

CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL RÍO CAUCA

Carlos Ramírez Callejas*

RESUMEN

El presente artículo describe en su primera parte los estudios efectuados para lograr una caracterización detallada del comportamiento hidrológico, hidráulico, sedimentológico, geomorfológico y de la calidad del agua del Río Cauca y sus tributarios en el sector comprendido entre la represa de Salvajina y el municipio de La Virginia. Posteriormente, se presenta el proceso de implementación de un modelo matemático para el Río Cauca y sus afluentes en el tramo mencionado. Este proceso incluyó la esquematización del sistema fluvial, la calibración y la verificación del modelo matemático y el análisis de sensibilidad de los principales parámetros físicos y numéricos del modelo.

* M.Sc. Profesor Titular Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - Universidad del Valle.
E-mail: caramir@mafalda.univalle.edu.co

Fecha de recepción: Mayo 30 de 2002
Fecha de aprobación: Julio 18 de 2002

Palabras Clave: Hidrología, Modelación Matemática, Calidad del Agua, Río Cauca - Colombia.

ABSTRACT

This paper describes the studies carried out in order to get a detailed knowledgement of the hydrologic, hydrodynamic, sedimentological, geomorphological and water quality behavior of the Cauca River and its tributaries in the reach between Salvajina dam and the municipality of La Virginia. It also is presented the implementation process of a mathematical model for the Cauca River and its affluents in the mentioned sector. This process includes the fluvial system schematization, the calibration and the verification of the mathematical model and the sensitivity analysis of the physical and numerical model parameters.

Key words: Hydrology, Mathematical Moleling, Water Quality, Cauca River - Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El Río Cauca presenta una longitud total de 1350 Km y una cuenca hidrográfica aproximada de 63300 Km². El tramo comprendido entre la represa de La Salvajina, en el departamento del Cauca, y La Virginia, en el departamento de Risaralda, de unos 450 Km de longitud, corresponde a la zona de interés del Proyecto Caracterización y Modelación Matemática del Río Cauca.

Los ríos afluentes en esta zona se pueden clasificar, en general, como torrentes, de pendiente fuerte, que presentan crecientes considerables de corta duración y aportan al Río Cauca volúmenes significativos de sedimentos y materiales de arrastre, especialmente durante los períodos de invierno. Los ríos afluentes más destacados, son, en su orden: La Vieja, Palo, Risaralda, Ovejas, Timba, Tuluá, Bugalagrande, Guachal, Jamundí, Amaime, Claro y Riofrío.

El Río Cauca es aprovechado de manera relativamente intensa para numerosos

propósitos: generación de energía, extracción de materiales del lecho, captación de agua para diferentes usos (consumo humano, riego, etc.), drenaje, pesca, recreación, etc. Sin embargo, a pesar de estos grandes beneficios, si el manejo y las intervenciones sobre el Río Cauca y sus ríos tributarios no son las más apropiadas, se pueden originar serios problemas ambientales, tales como inundaciones, avalanchas y colapso de estructuras, principalmente durante los períodos de invierno intenso, así como de contaminación del agua.

En un cauce aluvial como el Río Cauca, las intervenciones naturales o artificiales afectan sus características hidráulicas, morfológicas y ambientales, tanto localmente como aguas arriba y aguas abajo de los sitios intervenidos. Por esto, previo a la construcción de una obra cualquiera en el río, se requiere estimar la respuesta o reacción del río a la misma, con el fin de seleccionar la alternativa que genere los mayores beneficios y los menores efectos adversos en el sistema fluvial y su entorno. Esta predicción es factible en muchos casos únicamente por medio de estudios en modelos hidráulicos (matemáticos, físicos o híbridos). De éstos, los modelos matemáticos son cada vez más usados debido a su gran flexibilidad para introducir cambios y los bajos costos de operación. Actualmente, casi sin excepción, toda obra importante en un río es ejecutada sólo después de un estudio previo de modelación.

