumplimiento a lo estipulado en los objetivos de Calidad del agua para esta cuenca a través de la Resolución 3462 de 28 de diciembre de 2009 [4], donde se definieron los límites de las sustancias precisadas según el uso del agua establecido, en la cual por medio de una clasificación por clases, se determinan las condiciones deseables para la calidad del agua en el año 2020. A continuación se presenta la tabla 1 con la clasificación de calidad.

Tabla 1. Criterios de calidad según la clase [4].

CLASE	DESCRIPCIÓN	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	OD (mg/L)	CT (NMP/100ml)
CLASE I	Corresponde a los valores asignados para uso humano y doméstico con tratamiento convencional, uso agrícola con restricciones y uso pecuario e industrial.	7	10	4	5000
CLASE II	Corresponde a los valores asignados para uso de consumo humano y doméstico con tratamiento convencional, preservación de Flora y Fauna, uso agrícola y pecuario.	10	20	>4	>20000
CLASE III	Corresponde a los valores asignados a la calidad de los embalses, lagunas y humedales y demás cuerpos lenticos, ubicados dentro de la cuenca del río Ubaté - Suárez	20	20	>4	>5000
CLASE IV	Corresponde a los valores de los usos de agua para usos agrícolas con restricciones y pecuarios	50	30	NA	>20000

3. MARCO CONCEPTUAL

Un río en condiciones normales, transporta oxígeno disuelto en tales cantidades que en él se mantiene un ecosistema rico y abundante en especies. Sin embargo si el río es sometido a una descarga de contaminación orgánica y no transporta un caudal con OD suficiente, capaz de absorber la carga contaminadora, se presenta una serie de condiciones que son representadas en cuatro zonas, descritas a continuación.

Zona de Descomposición. En esta zona, la descomposición de las aguas residuales inicia la disminución de OD. La turbiedad inhibe la radiación solar y las plantas verdes desaparecen. El agua se vuelve gris, disminuyen progresivamente las especies de organismos y proliferan las bacterias. Surgen los depósitos de lodos en el fondo del río y el crecimiento de lamas biológicas sobre las piedras. El límite de la zona se supone que se alcanza cuando el OD se reduce a un nivel de OD de 3 a 4 mg/L, considerándose este valor el límite crítico para los peces.

Zona de Descomposición Activa. En esta zona el oxígeno continúa disminuyendo y puede agotarse por completo hasta llegar a cero. La vida acuática se reduce a las bacterias anaerobias y a unas pocas especies de protozoos anaerobios. El agua se vuelve negra, surgen problemas de lodos flotantes empujados por la acción de los gases producidos en la descomposición anaerobia, malos olores y otros indicadores biológicos de polución. Eventualmente, se cumplirá el ciclo de descomposición cuando la re-aireación satisfaga el proceso de desoxigenación y aparezca nuevamente OD.

Zona de Recuperación. En esta zona empiezan a aparecer las plantas y la vida acuática a medida que la zona progresa. Continúa la recuperación del OD, y se pueden presentar compuestos de nitrógeno como el amoniaco y los nitratos; se considera que la zona termina cuando se restablece el contenido normal de OD del río.

Zona de Agua Limpia. El contenido de OD ha vuelto a su valor origen, la vida acuática se recupera y pueden subsistir bacterias patógenas y un número alto de bacterias. El contenido de sólidos disueltos es elevado; han aumentado los nitratos, los cloruros y los sulfatos, pero en general el río vuelve a ser útil. El punto más bajo de la curva de déficit de oxígeno representa el punto para el cual el agotamiento del sustrato permite a los procesos de reaireación suministrar oxígeno a una tasa más rápida que la de satisfacción de DBO, o sea, el punto para el cual el río comienza a recuperar su OD.

La satisfacción de la DBO da por resultado la desoxigenación de las aguas receptoras. La absorción de oxígeno procedente de la atmósfera y de las algas y

plantas origina la re-aireación de las aguas receptoras. La diferencia entre la desoxigenación y la re-aireación produce el perfil de OD de un río, conocido como curva de déficit de oxígeno o curva SAG.

Si el río está originalmente saturado con OD, la curva de DBO para la mezcla río-aguas residuales coincidirá con la curva de desoxigenación acumulada. A medida que se ejerce la DBO, el OD cae por debajo del OD de saturación y se inicia la re-aireación. Con el aumento del déficit de oxígeno se aumenta la tasa de re-aireación, hasta un punto crítico en el cual la tasa de re-aireación es igual a la tasa de desoxigenación. Para el punto crítico, el OD es mínimo y, a partir de dicho punto, para condiciones aerobias, el valor del OD aumentará con el tiempo.

Entre los diversos factores que pueden afectar la curva de déficit de oxígeno, o curva SAG, pueden mencionarse los siguientes:

- Deposición de material orgánico y posible re-suspensión por arrastre de lodos del fondo, o lodos bentónicos.
- Adición de DBO en la escorrentía superficial.
- Remoción de OD por difusión en los lodos bentónicos para satisfacer demanda de oxígeno.
- Adición de DBO por difusión de material orgánico soluble proveniente de los lodos bentónicos.
- Remoción de OD por los gases originados en la descomposición de los lodos bentónicos.
- Adición de OD por actividad fotosintética.
- Remoción de OD por las plantas durante la noche.
- Redistribución continúa de OD y DBO por dispersión longitudinal.

La presencia de OD es esencial en el agua; proviene principalmente del aire. Niveles bajos o ausencia de oxígeno en el agua puede indicar contaminación elevada, condiciones sépticas o una actividad bacteriana intensa; por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación.

La presencia de oxígeno disuelto en el agua cruda depende de la temperatura, la presión y la mineralización del agua. La ley de Henry y Dalton dice: "La solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial e inversamente proporcional a la temperatura".

Las aguas superficiales no contaminadas, si son corrientes, suelen estar saturadas de oxígeno y a veces incluso sobresaturadas; su contenido depende de la aireación, de las plantas verdes presentes en el agua, de la temperatura y de la hora del día (mañana o tarde).

De la observación de los datos de OD en algunos ríos se deduce que en la mayoría de ellos se presentan contaminaciones esporádicas que no afectan para nada el estado general de los mismos y representan solamente fenómenos locales. Por otra parte, durante el verano el caudal de un río disminuye, por lo que también lo hace la cantidad total de oxígeno disponible y, por tanto, el consumo de éste por los seres vivos acuáticos aumenta por unidad de volumen. Por eso no es extraño que haya grandes diferencias entre el verano y el invierno en lo que se refiere al OD. Igualmente ocurre que este contenido varía del día a la noche, ya que los seres vivos consumen oxígeno para la respiración las 24 horas del día. Sin embargo, la fotosíntesis sólo se realiza con el concurso de la luz solar.

Básicamente, la cantidad de OD en un cuerpo de agua está relacionada con su capacidad de autodepuración, una baja concentración de OD se refleja en un ecosistema desbalanceado, olores y otras molestias estéticas.

Sin embargo, un cuerpo de agua puede aumentar su concentración de oxígeno mediante condiciones ambientales y procesos del entorno como la re-aireación, la fotosíntesis de las plantas acuáticas y la mezcla o aportes de descargas con OD de mayor concentración. En este proceso se genera también el gasto del OD mediante la oxidación de la materia orgánica, materia nitrogenada, oxígeno de bentos y el requerido por las plantas acuáticas.

MOVIMIENTO DE CONTAMINANTES EN EL MEDIO ACUÁTICO

El comportamiento de un contaminante cuando entra en un medio acuático depende de muchos factores y condiciones que hacen necesario simplificar el número de variables para cuantificar sus efectos sobre la fuente receptora. La calibración de cada factor requiere de una expresión matemática que represente su cambio en el transcurso del tiempo y el espacio, lo cual da origen a la formulación de diferentes modelos matemáticos para cálculo de condiciones de contaminación de una fuente receptora.

El Movimiento Advectivo es el mecanismo mediante el cual una sustancia o contaminante pasa, se mueve, o se transporta, de un sitio a otro en un cuerpo de agua debido a la fuerza o al impulso del caudal; la concentración de la sustancia cambia pero no así su composición química [7].

El movimiento por difusión se refiere al traslado de masa de un lugar a otro debido al movimiento al azar en el tiempo que tienen las moléculas de agua. En la

difusión la masa se va diluyendo en el tiempo con movimiento desprendible, cambia su concentración pero no su composición química. [7]

La figura 2 ilustra el balance de oxígeno en un cuerpo de agua.

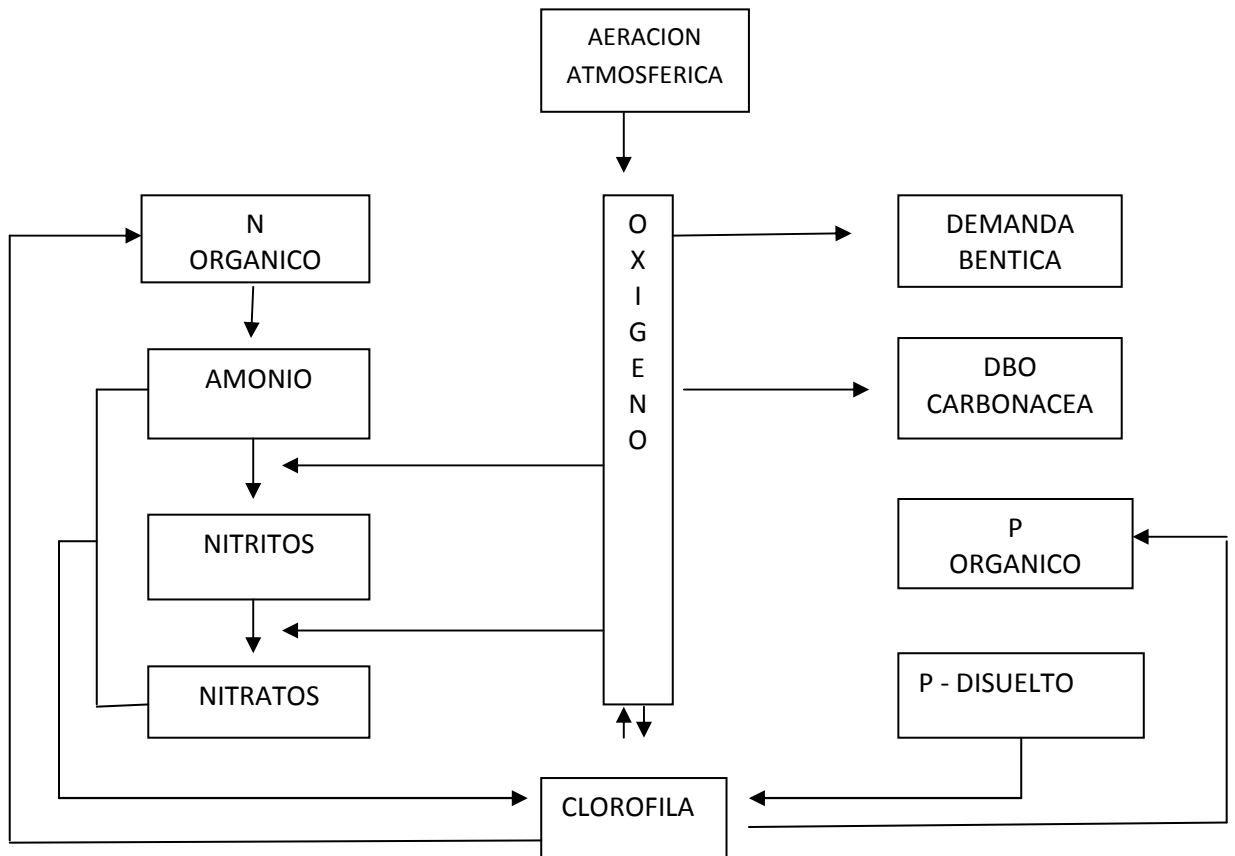


Figura 2. Balance de Oxígeno.

En el movimiento por dispersión una sustancia contaminante se puede esparcir o dispersar porque existen diferencias de velocidad entre dos sitios en el agua. Cuando se presentan dichas diferencias de velocidad la sustancia se mueve en el espacio (eje x) y cambia su concentración pero no su composición química. En todo ambiente acuático, la difusión y la dispersión causan la mezcla de los contaminantes en el agua. Por ejemplo, en los ríos y los estuarios predomina la dispersión debido a las diferencias de velocidad que se presentan en el cuerpo de agua [7].

La concentración de una sustancia contaminante presente en el agua se puede ver afectada por cualquiera de los anteriores procesos. Cuando estos factores o procesos son independientes, su efecto es aditivo y la correspondiente tasa de

cambio global de la concentración de la sustancia química se puede obtener con las ecuaciones de conservación de masa.

MODELO DE STREETER Y PHELPS

Este modelo publicado en 1994, aplicable a ríos con condiciones aerobias, flujo con superficie libre, flujo permanente, unidimensional, supone que la tasa de cambio del déficit de OD es igual a la diferencia entre la desoxigenación del agua, debido a la remoción de DBO y materia orgánica carbonácea por oxidación biológica, y la re-aireación o suministro de OD proveniente de la atmósfera y causada por el déficit de OD y por la turbulencia.

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D$$

$$D = \frac{K_1L_0}{K_2 - K_1} [e^{-K_1t} - e^{-K_2t}] + D_0e^{-K_2t}$$

Donde:

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

L₀ = DBOUC inicial, t = 0, mg/L

L = DBOUC remanente, t = t, mg/L

t = tiempo de flujo, d

K₁ = constante de desoxigenación, base e, d⁻¹

K₂ = constante de reaireación, base e, d⁻¹

D₀ = déficit inicial de OD, mg/L

La aplicación del modelo requiere, entre otros datos, los siguientes:

- Datos de DBO
- Datos de OD
- Datos de la temperatura del agua
- Tasa de re-aireación
- Velocidades de flujo
- Tasa de desoxigenación

CONSTANTE DE DESOXIGENACIÓN CARBONÁCEA

Por simplicidad y para efectos prácticos, la constante de desoxigenación se toma como la tasa global de remoción K_1 con los datos del sitio. El modelo se calibra con los perfiles de OD determinados en el terreno y se verifica con las proyecciones y medidas reales para condiciones futuras. El modelo de Streeter y Phelps que es la solución analítica puede emplearse para obtener y visualizar la capacidad de auto-purificación de un río en forma muy aproximada y razonable y, relativamente, de manera económica, sin embargo con el QUAL2K se pueden tener en cuenta otros aspectos que las ecuaciones de resolución analítica no contemplan gracias a que se resuelve mediante métodos de elementos finitos que llegan a tener un grado de exactitud más amplio.

La constante de desoxigenación (K_1) se puede calcular mediante la ecuación [7]:

$$\frac{dL}{dt} = L * K_1$$

ó

$$L = L_0 e^{-K_1 t}$$

Donde:

dL/dt = Tasa de oxidación de la materia orgánica

L = Materia orgánica remanente en el tiempo t , mg/L

t = tiempo de reacción, d

K_1 = constante de desoxigenación, base e, d^{-1}

t = tiempo, d

La constante de desoxigenación indica el comportamiento de la DBO en el tiempo. Varios factores influyen en su valor, como la temperatura, la concentración de OD y la misma materia orgánica presente. Para calcular el valor de esta constante se puede utilizar diferentes métodos, entre ellos el logarítmico, Thomas, de Moore y otros.

En el caso de la modelación del río Ubaté, se definió la constante de desoxigenación tomando los datos de caudal y velocidad del río y concentración de DBO entre tramos consecutivos, utilizando la siguiente ecuación [7,17]:

$$K_1 = V \frac{\ln \frac{Q_1 L_1}{Q_2 L_2}}{X_2 - X_1}$$

Donde,

K_1 = Constante de desoxigenación, d^{-1}

V = Velocidad media del río, m/s

Q_1 = Caudal aguas arriba, m^3/s

Q_2 = Caudal aguas abajo, m^3/s

L_1 = Concentración de DBO aguas arriba, mg/l

L_2 = Concentración de DBO aguas abajo, mg/l

X_1 = Distancia aguas abajo, m

X_2 = Distancia aguas arriba, m

CONSTANTE DE RE-AIREACIÓN

Se conoce como re-aireación el proceso por el cual el oxígeno y demás componente gaseosos del aire son renovados en las aguas en movimiento de un río [8]. La constante de re-aireación está sujeta a diferentes factores, con mayor y menor intensidad, desde la temperatura y la agitación hasta la relación entre la superficie de intercambio y el volumen del agua.