El informe final del Estudio comprende los siguientes 10 volúmenes:

Volumen I	Caracterización del Río Cauca. Informe Principal
Volumen II	Caracterización del Río Cauca. Planos
Volumen III	Caracterización del Río Cauca. Datos y Registros
Volumen IV	Caracterización de Ríos Tributarios. Informe Principal
Volumen V	Caracterización de Ríos Tributarios. Datos y Registros

Volumen VI Caracterización de la Calidad del Agua del Río Cauca y sus Tributarios

Volumen VII Levantamiento Batimétrico Detallado del Río Cauca

Volumen VIII Modelación Matemática del Río Cauca

Volumen IX Aproximación al Plan de Muestreo de la Calidad del Agua del Río Cauca y sus tributarios

Volumen X Inventario de usuarios del agua del Río Cauca

sus caudales extremos, desde el año 1985 cuando entró en operación el embalse de Salvajina. Este cambio en el régimen de caudales y niveles es una consecuencia del efecto regulador del embalse y posiblemente de otros factores, tales como las variaciones climáticas, la deforestación en las cuencas tributarias y los cambios en el uso del suelo. Por otra parte, es importante destacar la diferencia en la extensión de los períodos de registro (Pre-Salvajina y Post-Salvajina), ya que sistemáticamente para todas

Esta investigación fue galardonada por la Sociedad Colombiana de Ingenieros con el Premio Nacional Lorenzo Codazzi en el presente año, por su importante contribución al conocimiento del territorio colombiano.

2. HIDROLOGÍA

El análisis del comportamiento hidrológico del Río Cauca, en particular la variación temporal y espacial de los niveles y los caudales, se realizó con base en la información consignada en los Boletines Hidrológicos de la CVC y la información básica de las estaciones hidrométricas disponible en la CVC.

El régimen de caudales del Río Cauca y sus tributarios más importantes está directamente relacionado con el régimen pluvial, presentando dos períodos húmedos (Abril - Junio y Octubre - Diciembre), un período seco (Julio - Septiembre) y un período de caudales bajos-medios (Enero-Marzo).

El régimen hidrológico del Río Cauca ha experimentado una variación, principalmente en

Estación	Abscisa (m)	Caudal Medio Multianual (m³/s)			Caudal Máximo Instantáneo Histórico (m³/s)		Caudal Mínimo Instantáneo Histórico (m³/s)		Caudal (m³/s)			Caudal Máximo Estimado (m³/s)		
		Pre-Salvajina	Post-Salvajina	Global	Pre-Salvajina	Post-Salvajina	Pre-Salvajina	Post-Salvajina	Porc. del Tiempo en que los caudales diarios son Iguales o Excedidos			Período de Retorno (Años)		
									Post-Salvajina			Post-Salvajina		
Salvajina	0	141.2	126.6	137	1070	698	18	21	-	-	-	634	683	746
Efluente	1804.46	-	126.0	126	-	478	-	-	198	114	63	420	451	491
La Balsa	27384.77	198.7	176.7	194	1360	707	35	18	276	160	99	625	691	776
Tablanca	37103.12	198.9	179.5	187	853	666	42	20	285	160	100	617	679	760
La Bolsa	78903.33	238.2	205.7	225	763	762	44	48	330	184	116	709	783	876
Hormiguero	113484.63	269.7	249.3	266	1054	892	51	66	408	224	131	811	904	1024
Juanchito	139258.73	276.8	258.8	274	1074	943	48	77	428	228	140	853	948	1072
Mediacanoa	220915.59	334.3	297.6	321	991	946	57	92	492	263	158	860	947	1060
Guayabal	347835.39	383.9	343.6	371	1244	1142	61	95	585	302	168	998	1098	1228
La Victoria	369874.96	390.6	348.6	378	1324	1152	63	104	594	306	171	1003	1102	1230
Anacaro	416514.85	418.1	360.1	399	1361	1227	75	109	606	317	178	1061	1166	1302
La Virginia	444732.13	551.6	472.3	531	2182	1861	87	126	754	448	250	1564	1720	1923

Cuadro No. 1 - Resumen de los Caudales Característicos más Importantes del Río Cauca

Las estaciones hidrométricas sobre el Río Cauca se dispone de un mayor número de registros hidrológicos en el período Pre-Salvajina. En el Cuadro No. 1 se presentan algunos de los caudales característicos del Río Cauca para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

El estudio hidrológico incluyó el análisis de la variación espacial y temporal del régimen de caudales en el Río Cauca y los principales tributarios. Se analizó y evaluó la variación de los caudales medios mensuales, medios

multianuales, máximos y mínimos, curvas de duración de caudales y caudales extremos para diferentes períodos de retorno.

3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y MORFOLÓGICAS

El Río Cauca en el tramo Salvajina - La Virginia presenta un ancho medio de 105 metros y una profundidad media a banca llena de 7.4 metros. El ancho a banca llena puede fluctuar desde 80 metros en la parte alta del cauce (sector Salvajina - La Balsa) hasta 150 metros en la parte baja (sector Anacaro - La Virginia). La profundidad media a banca llena puede variar entre 3.5 y 8.0 metros. El perfil longitudinal del río presenta una forma cóncava con pendiente hidráulica que puede oscilar entre valores promedios de 7×10^{-4} (Salvajina-La Balsa) y 1.5×10^{-4} (tramo Mediacanoa - Anacaro). El coeficiente de rugosidad de Chezy presenta un valor promedio de $47 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$.

En desarrollo del estudio se efectuó el análisis de la variación de los diferentes parámetros hidráulicos y morfológicos en los períodos Pre-Salvajina, Post-Salvajina y el período más reciente (1995 - 1999). La mayor parte de estos análisis se realizó a partir de la información disponible en las distintas estaciones hidrométricas ubicadas a lo largo del tramo en estudio: La Balsa, La Bolsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria, Anacaro y La Virginia. Se efectuaron y evaluaron las correlaciones entre los caudales y las propiedades hidráulicas y geométricas de las secciones transversales del río (área, velocidad, ancho, profundidad hidráulica). En la Figura No. 1 se ilustran estas relaciones para la estación Juanchito.

También se investigó la variación de la pendiente hidráulica, la rugosidad y la morfología del cauce (perfiles transversales y longitudinales, sinuosidad, movilidad horizontal y las formas del fondo).

Los cambios observados en las tendencias de los distintos parámetros reflejan la dinámica del río como respuesta a las condiciones impuestas por una hidrología irregular y a las diferentes intervenciones a que viene siendo sometido el río y su cuenca, como pueden ser la extracción de materiales del lecho, las captaciones de agua para diferentes propósitos, la intensa deforestación en las cuencas de los tributarios, el embalse de Salvajina, los cambios en el uso del suelo, etc.