La constante de re-aireación de ríos se puede calcular mediante las siguientes fórmulas empíricas:

$$\text{O'Connor y Dobbins: } K_2 = 3,93 \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}} \quad (1)$$

$$\text{Churchill: } K_2 = 5,026 \frac{U}{H^{1,67}} \quad (2)$$

$$\text{Owens y Gibbs: } K_2 = 5,32 \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}} \quad (3)$$

Donde:

K_2 = Constante de reaireación, d^{-1}

U = Velocidad de la corriente, m/s

H = Profundidad de la corriente, m

Para la determinación de la constante de reaireación del río Ubaté, dadas las condiciones de velocidad y profundidad del río la ecuación de Owens y Gibbs, sería la aplicable en el modelo [9].

CONCENTRACIÓN DE SATURACIÓN DE OD

El oxígeno disuelto de saturación en agua con condiciones estándar de presión (1 atm-760 mmHg), se calcula con la ecuación de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), ignorando el efecto de la salinidad. [8]

$$ODS = 14,652 - (0,41022 * T) + (0,007991 * T^2) - (0,000077774 * T^3)$$

Donde:

OD_s = concentración de saturación de OD, mg/l
T = temperatura, °C

Para diferentes altitudes se debe corregir el valor de OD_s

$$P = 760 e^{\frac{E}{8.005}}$$

Donde:

P = presión atmosférica a la elevación E, mm Hg
E = elevación, msnm

El valor de saturación de oxígeno disuelto corregido será:

$$OD_{sc} = OD_s \frac{P}{760}$$

Donde:

P = presión atmosférica a la elevación E, mm Hg
 OD_s = Oxígeno disuelto de saturación, mg/l
 OD_{sc} = Oxígeno disuelto de saturación corregido, mg/l

CURVA SAG

En la evaluación de la calidad del agua de un río, se puede distinguir que cuando en él no hay una demanda de oxígeno, los valores de OD estarán aproximándose a los valores de saturación, pero si a este cuerpo de agua se le genera una descarga orgánica, el OD comienza a decaer por diferentes fenómenos tales como la respiración de microorganismos heterótrofos y la baja producción fotosintética a causa del aumento de la turbiedad. Este consumo sostenido del OD puede ser compensado por el O_2 presente en el aire y que se encuentra en contacto con la fase líquida, sin embargo si la capacidad de sumidero del oxígeno es mayor, el OD

del río disminuye a un punto crítico que solo logra recuperarse cuando la oxigenación se nivela a la desoxigenación y si la materia ya ha sido oxidada, el OD se recupera hasta simular las condiciones aguas arriba antes del vertimiento de la carga contaminante. Si aplicamos las ecuaciones matemáticas de conservación de la materia y siguiendo una reacción de primer orden tal y como se presentan a continuación, en cada instante o tiempo t , con las constantes definidas tanto de oxigenación como de desoxigenación y definiendo la concentración del aporte de contaminación carbonacea, la representación grafica de esos cálculos es lo que se conoce como curva SAG o cuchara, tal y como se muestra en la figura 3.

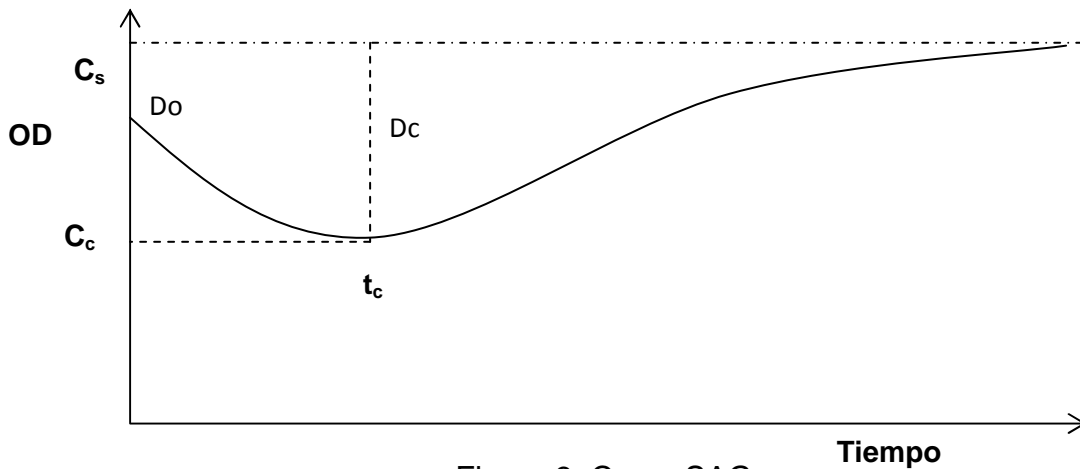


Figura 3. Curva SAG.

Los puntos de interés en la construcción de la curva de oxígeno disuelto y de DBO pueden ser los siguientes:

- Punto de OD mínimo o punto de déficit máximo de OD, conocido como punto crítico.
- El tiempo crítico o tiempo de flujo para alcanzar el punto crítico o punto de OD mínimo

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \ln \left[\frac{K_2}{K_1} \left(1 - \frac{D_o(K_2 - K_1)}{K_1 L_0} \right) \right]$$

$$D_c = \frac{K_1}{K_2} L_0 e^{-K_1 t_c}$$

Donde:

t_c = tiempo de flujo hasta el punto crítico, d
 D_c = Déficit crítico, mg/l
 K_1 y K_2 = Constantes definidas anteriormente, d^{-1}
 D_o = Déficit inicial de oxígeno, mg/l
 L_o = DBOUC inicial para $t=0$, mg/l

En el QUAL2K [9], una corriente es conceptualizada como una sucesión de elementos computacionales que operan como reactores completamente mezclados, ligados uno a otro por mecanismos de transporte y difusión. Estos elementos se agrupan en segmentos que se caracterizan por tener las mismas propiedades hidráulicas (pendiente de la corriente, sección transversal, rugosidad, etc).

MARCO LEGAL

Las consideraciones más importantes, aplicables a la calidad del agua del río Ubaté, se encuentran en las normas incluidas a continuación.

En lo concerniente a los cuerpos de agua, el decreto Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974 – el Congreso de Colombia expide el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y protección al medio ambiente, define los tipos de contaminación que se presentan en los mismos (física, química y biológica) y establece que es responsabilidad del Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y demás usos, para lo cual debe: clasificar las aguas y fijar su destinación, controlar la calidad del agua mediante análisis periódicos y promover y fomentar la investigación y el análisis de las aguas.

En la resolución 3462 de 28 de Diciembre de 2009, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca establece los objetivos de calidad del agua para las cuencas de los ríos Ubaté y Suárez, a lograr en el año 2020, así:

Parámetro	Expresado como	Valor más restrictivo
DBO	mg/l	7
OD	mg/l	Mayor a 4
Coliformes Totales	NMP/100ml	5000

Decreto 3930 de 25 de Octubre de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI – Parte III – Libro II del Decreto-Ley

2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones” que tiene como fin el ordenamiento del recurso hídrico y la implementación de simulaciones de calidad del agua y complementar el sistema de información ambiental de los componentes naturales entre ellos el recurso hídrico.

En el documento COMPES 3699 de julio de 2011, del Departamento Nacional de Planeación, se da concepto favorable para otorgar Garantía de la Nación a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca -CAR - para contratar una operación de crédito público externo con el gobierno de Francia hasta por la suma de EUR 33,24 millones, o su equivalente en otras monedas, con destino a la financiación del programa de implementación de las tecnologías ambientales necesarias al control cuantitativo y cualitativo del recurso hídrico de la cuenca Ubaté Suárez, con el objetivo de mejorar la capacidad y la regulación hidráulica del sistema hidrológico y contribuir al control y disminución de la carga contaminante.

En la resolución 2152 de 22 de agosto de 2011, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca inicia el proceso de consultas de metas de reducción de cargas contaminantes de DBO5 y SST arrojados a los cuerpos de agua que conforman la cuenca, tramos y sub-tramos de los ríos Ubaté y Suárez.

4. METODOLOGIA

Los modelos de calidad de agua son herramientas útiles para la predicción del comportamiento de la calidad en un río y por ende permiten la toma de decisiones respecto a las políticas de saneamiento, se basan en un conjunto de ecuaciones matemáticas que definen los procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en un cuerpo de agua, fundamentalmente sustentados en la conservación de la masa y/o energía, ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema, su transporte y sus reacciones en el cuerpo de agua.

Para que un modelo de calidad de aguas pueda ser aplicado confiablemente, tiene que cumplir, obviamente, con la condición básica de reproducir aceptablemente las condiciones actuales [25].

Para la simulación de calidad del río Ubaté se utiliza el modelo de Streeter y Phelps, calculando Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno por el QUAL2K de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el cual es un programa comprensivo y versátil, de aplicación unidimensional, que puede usarse en condiciones de régimen permanente o no permanente, permitiendo acoplar múltiples descargas, extracciones y afluentes, ya sean de carácter puntual o dispersas. Para este caso se considerará régimen permanente y estacionario.

4.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES

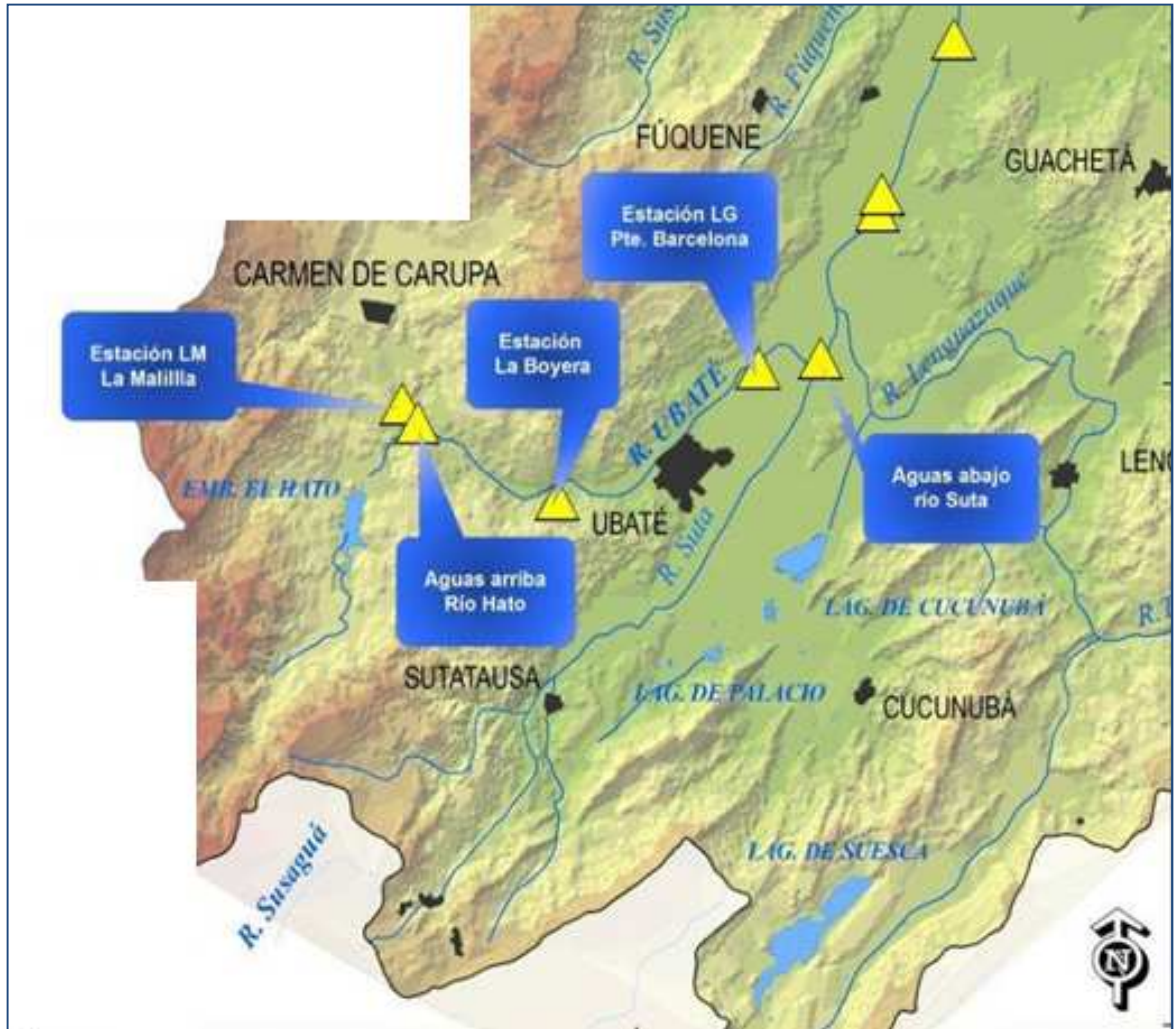
En la tabla 2 se incluyen las estaciones seleccionadas para la modelación de la calidad del agua del río Ubaté. [2]

Tabla 2. Estaciones de monitoreo.

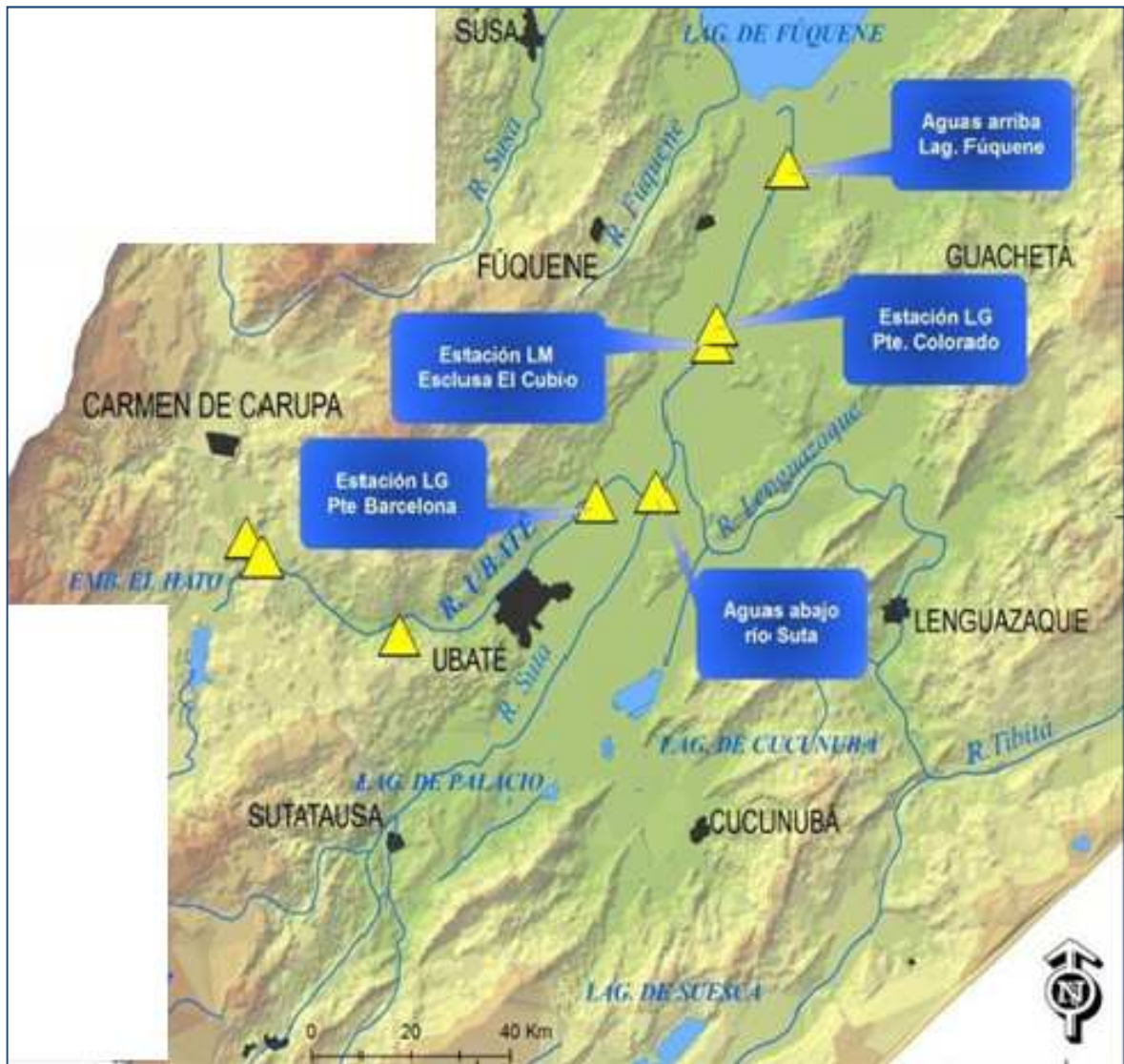
No.	Nombre
1	LM La Malilla
2	Aguas arriba río Hato
3	La Boyera
4	LG Puente Barcelona
5	Aguas abajo río Suta
6	LM Esclusa El Cubio
7	LG Puente Colorado

En los mapas 4 y 5 se ilustra la localización de las estaciones de monitoreo del río Ubaté.