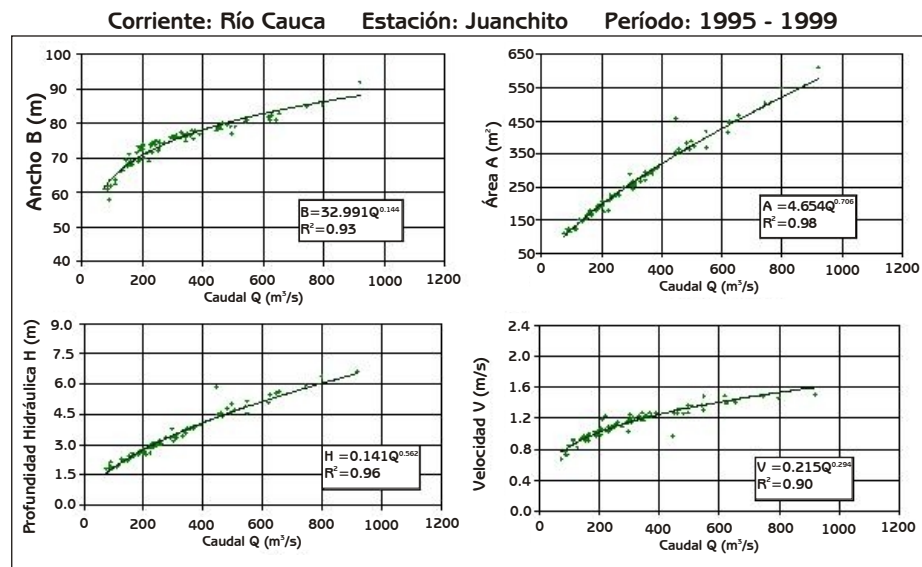


Figura No. 1 - Relaciones Caudal vs. Parámetros Hidráulicos y Geométricos

4. SEDIMENTOLOGÍA

El estudio de las características de la carga o transporte de sedimentos en un cauce aluvial es esencial en el proceso de simulación matemática para propósitos de evaluación y pronóstico de los cambios morfológicos que pueda experimentar el cauce.

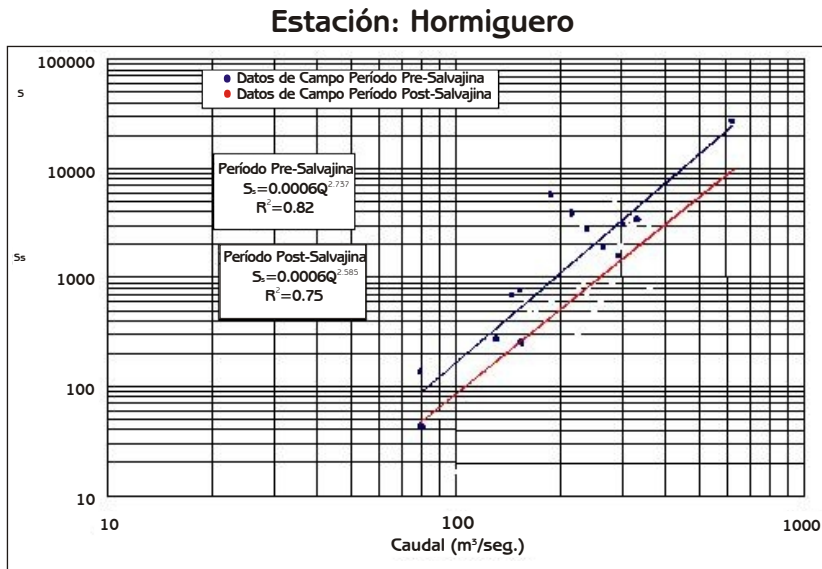


Figura No. 2 - Caudal vs. Carga Total en Suspensión del Río Cauca

En desarrollo del estudio se analizaron las diferentes características de los materiales del lecho del Río Cauca y sus afluentes, así como las diferentes tasas y tipos de transporte de sedimentos (según su origen: cargas de lavado y de material del lecho; según el modo de transporte: cargas de fondo y total en suspensión). En la Figura No. 2 se presenta la relación entre el caudal y la carga total en suspensión para la estación Hormiguero.

Se destaca en el estudio la determinación de una ecuación para estimar la carga del material del fondo del Río Cauca, en función de los parámetros hidráulicos y del sedimento, así:

$$S_b = K \frac{Q^{5.5}}{R^{5.5} B^{4.5} d_{50}}$$

Donde: S_b es la carga de material del fondo (Ton/día), Q es el caudal (m^3/s), R es el radio hidráulico (m), B es el ancho del cauce (m), d_{50} es el diámetro del material del lecho (m) y K es un coeficiente característico de cada estación hidrosedimentológica.