Mapa 4. Localización Puntos de Monitoreo río Ubaté – Suárez Cuenca Alta.



Mapa 5. Localización Puntos de Monitoreo río Ubaté – Suárez Cuenca Alta.



En la tabla 3 se presentan las estaciones con su ubicación geográfica y caudales promedio

Tabla 3. Localización estaciones de monitoreo del río Ubaté.

	ESTACIÓN	COTA (msnm)	LATITUD	LONGITUD	CAUDAL m ³ /s
1	LA MALILLA	2845	1080627	1020269	0,209
2	RIO HATO	2816	1080016	1020733	0,700
3	LA BOYERA	2655	1077872	1025026	0,902
4	PTE BARCELONA	2559	1081651	1034187	0,895
5	RIO SUTA	2559	1081738	1032899	0,930
6	RIO LENGUAZAQUE	2547	1083100	1033744	0,342
7	EL CUBIO	2540	1086171	1034826	0,945
8	PTE COLORADO	2545	1086650	1034958	0,945

Para la calibración del modelo se utilizan los resultados de la campaña realizada por la CAR en el año 2009 e incluidos en la tabla 4

Tabla 4. Resultados campaña de 2009.

ESTACIÓN/PUNTO CAMPAÑA	ABSCISADO (Km)	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Temperatura (°T)
LA MALILLA	K0+000	6.3	4.5	16
ANTES DEL RIO HATO	K0+640	6	0	18
RIO HATO(antes del río Ubaté)	K0+645	5.1	5.2	19
LA BOYERA	K6+030	5.9	6.4	22
PTE BARCELONA	K14+080	5.7	4.7	15
RIO SUTA(antes del río Ubaté)	K16+474	0	196	16
DESPUES DEL RIO SUTA	K16+480	5	25.7	18
RIO LENGUAZAQUE(antes río)	K18+109	6.2	6.5	19
DESPUES DEL RIO L/ZAQUE	K18+114	3.5	9.6	16
EL CUBIO	K21+629	1.4	8.1	19
PTE COLORADO	K22+141	1.8	5.3	18

Los perfiles de OD y DBO se ilustran en las figuras 4 y 5 [15].

Para el comportamiento del río en condiciones de estiaje, escenario uno, se usaron los caudales medios mínimos mensuales provenientes de las estaciones enumeradas en la tabla 5 e incluidos en la tabla 6.

Tabla 5. Estaciones Limnigráficas y Limnimétricas.

	Nombre	Río
2401710	Descarga el Hato	R. Hato
2401733	Pte.La Balsa	R. Lenguazaque
2401716	El Pino	R. Suta
2401755	La Malilla	R. Ubaté
2401715	La Boyera	R. Ubaté
2401731	Pte. Barcelona	R. Ubaté
2401725	El Cubio	R. Ubaté
2401733	Pte Colorado	R. Ubaté

Tabla 6. Valores de caudal mínimo mensual.

VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE CAUDALES (m ³ /s) ESTACION EL PINO. Río Suta													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
60-09	0.090	0.082	0.086	0.118	0.205	0.190	0.148	0.130	0.119	0.142	0.228	0.159	0.141

VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE CAUDALES (m ³ /s) ESTACION PTE LA Balsa. Río Lenguaque													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
72-09	0.204	0.121	0.220	0.207	0.630	0.507	0.629	0.510	0.355	0.466	0.742	0.389	0.415

VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE CAUDALES (m ³ /s) ESTACION LA MALILLA. Río Ubaté													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
68-09	0.340	0.306	0.268	0.351	0.354	0.297	0.300	0.270	0.279	0.318	0.474	0.397	0.330

VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE CAUDALES (m ³ /s) ESTACION LA BOYERA. Río Ubaté													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
91-09	0.549	0.605	0.616	0.710	0.680	0.642	0.621	0.670	0.691	0.695	0.830	0.759	0.672

VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE CAUDALES (m ³ /s) ESTACION PTE BARCELONA. Río Ubaté													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
71-09	0.580	0.336	0.388	0.553	0.517	0.510	0.380	0.407	0.441	0.441	0.732	0.583	0.489

VALORES MÍNIMOS MENSUALES DE CAUDALES (m ³ /s) ESTACION PTE COLORADO. Río Ubaté													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MYO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Promedio
64-09	0.705	0.478	0.488	0.654	1.637	1.518	0.945	0.680	0.460	0.692	2.093	1.416	0.981

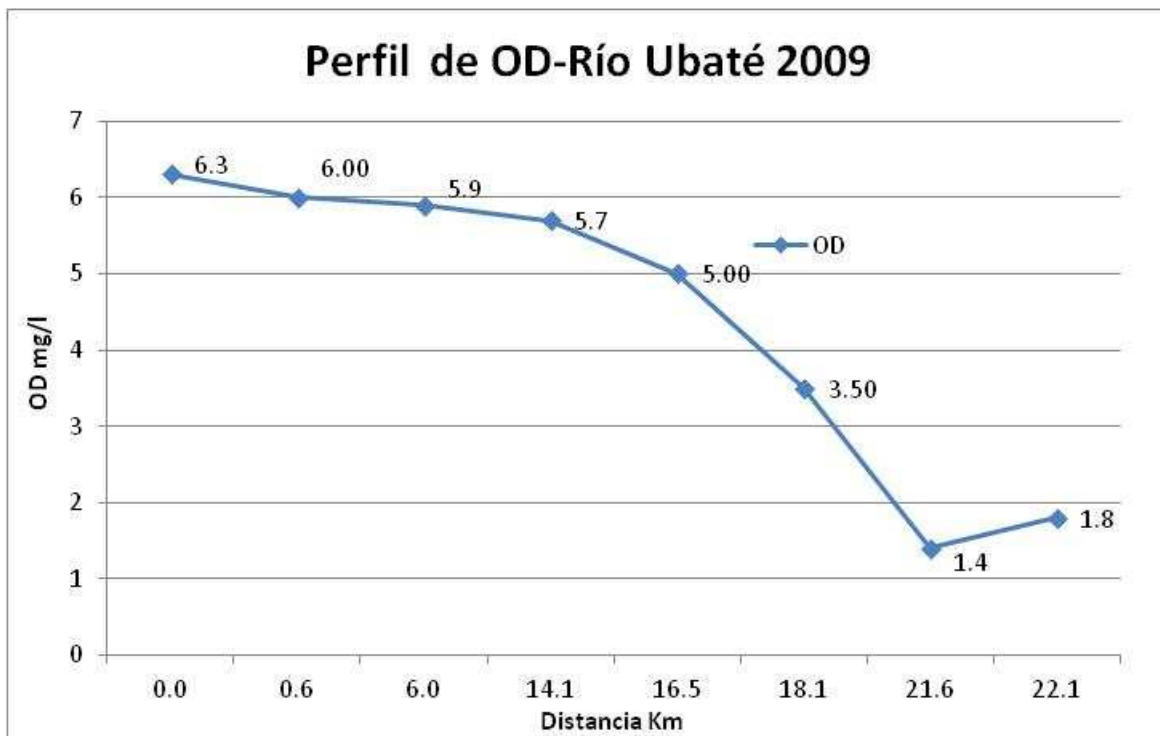


Figura 4. Perfil de OD.

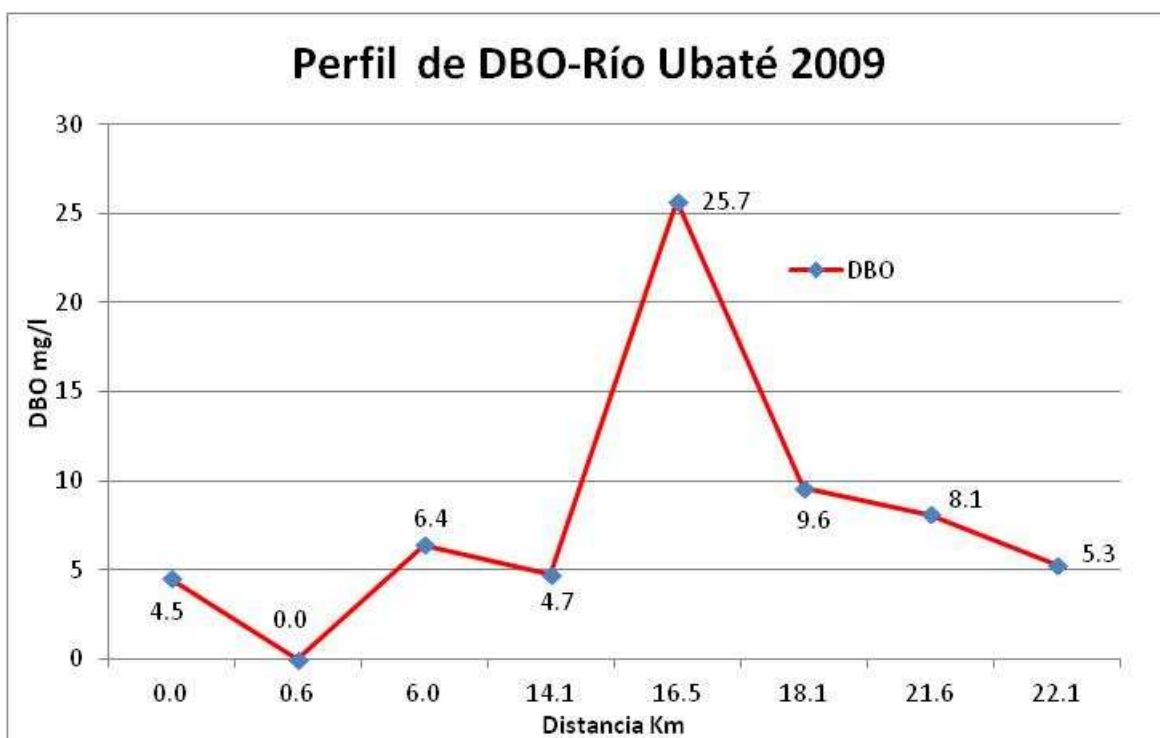


Figura 5. Perfil de DBO

4.2 CURVAS DE CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Las curvas de comportamiento de caudal, velocidad y profundidad se definieron con los datos suministrados por la estación LG La Malilla con datos históricos desde el año 2002 hasta el año 2012, y por la estación Puente Barcelona con datos desde el año 2008 hasta el año 2012.

Los resultados se indican en las tablas 7 y 8 y en las figuras 6 a 9

Tabla 7. Registro de caudales, velocidad y profundidad Est. La Malilla.

DATOS DE AFORO DE LA ESTACIÓN LA MALILLA				
Dato	Año	H, m	Q, m ³ /s	V, m/s
1	2002	0.12	0.124	0.34
2	2004	0.17	0.083	0.19
3	2005	0.4	1.357	0.97
5	2007	0.16	0.215	0.47
6	2008	0.21	0.316	0.55
7	2009	0.15	0.159	0.4
8	2010	0.2	0.364	0.52
9	2011	0.44	1.515	0.73
10	2012	0.21	0.439	0.58

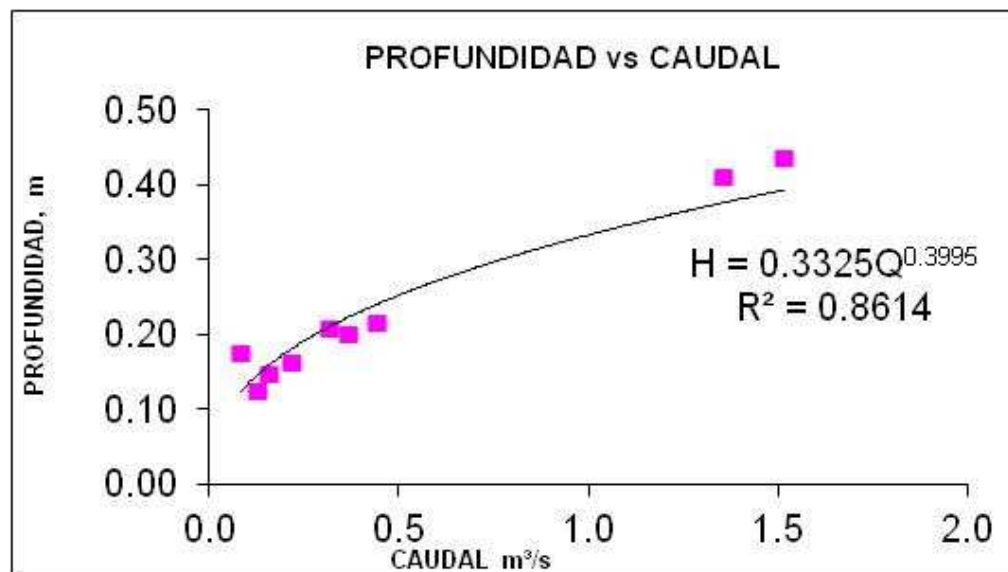


Figura 6. Curva característica Est. La Malilla.

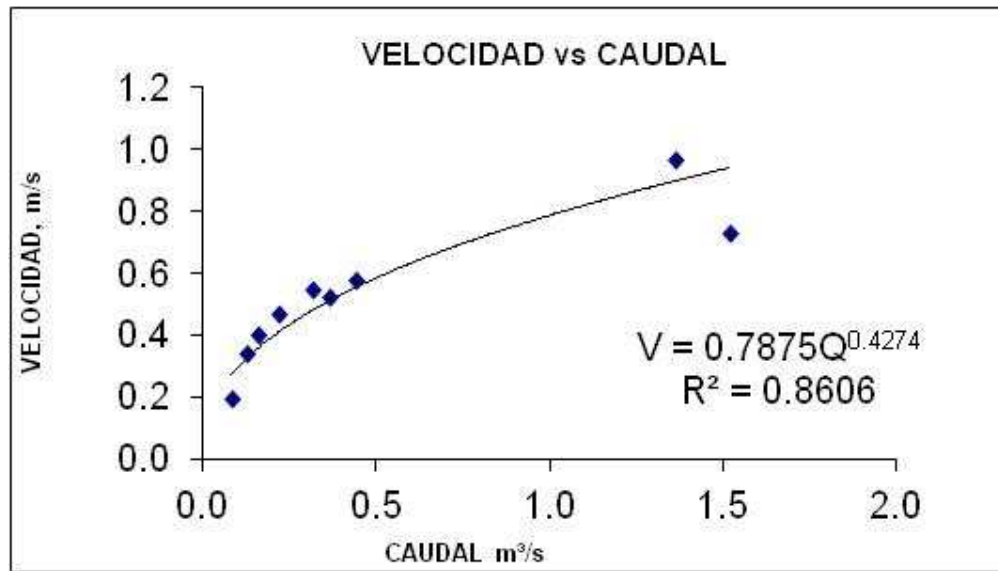


Figura 7. Curva característica Est. La Malilla.

Las ecuaciones características del comportamiento hidráulico para la estación La Malilla (tramos 1 hasta 3) son las siguientes:

Estación LA MALILLA
$H = 0,3325 Q^{0,3995}$
$V = 0,7875 Q^{0,4274}$

H=Altura lamina de agua (m)

V=Velocidad de la corriente (m/s)

Q=Caudal (m³/s)

Tabla 8. Registro de caudales, velocidad y profundidad Est. Pte. Barcelona.

DATOS DE AFORO DE LA ESTACIÓN PUENTE BARCELONA				
Dato	Año	H, m	Q, m³/s	V, m/s
1	2008	0.55	4.015	----
2	2009	0.32	0.861	0.29
3	2010	0.58	3.393	0.53
4	2011	0.95	8.649	0.6
5	2012	0.51	1.356	0.35

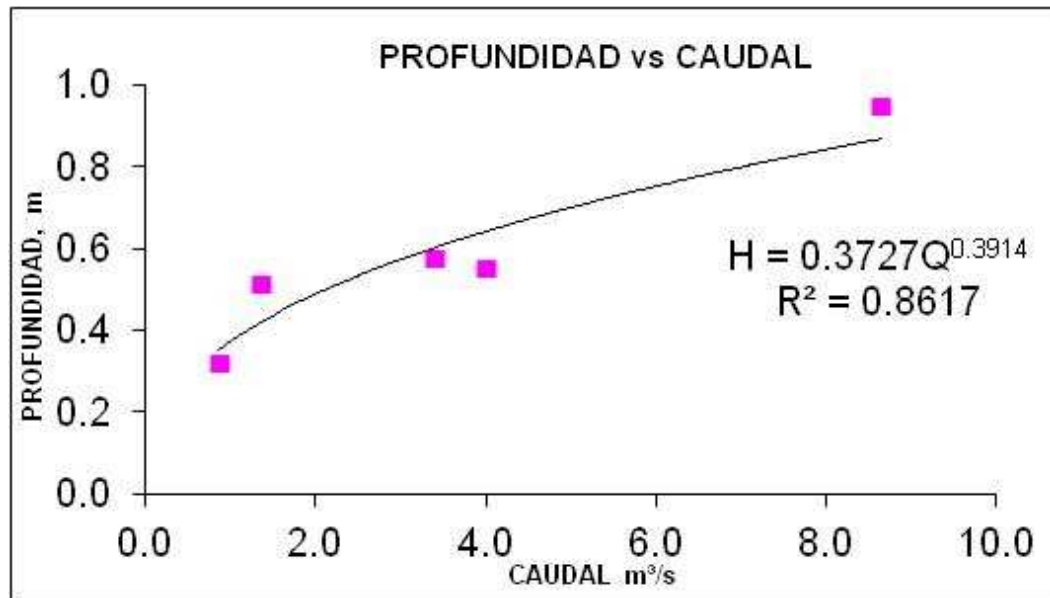


Figura 8. Curva característica Est. Pte. Barcelona.

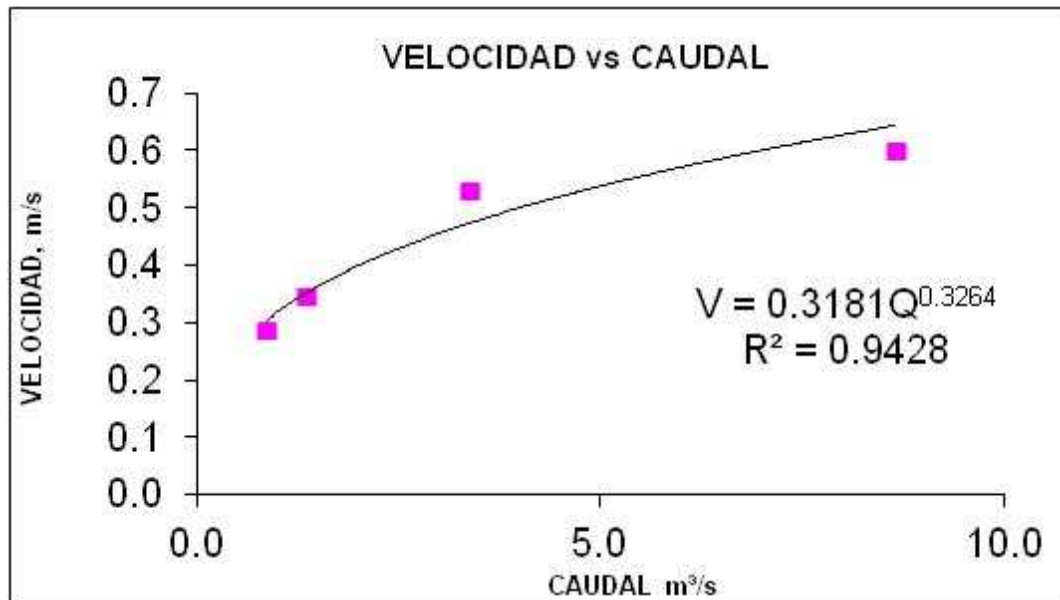


Figura 9. Curva característica Est. Pte. Barcelona.

Las ecuaciones características del comportamiento hidráulico para la estación Pte. Barcelona (tramos 4 hasta 7) fueron las siguientes:

Estación PTE BARCELONA
$H = 0,3727 Q^{0,3914}$
$V = 0,3181 Q^{0,3264}$

H=Altura lamina de agua (m)
V=Velocidad de la corriente (m/s)
Q=Caudal (m^3/s)

4.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

El perfil de referencia para la calibración del modelo se incluye en la figura 10.

Para la calibración, es decir, para obtener el perfil de OD que represente las condiciones determinadas en el río, se logra mediante el ajuste de las constantes de desoxigenación K_1 y de reaireación K_2 . (Figura 11)

En la tabla 9 se incluye la información y los resultados de la simulación con el Qual2K.

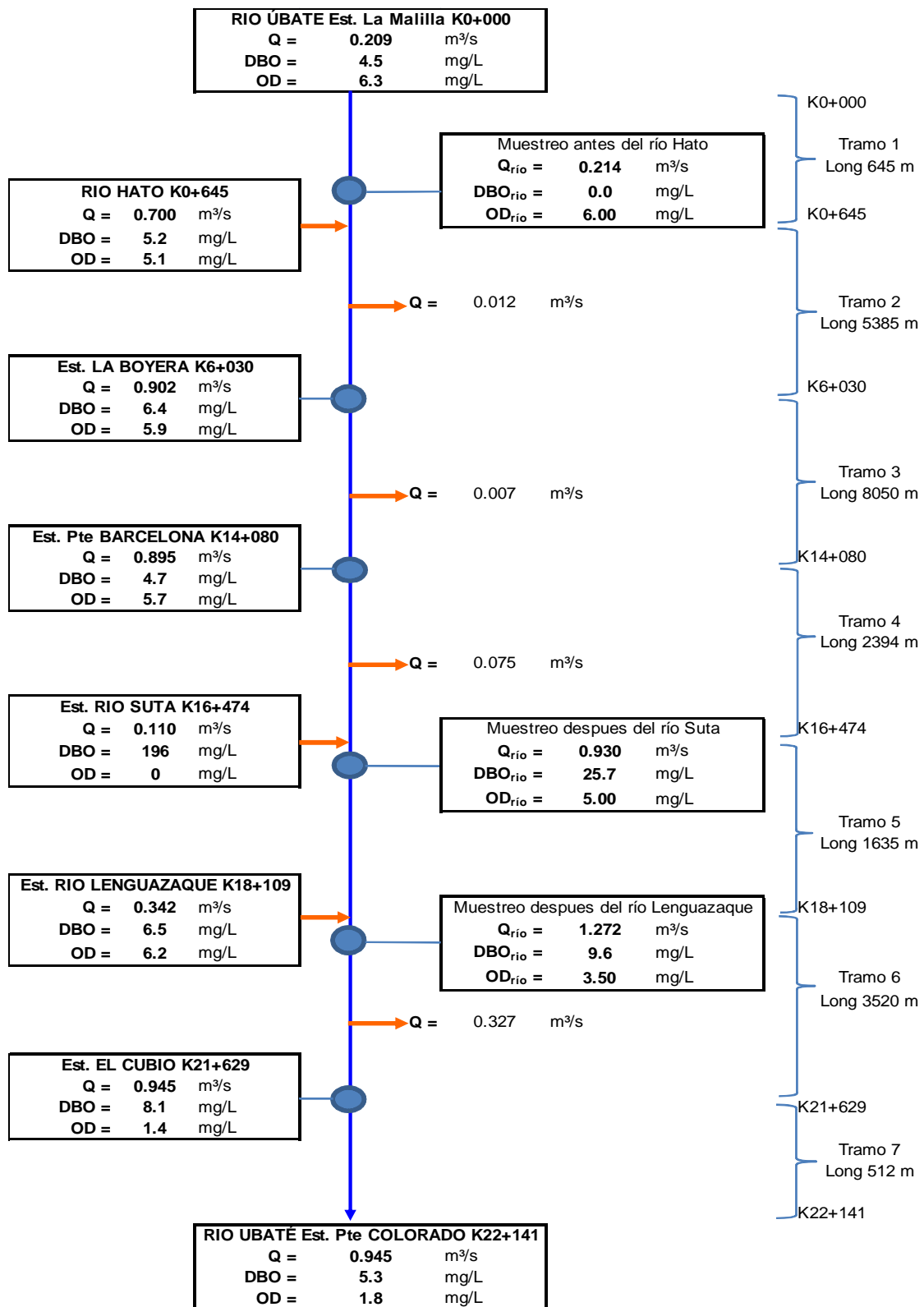


Figura 10. Perfil de referencia del río Ubaté.

Tabla 9. Datos calibración del modelo.

Tramos	TRAMO 1		TRAMO 2				TRAMO 3			TRAMO 4		
	La Malilla	Antes del rio Hato	Descarga Rio Hato	Mezcla rios Ubaté/Hato	Extracción	La Boyera	La Boyera	Extracción	Pte. Barcelona	Pte. Barcelona	Extracción	Antes del rio Suta
Caudal (m3/s)	0.209	0.214	0.700	0.914	0.012	0.902	0.90	0.007	0.895	0.895	0.075	0.820
Temp (°c)	16.0	18.0	19.0	18.8		22.0	22.00		15.0	15.0		18.3
OD (mg/l)	6.3	6.0	5.1	5.3		5.9	5.90		5.7	5.7		5.7
DBO (mg/l)	4.5	0.0	5.2	4.0		6.4	6.40		4.7	4.7		2.9
K1 (d-1)	1.00	1.00		0.05		2.00	2.00		1.8	1.8		1.8
K2 (d-1)	3.5	3.50		8.00		4.00	4.00		4.0	4.0		4.0
ODs (mg/l)	6.88	6.62		6.51		6.22	6.22		7.29	7.3		6.80
DBOUC (mg/l)	4.53	0.00		18.00		6.40	6.40		4.70	4.7		2.86
Vel (m/s)	0.40	0.41		0.76		0.75	0.75		0.31	0.31		0.30
Profundidad (m)	0.18	0.18		0.32		0.32	0.32		0.36	0.36		0.34
K2/K1	3.5	3.5		160.0		2.0	2.00		2.2	2.2		2.2
Distancia (Km)	0.000	0.644	0.645	0.646		6.030	6.03		14.080	14.080		16.473

Tramos	TRAMO 5			TRAMO 6			TRAMO 7		
	Descarga Rio Suta	Mezcla rios Ubaté/Suta	Antes del rio Lenguazaque	Rio Lenguazaque	Mezcla rios Ubaté/lenguazaque	Extracción	El Cubio	El Cubio	Pte. Colorado
Caudal (m3/s)	0.110	0.930	0.930	0.342	1.272	0.327	0.945	0.945	0.945
Temp (°c)	16.0	18.0	16.3	17.0	16.5		19.0	19.0	18.0
OD (mg/l)	0.0	5.0	2.5	6.2	3.5		1.4	1.4	1.8
DBO (mg/l)	196.0	25.7	10.7	6.5	9.6		8.1	8.1	5.3
K1 (d-1)		2.00	2.0		4.0		0.50	0.5	2.0
K2 (d-1)		8.0	8.0		1.0		6.00	6.0	1.0
ODs (mg/l)		6.84	7.09		7.06		6.71	6.71	6.84
DBOUC (mg/l)		25.70	10.74		9.60		8.82	8.82	5.30
Vel (m/s)		0.31	0.31		0.34		0.31	0.31	0.31
Profundidad (m)		0.36	0.36		0.41		0.36	0.36	0.36
K2/K1		4.0	4.0		0.3		12.0	12.00	0.5
Distancia (Km)	16.474	16.475	18.108	18.109	18.110		21.629	21.629	22.141

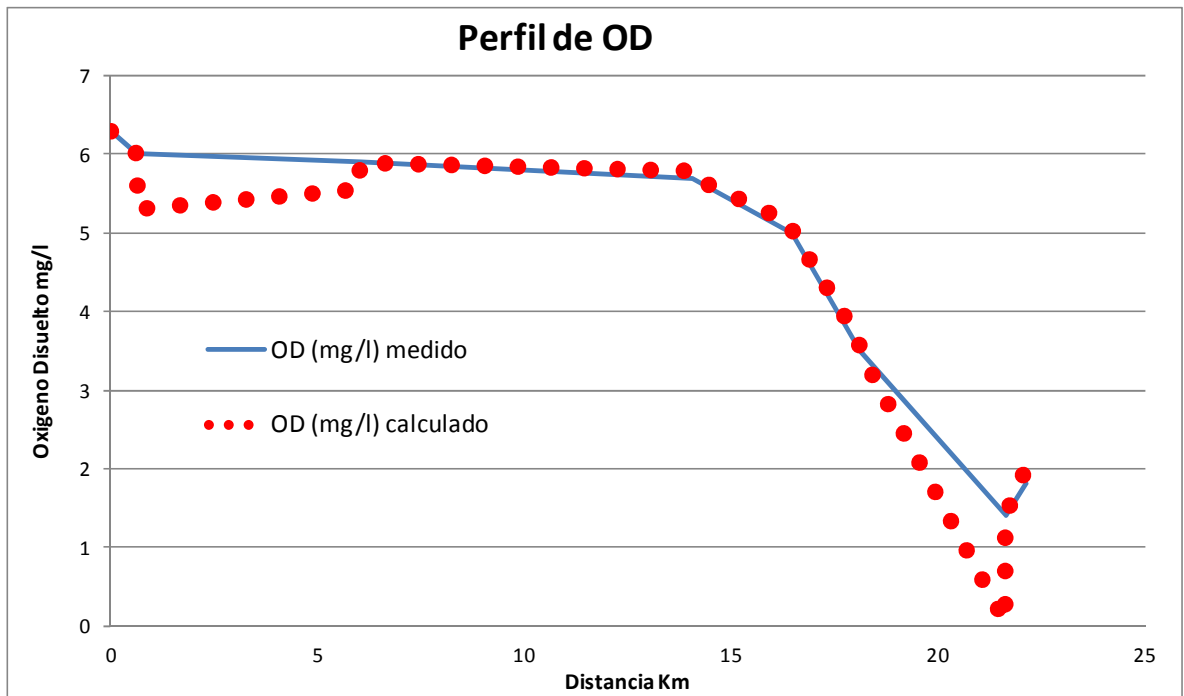


Figura 11. Curva de calibración del modelo.

En las figuras 12 a 19 se copian las pantallas del Q2K que ilustran la entrada de los datos de cabecera, de datos de estaciones y puntos de muestreo, de las constantes de K_1 y K_2 , de aportes y extracciones de caudal y de los perfiles de OD y DBO para la calibración.

Microsoft Excel - Tesis Ubaté [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Rio Ubaté (11/11/2012)**

4 **Headwater Data:**

5

6 Number of Headwaters 1

7 **Headwater 0 (Mainstem)**

Headwater label	Reach No	Flow Rate (m ³ /s)	Elevation (m)	Weir				Rating Curves			
				Height (m)	Width (m)	adam	bdam	Velocity		Depth	
								Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent
Mainstem headwater	1	0.209	2845.000	0.0000	0.0000	1.2500	0.9000	0.7875	0.427	0.3325	0.400
Water Quality Constituents	Units	12:00 a.m.	01:00 a.m.	02:00 a.m.	03:00 a.m.	04:00 a.m.	05:00 a.m.	06:00 a.m.	07:00 a.m.	08:00 a.m.	09:00 a.m.
Temperature	C	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
Conductivity	umhos										
Inorganic Solids	mgD/L										
Dissolved Oxygen	mg/L	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30
CBODslow	mgO2/L										
CBODfast	mgO2/L	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Organic Nitrogen	ugN/L										
NH4-Nitrogen	ugN/L										
NO3-Nitrogen	ugN/L										
Organic Phosphorus	ugP/L										
Inorganic Phosphorus (SRP)	ugP/L										
Phytoplankton	ugA/L										
Internal Nitrogen (INP)	ugN/L										
Internal Phosphorus (IPP)	ugP/L										
Detritus (POM)	mgD/L										
Pathogen	cfu/100 mL										
Alkalinity	mgCaCO3/L										
Constituent i											
Constituent ii											
Constituent iii											
pH	s.u.										