5. CALIDAD DEL AGUA

Se efectuó la caracterización de la calidad del agua del Río Cauca y sus afluentes, incluyendo los principales ríos afluentes y las descargas de aguas residuales municipales e industriales. Con base en la información disponible se analizó la evolución espacial y temporal, se estudió el comportamiento de la calidad del agua del Río Cauca para diferentes períodos estacionales y se estimó la condición actual del río y sus afluentes. Por último se construyeron las bases de datos para la calibración y la verificación del modelo y sus aplicaciones para propósitos de pronóstico del mismo. Algunos de los documentos

y reportes empleados se relacionan al final de este artículo (CVC, 1975; Galvis, 1988; CVC, 1997; Dagma, 1999)

La problemática ambiental del recurso hídrico en el valle geográfico del Río Cauca está asociada con la presencia de áreas degradadas por el uso inadecuado del suelo, la contaminación hídrica por las descargas de aguas residuales de los centros urbanos, los aportes de aguas residuales de las industrias y los diferentes asentamientos humanos, la contaminación hídrica por la explotación minera, los procesos de deforestación generalizada y la contaminación por basuras procedentes de los municipios.

El Río Cauca recibe cargas contaminantes desde antes de ingresar al departamento del Valle del Cauca. Desde su nacimiento hasta el municipio de Timba (localizado en el límite interdepartamental Cauca - Valle del Cauca), el río recibe en promedio 56 ton/día de materia orgánica en términos de DBO_5 (Corpes de Occidente, 1999). En el departamento del Valle del Cauca es aún más grave el deterioro, recibiendo en promedio 279 ton/día de materia orgánica, 148 de las cuales son aportadas por los

municipios del Valle del Cauca ubicados en la cuenca hidrográfica del Río Cauca (Corpes de Occidente, 1999).

Para la caracterización de la calidad del agua del Río Cauca y sus tributarios se sistematizó y analizó la información recopilada a partir de 1985, año de inicio de operación del embalse de La Salvajina, lo cual se estima representó un cambio significativo en el comportamiento de la calidad del agua del Río Cauca.

En los municipios la carga contaminante tiende a incrementarse como una consecuencia del crecimiento de la población y el escaso tratamiento de las aguas residuales domésticas. Entre 1979 y 1999 las industrias presentaron una reducción considerable de la carga contaminante. Se estima que esta reducción está asociada a la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, como una respuesta a las estrategias de control por parte de la CVC, desarrolladas en el marco de sus funciones de ente regulador del manejo del recurso hídrico.

En la Figura No. 3 se ilustra el impacto de la carga contaminante en términos de DBO₅ sobre la concentración de Oxígeno Disuelto en el Río Cauca para el tramo Salvajina - La Virginia, para las condiciones estacionales de invierno, promedio y verano en el período 1996 - 1999.

En el tramo Salvajina - Hormiguero la concentración promedio de OD se encuentra alrededor de 6.0 mg/l para las tres condiciones estacionales, por lo cual puede catalogarse la calidad del agua como aceptable (RAS, 2000). En este tramo el principal aportante de materia orgánica es el río Palo, con una carga de 15 Ton/día de DBO₅; sin embargo, de acuerdo con los registros de OD disponibles, éste no genera un impacto significativo en la concentración del OD en el río Cauca.

En el tramo Hormiguero - Mediacanoa se presenta un descenso vertiginoso en la concentración de OD en los tres períodos estacionales, registrándose concentraciones inferiores a 1.0 mg/l para la condición de verano y de