QUAL2K Time Zones Headwater Downstream Reach Reach Rates Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover

Figura 12. Datos de cabecera. Estación La Malilla.

Microsoft Excel - Tesis Ubaté K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Rio Ubaté (11/11/2012)**

4 **Reach Data:**

5

6 Reach for diel plot 1

7 Element for diel plo 1

Reach	Downstream end of reach label	Reach Number	Headwater Reach	Reach length (km)	Downstream		Location		Element Number >=1
					Latitude	Longitude	Upstream (km)	Downstream (km)	
Rio Ubaté (La Malilla)	Rio Hato	1	Yes	0.65	5.33	73.89	22.143	21.498	2
	La Boyera	2		5.39	5.32	73.89	21.498	16.112	2
	Pte Barcelona	3		8.05	5.30	73.85	16.112	8.062	2
	Rio Suta	4		2.39	5.34	73.80	8.062	5.667	2
	Rio Lenguazaque	5		2.15	5.34	73.78	5.667	3.519	2
	El Cubio	6		3.01	5.35	73.77	3.519	0.512	2
	Pte Colorado	7		0.51	5.38	73.76	0.512	0.000	2

QUAL2K Time Zones Headwater Downstream Reach Reach Rates Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover

Figura 13. Datos de estaciones y puntos de muestreo.

Microsoft Excel - Tesis Ubaté K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Río Ubaté (11/11/2012)**

4 **Reach Data:**

5

6 Reach for diel plot 1

7 Element for diel plot 1

Reach	Downstream end of reach label	Elevation		Downstream						Hydraulic Model			
		Upstream (m)	Downstream (m)	Latitude			Longitude			Velocity		Rating Curves	
Label				Degrees	Minutes	Seconds	Degrees	Minutes	Seconds	Coefficient	Exponent	Coefficient	Exponent
Río Ubaté (La Malilla)	Río Hato	2845.000	2812.000	5.00	19	38	73.00	53	25.4	0.7875	0.427	0.3325	0.400
	La Boyera	2812.000	2655.000	5.00	19	19	73.00	53	27.7	0.7875	0.427	0.3325	0.400
	Pte Barcelona	2655.000	2559.000	5.00	18	12	73.00	51	5.9	0.3181	0.326	0.3727	0.391
	Río Suta	2559.000	2553.000	5.00	20	14	73.00	47	53.1	0.3181	0.326	0.3727	0.391
	Río Lenguaque	2553.000	2547.000	5.00	20	19	73.00	46	47	0.3181	0.326	0.3727	0.391
	El Cubio	2547.000	2540.000	5.00	21	4	73.00	46	26	0.3181	0.326	0.3727	0.391
	Pte Colorado	2540.000	2545.000	5.00	22	41	73.00	45	40.9	0.3181	0.326	0.3727	0.391

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

QUAL2K Time Zones Headwater Downstream Reach Reach Rates Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover

Figura 14. Entrada de datos de estaciones y puntos de muestreo.

Microsoft Excel - Tesis Ubaté K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Río Ubaté (11/11/2012)**

4 **Reach Rates and Velocities:**

5

6

7 **Reach**

8 **Number**

9

10 1 Río Ubaté (La Malilla)

11 2

12 3

13 4

14 5

15 6

16 7

1079

1080

1081

1082

1083

1084

1085

1086

1087

1088

1089

1090

1091

Run Fortra

Reach Number	Reach Label	Prescribed Reaeration /d	Fast CBOD Oxidation Rate /d
1	Río Ubaté (La Malilla)	3.50	1.00
2		8.00	0.05
3		4.00	2.00
4		4.00	1.80
5		8.00	2.00
6		1.00	4.00
7		6.00	0.05

QUAL2K Time Zones Headwater Downstream Reach Reach Rates Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover

Figura 15. Entrada de coeficientes K1 y K2.

Microsoft Excel - Tesis Ubate K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Rio Ubate (11/11/2012)**

4 **Diffuse Source Data:**

5

6

Name	Tributary No.*	Headwater Label	Location		Diffuse Abstraction m3/s
			Up km	Down km	
Extraccion 1	0	Mainstem headwater	21.50	16.11	0.0120
Extraccion 2	0	Mainstem headwater	16.11	8.06	0.0070
Extraccion 3	0	Mainstem headwater	8.06	5.67	0.0750
Extraccion 4	0	Mainstem headwater	3.52	0.51	0.3270

1051

1052

1053

1054

1055

1056

1057

1058

1059

1060

1061

1062

1063

1064

1065

1066

Reach Rates Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover Shade Rates Light and Heat Diffuse Sources Point Sources

Figura 16. Extracciones de caudal.

Microsoft Excel - Tesis Ubate K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Rio Ubate (11/11/2012)**

4 **Point Source Data:**

5

6

Name	Tributary No.	Headwater Label	Location km	Point		Temperature	Dissolved Oxygen		Fast CBOD	
				Abstraction m3/s	Inflow m3/s	mean °C	mean mg/L	time of	mean mgO2/L	time of
Rio Hato	0	Mainstem headwater	21.496		0.7000	19.00	5.10	12:00 AM	5.20	12:00 AM
Rio Suta	0	Mainstem headwater	5.67		0.1100	16.00	0.00	12:00 AM	196.00	12:00 AM
Rio Lenguazaque	0	Mainstem headwater	3.52		0.3420	19.00	6.20	12:00 AM	6.50	12:00 AM

1011

1012

1013

1014

1015

1016

1017

1018

1019

1020

1021

1022

1023

1024

1025

1026

1027

1028

1029

1030

1031

1032

1033

1034

1035

Air Temperature Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover Shade Rates Light and Heat Diffuse Sources Point Sources Hydro

Figura 17. Aportes de Caudal.

Microsoft Excel - Tesis Ubate K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Rio Ubaté (11/11/2012)**

4 **Hydraulics Data:**

5 0 for Mainstem, 1 for tributary one, 2 for tributary two, and so on...

6

7

Tributary No.	Distance x(km)	Q-data m3/s	H-data m	U-data m/s	Travel time data (d)
9	0	22.141	0.209		
10	0	21.498	0.214		
11	0	16.112	0.902		
12	0	8.062	0.895		
13	0	5.667	0.930		
14	0	4.031	1.272		
15	0	0.512	0.945		
16	0	0.000	0.945		

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

Dew Point Temperature Wind Speed Cloud Cover Shade Rates Light and Heat Diffuse Sources Point Sources Hydraulics Data Temp

Open Old File Run Fortran

Figura 18. Entrada de datos de caudal.

Microsoft Excel - Tesis Ubate K2 [Modo de compatibilidad]

1 **QUAL2K**

2 **Stream Water Quality Model**

3 **Rio Ubaté (11/11/2012)**

4 **Water Quality Data:**

5 0 for Mainstem, 1 for tributary one, 2 for tributary two, and so on...

6

7

Tributary No.	Distance km	DO (mgO2/L) data	BODf (mgO2/L) data
9	0	22.141	6.30
10	0	21.498	6.00
11	0	16.112	5.90
12	0	8.062	5.70
13	0	5.667	5.00
14	0	4.031	3.50
15	0	0.512	1.40
16	0	0.000	1.80

1105

1106

1107

1108

1109

1110

1111

1112

1113

1114

1115

1116

1117

Cloud Cover Shade Rates Light and Heat Diffuse Sources Point Sources Hydraulics Data Temperature Data WO Data WO Data Min

Open Old File

Figura 19: Entrada de datos de parámetros de calidad.

Los resultados finales de la calibración se resumen en la tabla 10 y en las figuras 20 y 21. Dichos resultados indican existencia de condiciones aerobias en todos los tramos analizados del río Ubaté, valores de K_1 entre 0,5 y 4,0 d^{-1} , valores de K_2 entre 1 y 8 d^{-1} y constantes de autopurificación (K_2/K_1) de 0,3 y 12 que difieren ampliamente de los valores citados por FAIR para el modelo de oxígeno disuelto [21].

Las distancias en el programa Q2K se definen de manera inversa a la señalada en la figura 10, así el K0+000 en el esquema, en la modelación será la abscisa K22+141.

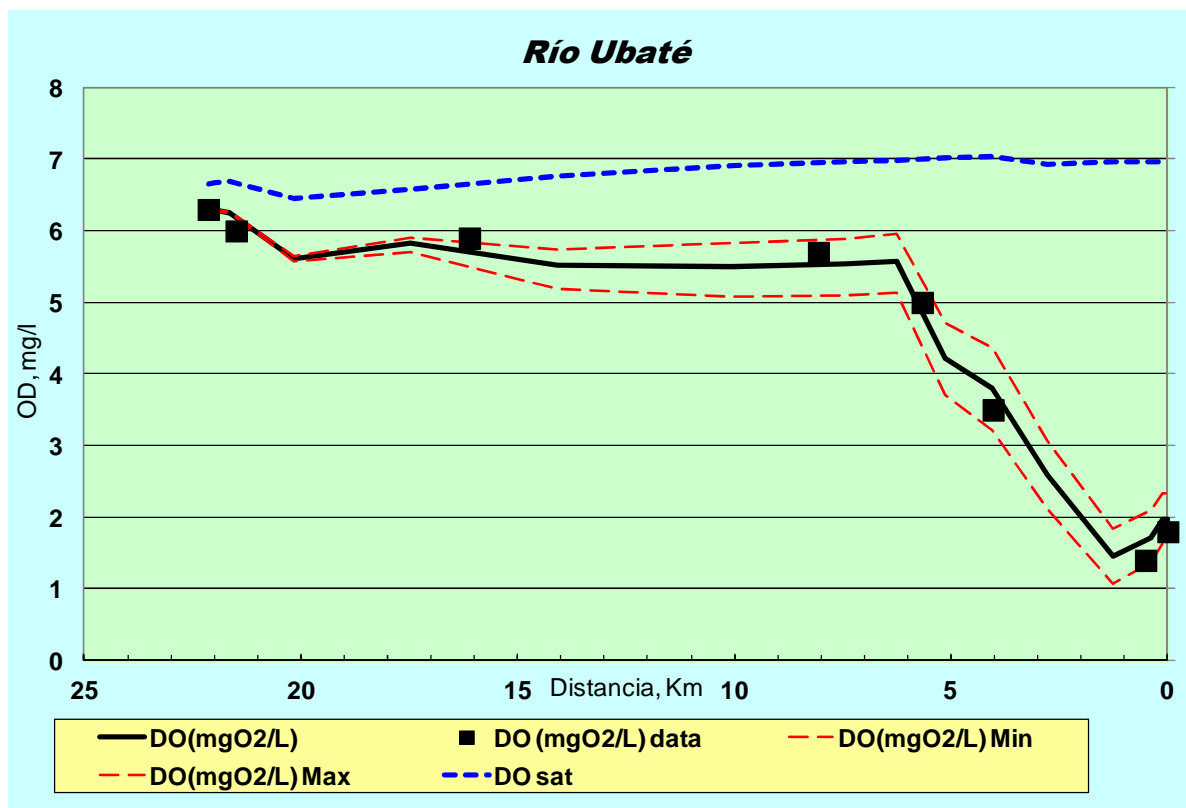


Figura 20. Curva de OD. Condiciones actuales

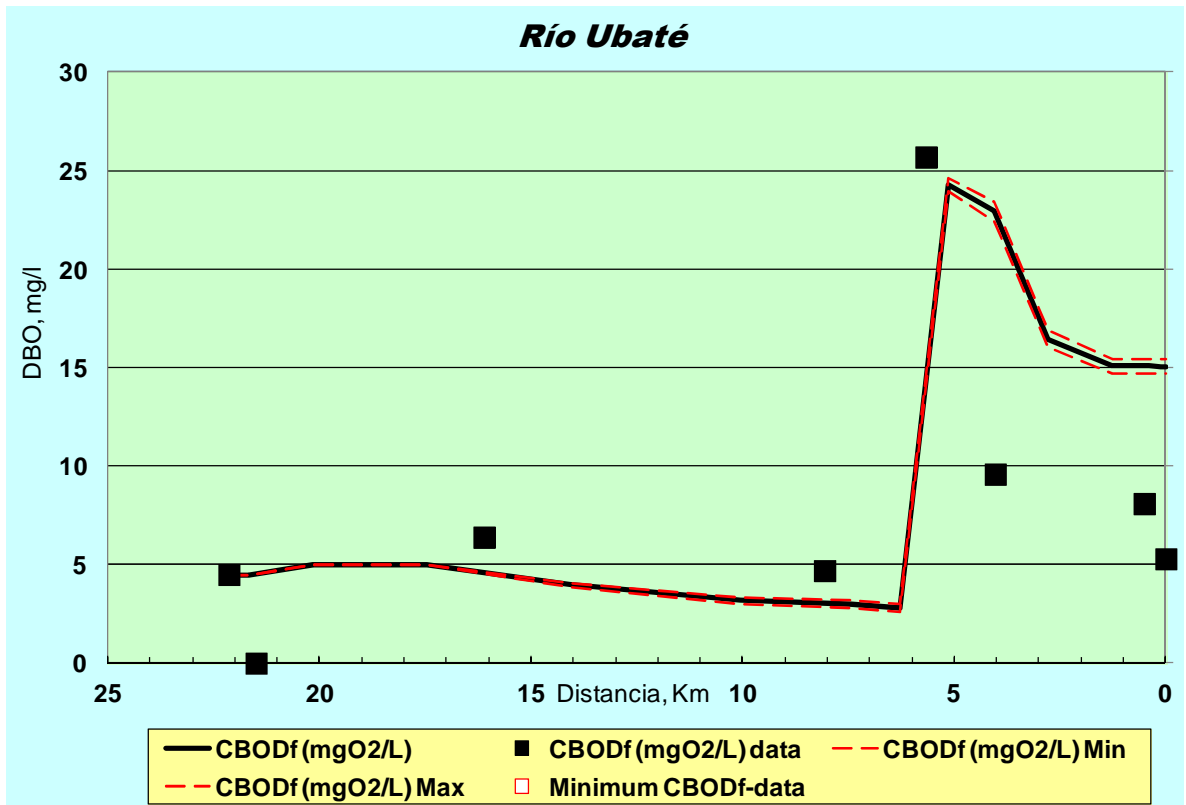


Figura 21. Curva de DBO. Condiciones actuales.

Las constantes de calibración son ajustadas de tal manera que sean coherentes con el perfil de OD medido y tengan soporte en la literatura técnica. [21]

Tabla 10. Constantes de calibración

Tramo	Constante Ajustada		
	K_1 (d ⁻¹)	K_2 (d ⁻¹)	K2/K1
Tramo 1	1.0	3.5	3.5
Tramo 2	2.00	4.00	2.0
Tramo 3	1.8	4.0	2.2
Tramo 4	1.8	4.0	2.2
Tramo 5	2.0	8.0	4.0
Tramo 6	0.50	6.00	12.0
Tramo 7	2.0	1.0	0.5

5. RESULTADOS

5.1 ESCENARIO 1. Condiciones actuales con caudales mínimos

En la figura 22 se presentan los datos para la simulación del río con las condiciones para afluentes y efluentes actuales y asumiendo la ocurrencia de caudales mínimos en el río.

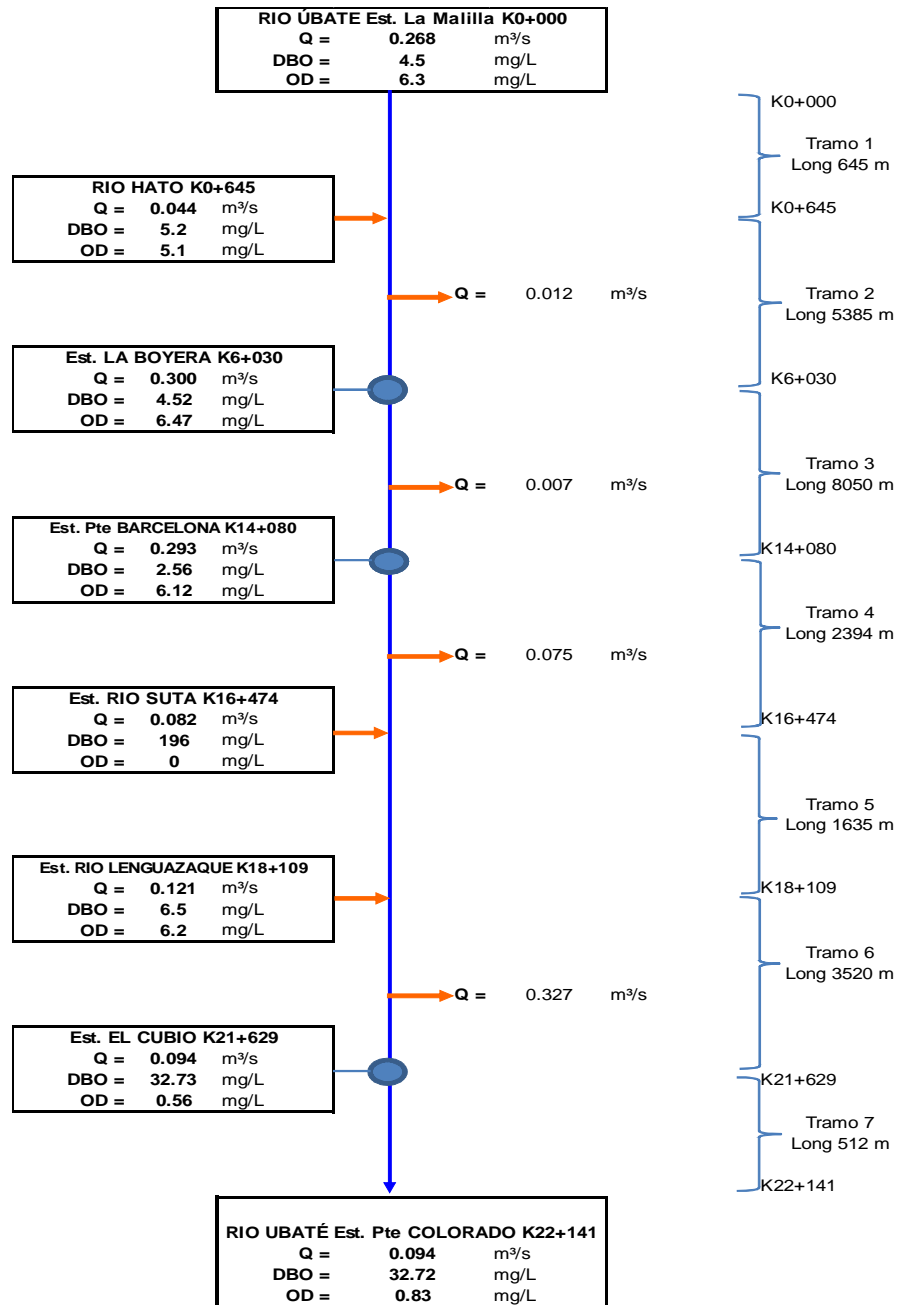


Figura 22. Perfil escenario 1

En las figuras 23 y 24 se incluyen los resultados de la simulación con caudales mínimos, para OD y DBO.

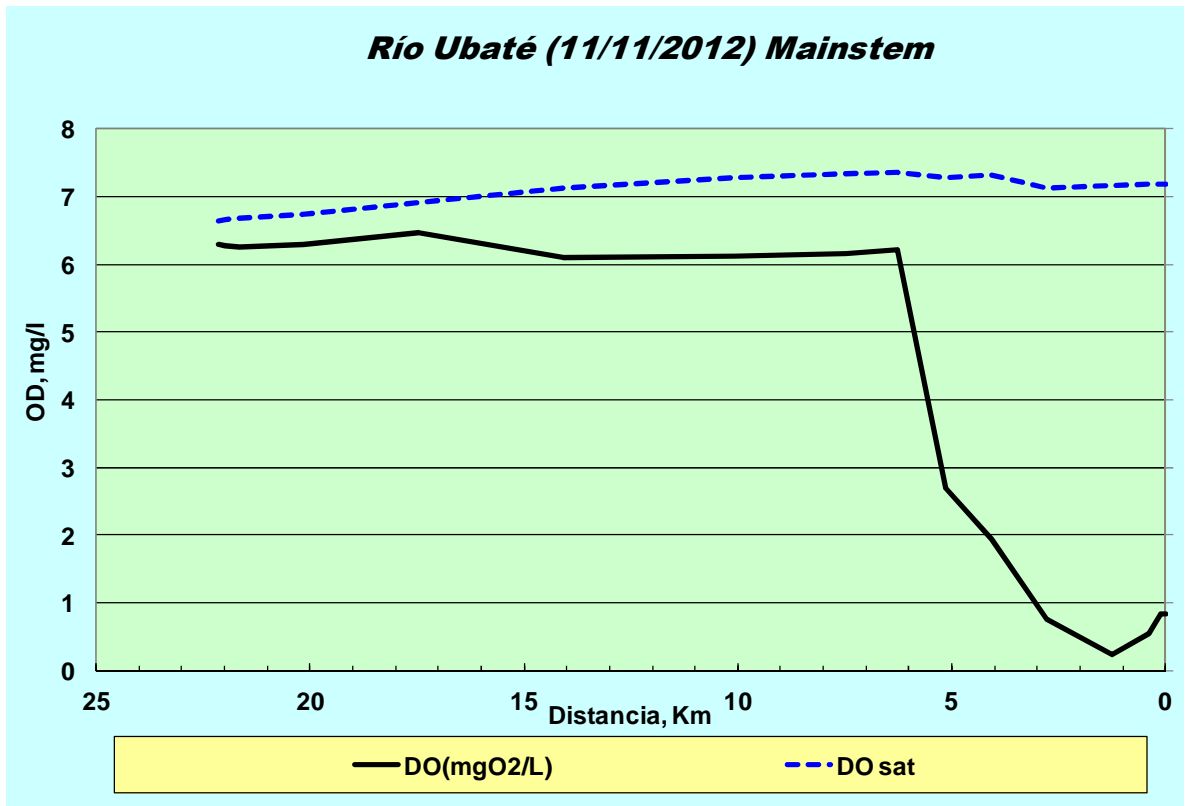


Figura 23. Curva de OD para Qmin y sin tratamiento

Como se muestra en la figura 23, el oxígeno disuelto en el río Ubaté alcanza niveles cercanos a la de saturación, a pesar del caudal en condiciones de estiaje, hasta cuando se presenta la descarga del río Suta, el cual con su aporte de materia orgánica sin ninguna remoción, precipita la concentración de oxígeno disuelto por debajo de 1 mg/l, hasta su desembocadura en la laguna de Fúquene.

En la figura 24, se muestra como la DBO hasta la descarga del río Suta mantiene valores por debajo de 10 mg/l, superando los 50 mg/l después de la descarga del río Suta y decrece hasta un valor de 33 mg/l en la desembocadura sobre la laguna de Fúquene.

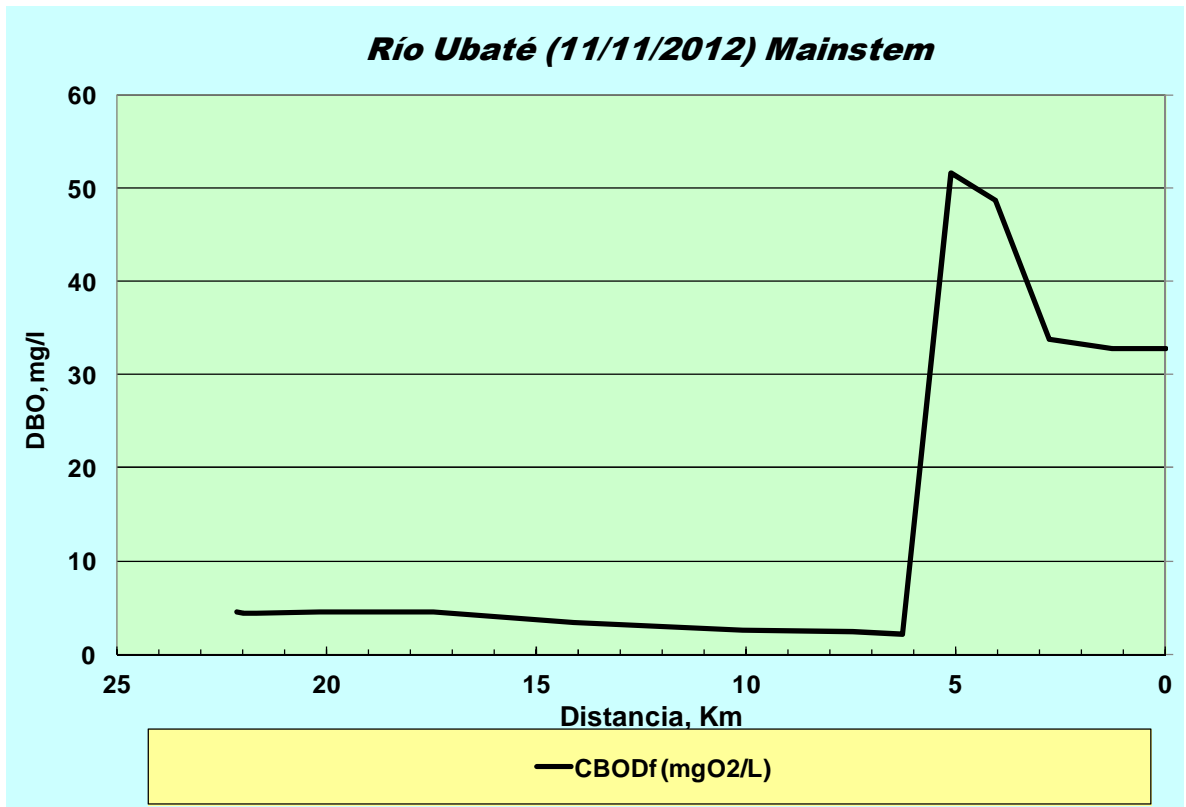


Figura 24. Curva de DBO para Qmin y sin tratamiento

5.2 ESCENARIO 2. Con tratamiento primario de los afluentes al río Suta

En la figura 25 se muestran los datos para la simulación del río con la suposición de que exista tratamiento primario para el afluente en la estación río Suta así:

- Remoción del 40% de DBO y OD de 2 mg/l en el río Suta
- Caudales mínimos en el río y extracción de caudal actuales.

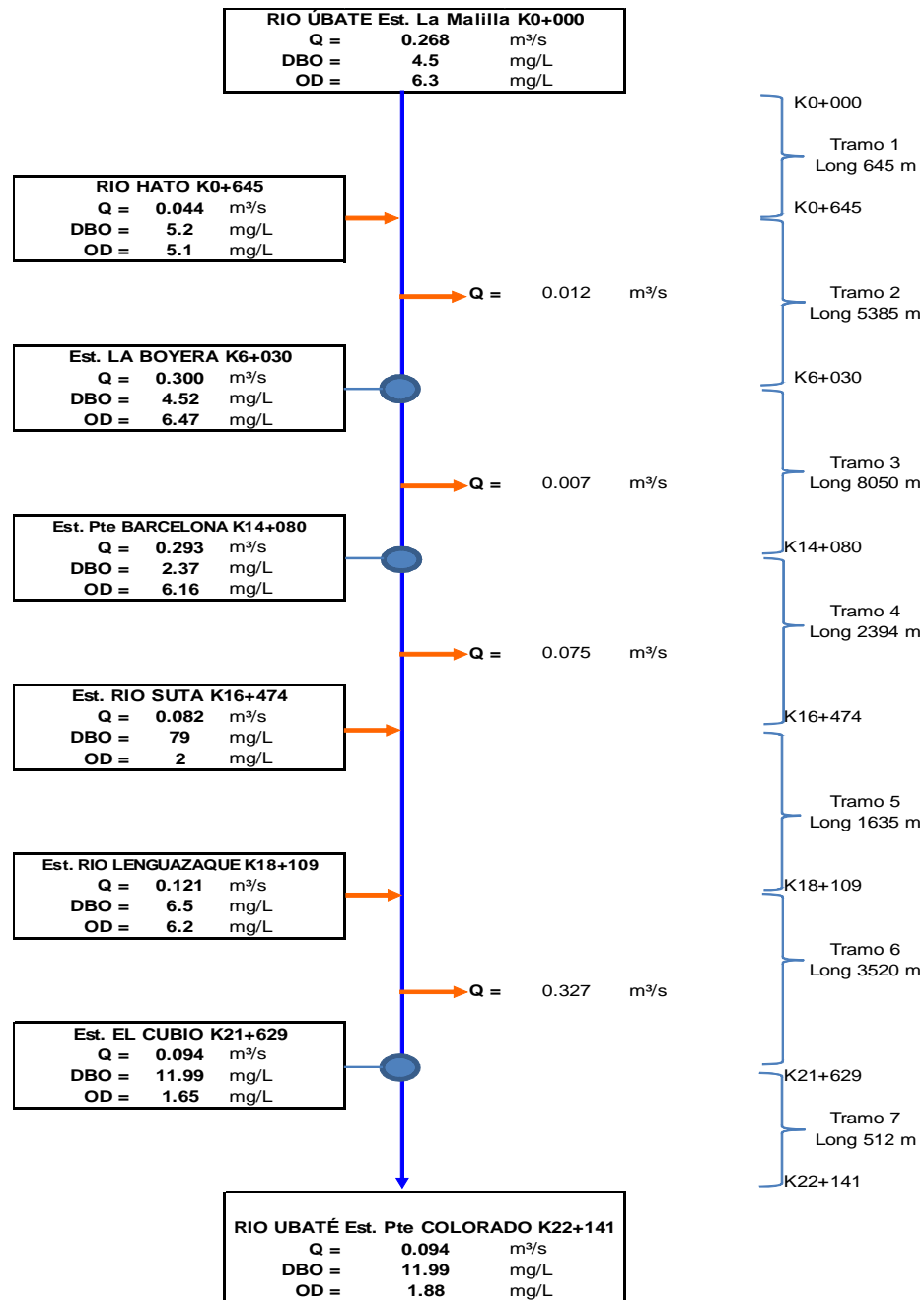


Figura 25. Perfil escenario 2

En las figuras 26 y 27 se incluyen los resultados de la simulación del escenario 2 con caudales mínimos y remoción del 40%, en DBO sobre el río Suta.

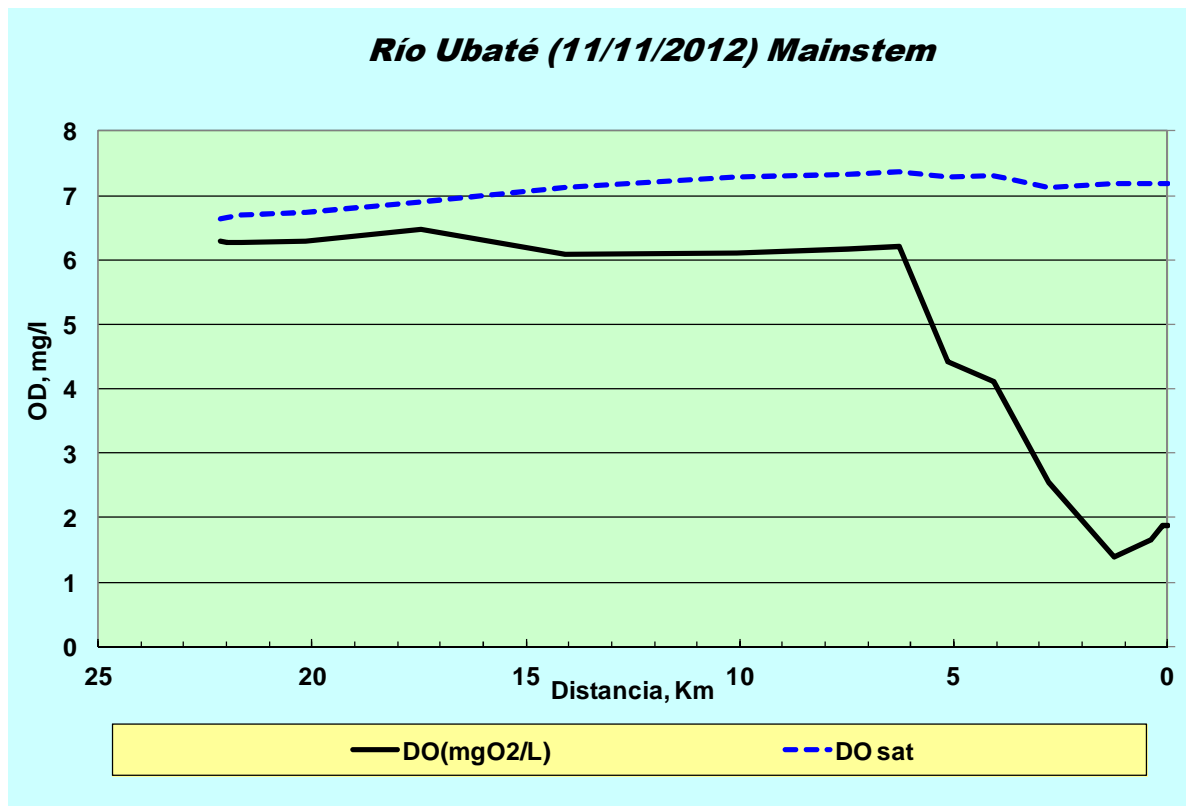


Figura 26. Curva de OD para Qmin, 40% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta

En la figura 26 se observa que el tratamiento primario del afluente proveniente del río Suta permite subir el OD a niveles superiores de 1,4 mg/l en todo el río.

En la figura 27 se muestra la disminución de la concentración de DBO a 12 mg/l en la desembocadura, con un valor máximo de 21 mg/l, en la descarga del río Suta.

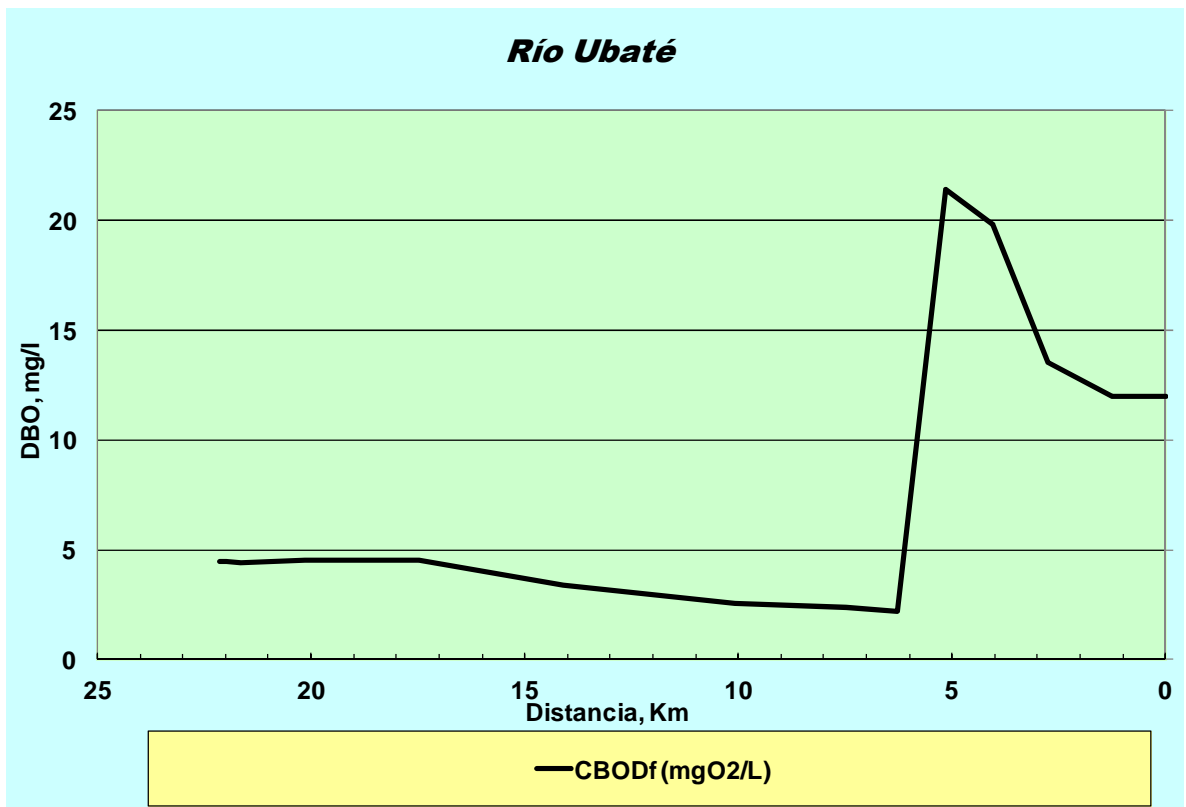


Figura 27 Curva de DBO para Qmin, 40% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta

5.3 ESCENARIO 3. Con tratamiento secundario de los afluentes al río Suta

En la figura 28 se incluyen los datos para la simulación del río asumiendo:

- Remoción del 80% de DBO y OD de 2 mg/l en el río Suta.
- Caudales mínimos en el río y extracción de caudales actuales.

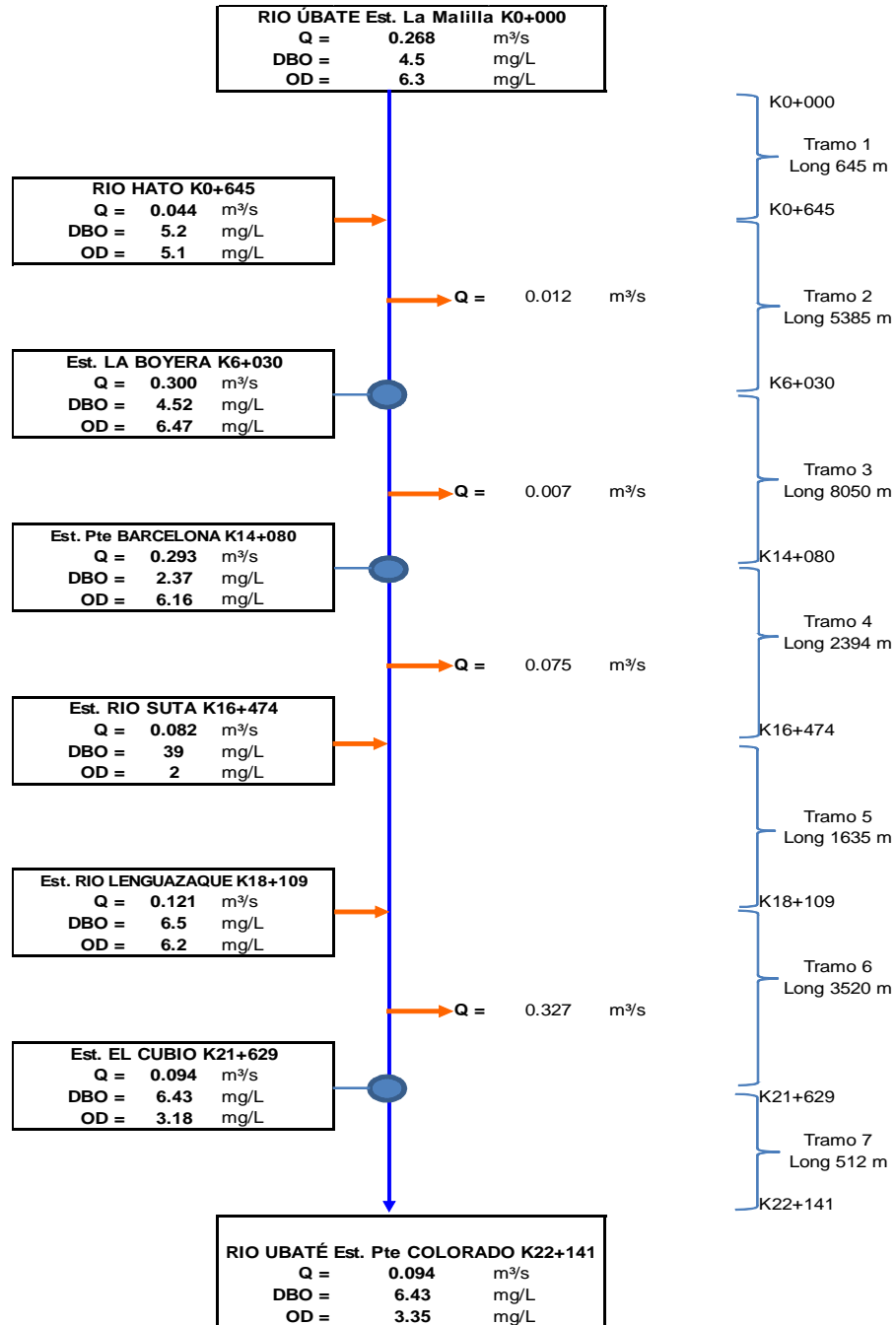


Figura 28. Perfil escenario 3

En las figuras 29 y 30 se incluyen los resultados de la simulación del escenario 3 con caudales mínimos y remoción del 80%, para OD y DBO.

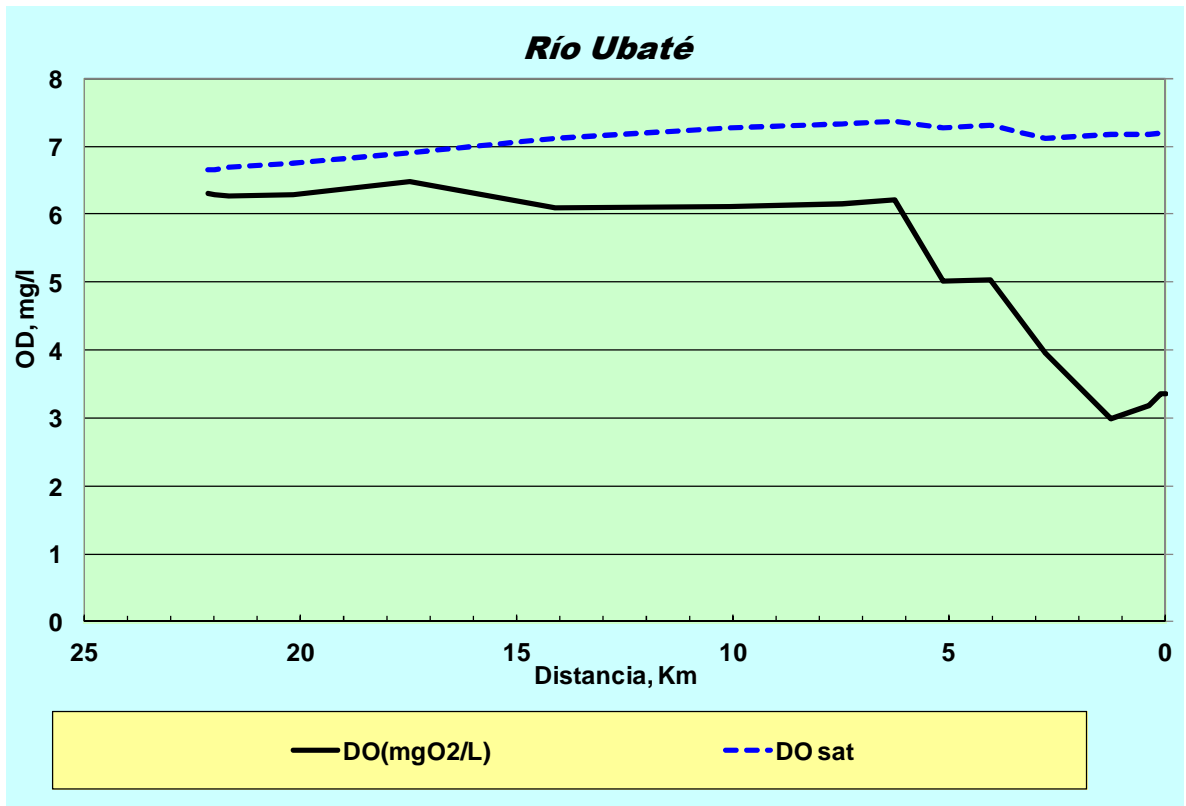


Figura 29. Curva de OD para Qmin, 80% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta.

En la figura 29 se observa que el tratamiento secundario del afluente del río Suta permite concentraciones de OD superiores a los 3 mg/l en todo el río

La figura 30 muestra que con tratamiento secundario la concentración de DBO en la desembocadura es inferior a 7 mg/l y la DBO máxima es de 11 mg/l en la descarga del río Suta.

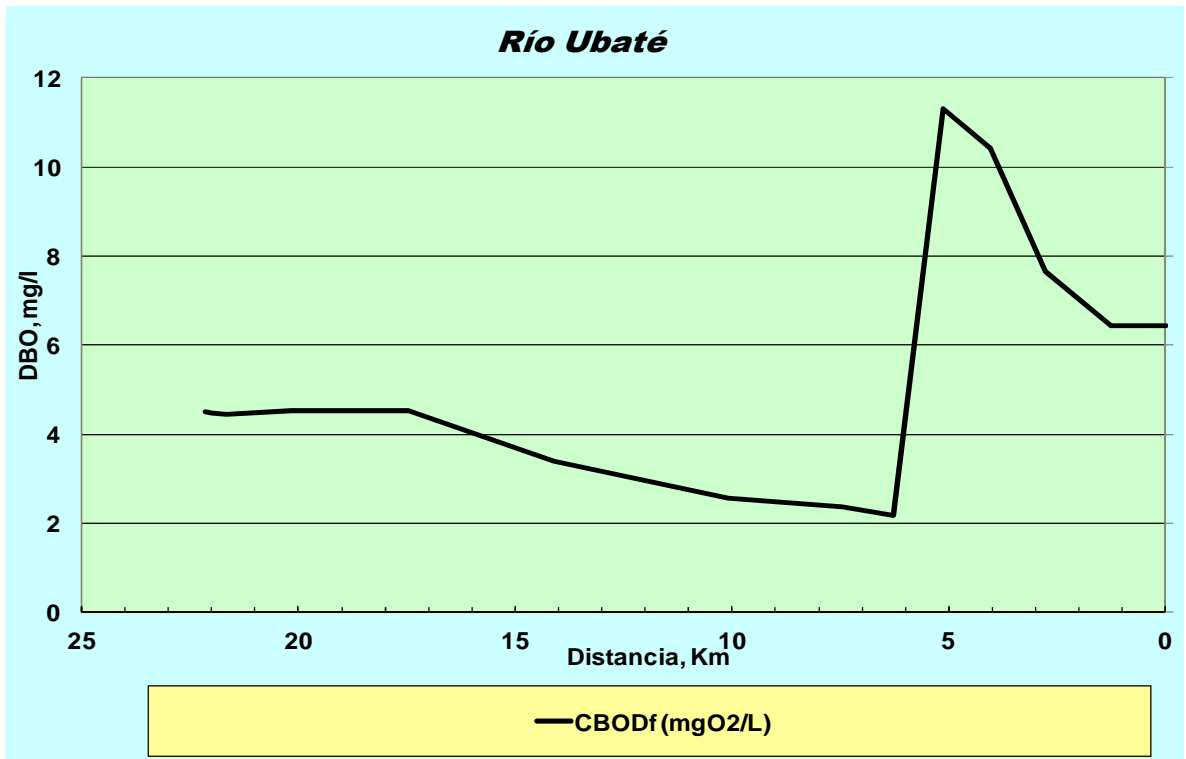


Figura 30. Curva de DBO para Qmin, 80% de remoción de DBO y 2 mg/l de OD en el río Suta.

5.4 RESUMEN DE RESULTADOS.

En las figuras 31, 32, 33 y 34 así como en la tabla 11 se resumen los resultados para las condiciones evaluadas en el río Ubaté.

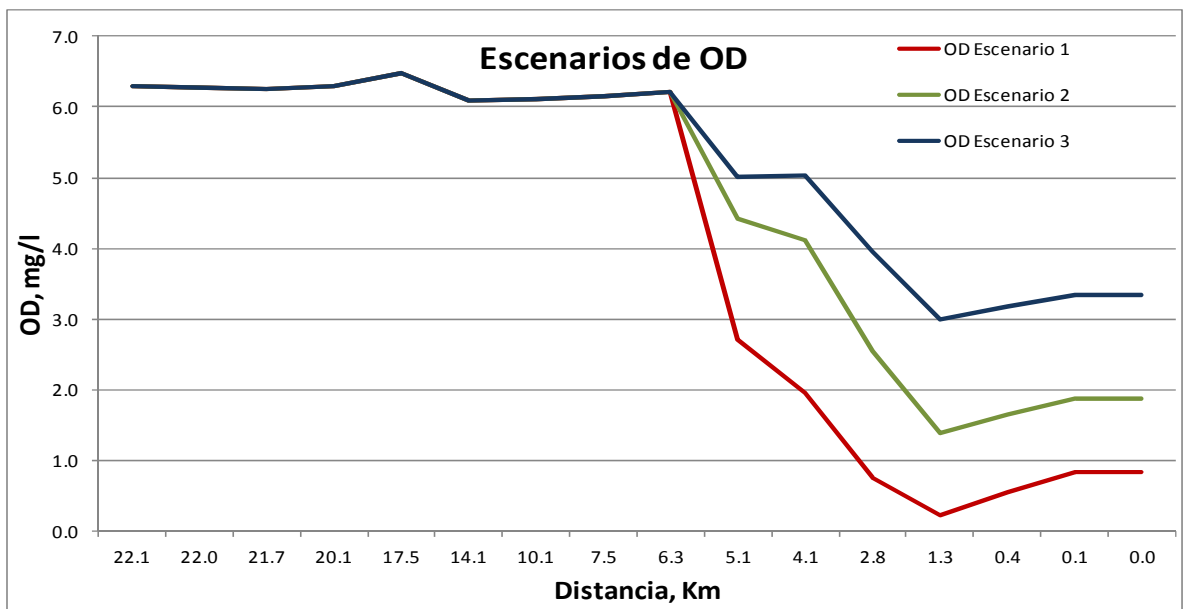


Figura 31. Curvas de OD en todos los escenarios.

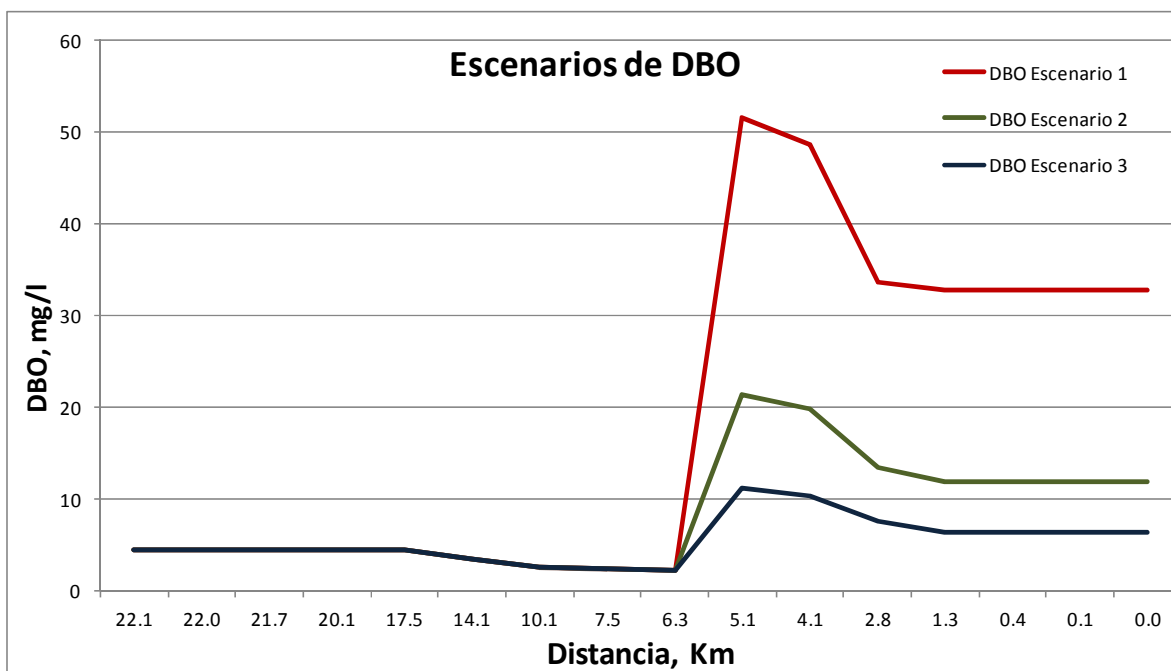


Figura 32. Curvas de DBO en todos los escenarios.

Tabla 11. Resultados de la simulación

Escenarios	OD, mg/l		DBO, mg/l		Desembocadura	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	OD, mg/l	DBO, mg/l
1	0.2	6.5	2	52	0.8	33
2	1.4	6.5	2	21	1.9	12
3	3.0	6.5	2	11	3.3	6.4

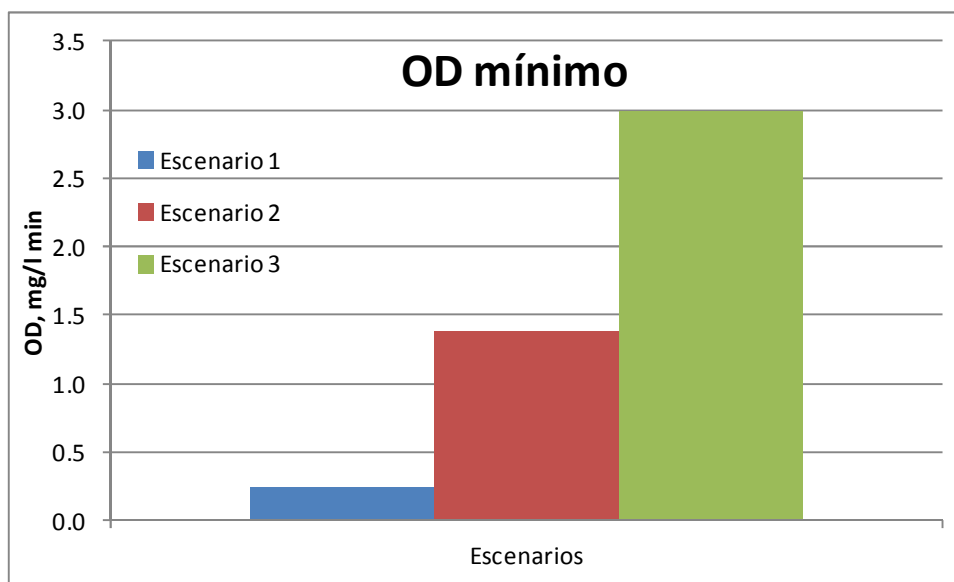


Figura 33. Valores de OD mínimo de los escenarios modelados.

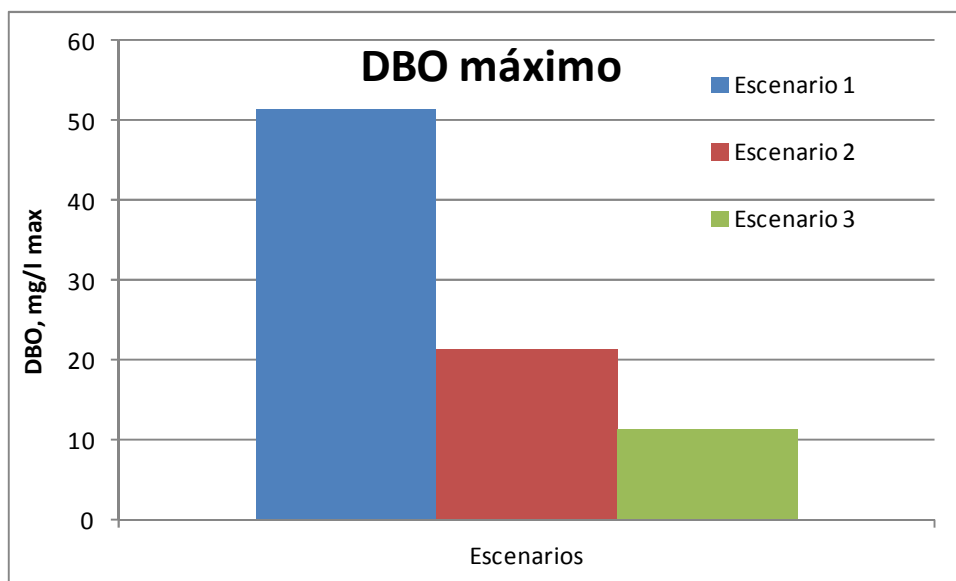


Figura 34. Valores de DBO máximo de los escenarios modelados.

Como se observa en las figura 31 a 34 y en la tabla 11, el tratamiento primario de las aguas del río Suta permite aumentar los valores de OD a mas de 1,4 mg/l en todo el río y disminuir las concentraciones de DBO en la desembocadura sobre la laguna de Fúquene a 12 mg/l.

Con tratamiento secundario de las aguas del río Suta se obtiene una mejor condición de calidad del río Ubaté con OD mayor de 3 mg/l en todo el río y DBO de 6,4 mg/l en la desembocadura sobre la laguna de Fúquene.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ El río Ubaté, en las condiciones actuales muestra valores de OD en los primeros 16 km por encima de 6 mg/l, lo que indica condiciones de un río saludable. Sin embargo, después de la descarga del río Suta, la concentración de OD llega a valores por debajo de 1 mg/l, condición de un cuerpo seriamente contaminado.
- ✓ En las condiciones actuales, el río Ubaté se encuentra catalogado, según la resolución 3462 de 2009 como de clase III, es decir con agua apta solo para ganadería y actividades agrícolas restringidas.
- ✓ En las condiciones de estiaje del río Ubaté se presenta la condición mas desfavorables de calidad del agua, con valores de OD cercanos a 0 mg/l y concentraciones de DBO por encima de los 50mg/l tratándose de un cuerpo de agua clase IV, apta sólo para actividades agrícolas restringidas.
- ✓ Con el tratamiento primario de los afluentes del río Suta, se alcanza una mejor condición de calidad, pero sin lograr satisfacer los requerimientos de la CAR para un río de clase II, según la resolución 3462 de 2009, agua apta para consumo humano con tratamiento convencional, por tener valores de OD menores de 4 mg/l y DBO superiores de 10 mg/l.
- ✓ La simulación del tratamiento secundario a los afluentes del río Suta, revela niveles de DBO por debajo de 11 mg/l y OD mayores de 3 mg/l muy próximos a las condiciones de clase I, de la resolución 3462 de 2009 de la CAR para aguas aptas para consumo humano con tratamiento convencional y para conservación de fauna y flora, uso agrícola y recreación.
- ✓ Los perfiles de OD y DBO evaluados indican que la descarga del río Suta es la causante del deterioro de la calidad del agua del río Ubaté.
- ✓ Para la recuperación del río Ubaté se requiere el mejoramiento de sus afluentes, en especial del río Suta, el cual es el receptor de los sistemas de alcantarillado de las poblaciones existentes en dicha cuenca.
- ✓ Según la simulación, para que el río Ubaté pueda ser catalogado como un cuerpo de agua clase I, según la resolución 3462 de la CAR, es necesario implementar tratamiento secundario sobre las descargas que se generan de los sistemas de alcantarillado de los municipios de Tausa, Sutatausa y Ubaté sobre el río Suta y garantizar una concentración de OD superior a 2 mg/l en los vertimientos de estos sistemas.

- ✓ Teniendo en cuenta que la simulación realizada se hace suponiendo constantes de cálculo ajustadas al perfil medido de OD en el río en el año 2009, es necesario recomendar, para una simulación posterior, realizar un programa permanente de monitoreo de OD y DBO en el río Ubaté con determinación de los valores de K_2 y K_1 en terreno, para los diferentes tramos de simulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OYARZÚN GALLARDO, Jessica Paola. Modelación y simulación de oxígeno disuelto, materia orgánica y relación distribucional de macroinvertebrados en la subcuenca del río Traiguén, Temuco: Escuela Politécnica del Ejército. 2004.
- (2) CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL – CAR. Boletín de Calidad de Las Cuencas de la Jurisdicción CAR 2007 – 2009. Bogotá: CAR. 2010.
- (3) UNION TEMPORAL AUDICON – AMBIOTEC, Diagnóstico Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica de los Ríos Ubaté y Suárez. Bogotá: CAR. 2011.
- (4) CAR - Resolución No. 3462 del 28 de Diciembre de 2009, por la cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez, a lograr en el año 2020.
- (5) CAR - Resolución No. 2152 del 22 de Agosto de 2011, por la cual se inicia el proceso de consulta de metas de reducción de cargas contaminantes de DBO5 y SST arrojados a los cuerpos de agua que conforman la cuenca, tramos y subtramos de los ríos Ubaté y Suárez.
- (6) MEDINA ROMERO, Edna Margarita. Evaluación de la Capacidad de Autorecuperación de la Cuenca del Río Tunjuelo. 2006-2009. Bogotá: Universidad Uniciencia. Facultad de Ingeniería Ambiental. 2010.
- (7) SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. Calidad del Agua, Evaluación y Diagnostico. Bogotá: Ediciones U. Universidad de Medellín. 2011.
- (8) ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales. Tercera edición. Bogotá: Edit. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2004.
- (9) CHAPRA, Steve; PELLETIER, Greg and TAO, Hua. Qual2K, A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. Medford, MA: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University. 2008.
- (10) VALCÁRCEL ROJAS, Lino et al. Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. En: Nucleus, no. 47. 2010.
- (11) CONPES. Documento 3699. Garantía de la nación a la corporación autónoma regional de Cundinamarca –CAR. Para contratar una operación de crédito público externo con el gobierno de Francia hasta por la suma de

Eur 33,24 millones, o su equivalente en otras monedas, destinado a la financiación del programa implementación de las tecnologías ambientales necesarias al control cuantitativo y cualitativo del recurso hídrico de la cuenca Ubaté Suárez, Bogotá: Ministerio de Hacienda y Crédito Público. 2011.

- (12) EPA. Rates, Constants, and kinetic formulation in surface water Quality Modeling, Athen, Georgia: U.S. Environment Protection Agency. 1985.
- (13) BOLUDA BOTELLA, Nuria. Modelización de vertido de aguas residuales en sistemas fluviales. Universidad de Alicante. Alicante: Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química. 2007.
- (14) HOLGUIN, J.; VELEZ, C.; GALVIS, A.; RAMIREZ, C.; BAENA, L., DUQUE, A. Implementación de un modelo dinámico para el estudio de calidad del agua en el río Cauca, Cali: Universidad del Valle/Instituto CINARA. En: Avances en investigación y desarrollo y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio. Cali: Universidad del Valle. 2007.
- (15) ESPINOSA E, Paulo M. Modelamiento de la parte baja del río Palo. Cali: Universidad del Cauca. 2011.
- (16) SALAS, Henry J. Informe Técnico 408. Calibración del Modelo Matemático de calidad del agua, RIOS 3, en el río Machangara en Quito. [en línea]. 1994. Disponible en internet: <<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan2/029534/029534-01.pdf>> [citado en 14 marzo de 2011].
- (17) CHAPRA, Steven. Surface water-quality modeling, Boston: McGraw-Hill. 1997.
- (18) CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA –CAR. Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica de los ríos Ubaté y Suarez. Bogotá: CAR. 2006.
- (19) MARTÍNEZ, Anny; GALVIS, Alberto; HOLGUÍN, Javier. Optimización de la Modelación de la Calidad del Agua del Rio Cauca, Conferencia Latinoamericana de Saneamiento. En: Bogotá: ed: Editorial LITOCENCOA. p.289 – 300. 2007.
- (20) METCALF & EDDY. Ingeniería Sanitaria, Vol.1: Tratamiento, Vertido y Reutilización. Estados Unidos: Ed. Labor. 1995.

- (21) FAIR, Gordon Maskew; GEYER, John; OKUN, Daniel. Ingeniería Sanitaria y de Aguas residuales. México: Limusa. 1971.
- (22) Congreso de Colombia - Decreto Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974. Código nacional de los recursos naturales y protección al medio ambiente.
- (23) Documento COMPES 3699 de julio de 2011. Garantía de la Nación. Departamento Nacional de Planeación.
- (24) M.A.V.D.T. Decreto 3930 del 25 de Octubre de 2010, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- (25) LOUCKS, Peter, UNESCO. Water Resources Management. UNESCO 1994