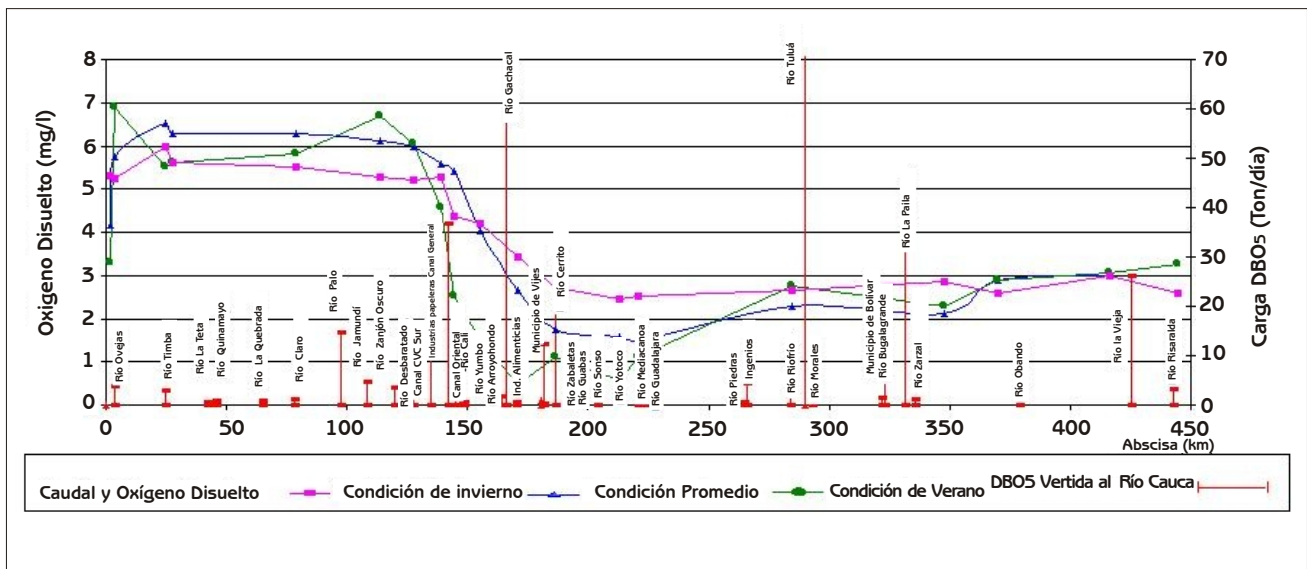


Figura No. 3 - Variación del Oxígeno Disuelto en el Tramo Salvajina - La Virginia

aproximadamente 2.5 mg/l para la condición de invierno. Estos niveles están por debajo del mínimo establecido por el Decreto 1594/84 para diferentes usos del recurso hídrico; incluso existen registros que evidencian condiciones anaeróbicas puntuales en las estaciones Puerto Isaacs, Paso de la Torre, Vijes, Yotoco y Mediacanoa.

Uno de los factores que más influye en el descenso del OD hasta valores críticos entre las estaciones Paso de la Torre y Mediacanoa, es la descomposición de la materia orgánica vertida al Río Cauca por la industria papelera, los ríos Guachal, Cerrito, Yumbo y las descargas de aguas residuales de la Ciudad de Cali. El descenso en la curva de oxígeno evidencia que ésta es la zona de descomposición activa de materia orgánica.

El tramo Mediacanoa - La Virginia se caracteriza por ser una zona de recuperación lenta del río, ya que la concentración de OD tiende a incrementarse a valores cercanos a 3.0 mg/l para las distintas condiciones estacionales de verano, promedio e invierno. A pesar de este leve incremento, los valores de OD son todavía muy inferiores al mínimo exigido por el Decreto 1594/84 (70% de la concentración de saturación: aproximadamente 5.2 mg/l).

La carga contaminante expresada en términos de DBO_5 para el tramo Mediacanoa - La Virginia se ve influenciada principalmente por los aportes de los ríos Tuluá, La Paila y La Vieja, los cuales constituyen uno de los factores que más influye en que la recuperación del OD en el Río Cauca sea lenta y no alcance los niveles mínimos exigidos por el Decreto 1594/84.

6. MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDRODINÁMICA

Para la modelación matemática se implementó el sistema de modelación MIKE 11 (Danish Hydraulic Institute, 1999), el cual permite la simulación de flujos, calidad del agua, transporte

de sedimentos y procesos morfológicos de erosión y sedimentación en ríos, estuarios, redes de canales de riego y drenaje y otros cuerpos de agua. MIKE 11 posee una serie de módulos básicos: Hidrodinámico, Advección-Dispersión, Calidad del Agua y Transporte de Sedimentos no Cohesivos. También dispone de módulos adicionales que pueden acoplarse a la mayoría de estos módulos básicos para simular otros procesos asociados.

En la esquematización del sistema fluvial se incluyeron las planicies de inundación y se consideraron los flujos de intercambio río-acuífero como parámetros de calibración. Para la malla o dominio computacional se encontró que los valores $Dt = 2.5 \text{ min}$ y $Dx_{\text{máx}} = 1000 \text{ m}$ garantizan una solución estable y suficientemente precisa.

La red esquematizada del Río Cauca en el tramo Salvajina - La Virginia quedó definida así: (i) 32 secciones transversales, consideradas las más representativas de la morfología del río y tomadas de la Campaña de Seccionamiento del Río Cauca (CVC - Universidad del Valle, 1998).; (ii) 2 fronteras externas (aguas arriba en la estación Efluente y aguas abajo en la estación La Virginia); y, (iii) 94 fronteras internas (32 ríos tributarios, 7 quebradas tributarias, 3 canales de descargas residuales de la ciudad de Cali, 1 zanjón, 1 laguna, 12 descargas residuales industriales, 4 descargas residuales municipales y 34 sitios de captación o extracción de agua). Adicionalmente fue necesario incluir 32 secciones transversales sobre la red esquematizada del Río Cauca en los sitios de confluencia de los ríos afluentes.

En el proceso de implementación del sistema de modelación matemática inicialmente se llevó a cabo la fase de calibración del modelo hidrodinámico, y posteriormente se procedió a efectuar la calibración de los modelos de transporte de sedimentos, morfológico y de calidad de agua.

Uno de los principales parámetros de calibración empleados fue el coeficiente de rugosidad o resistencia del cauce. Sin embargo, en muchas ocasiones durante la calibración, fue necesario revisar y ajustar la batimetría del cauce en algunos sectores, utilizando para ello la información batimétrica disponible de otros períodos, principalmente la más reciente (Universidad del Valle, 2000). También se utilizó como parámetro de calibración los intercambios de los volúmenes de agua entre el cauce principal y las aguas subterráneas. En la Figura No. 2 se ilustra uno de los resultados de la calibración hidrodinámica (parámetro: velocidad del flujo, estación: Juanchito).

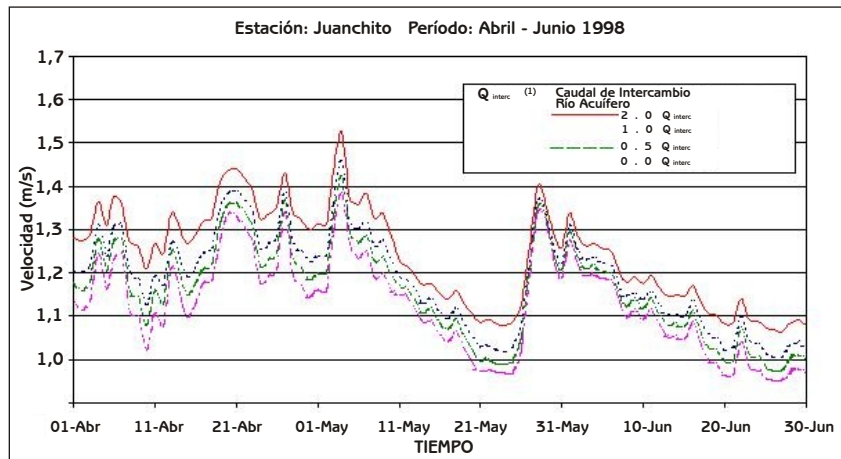


Figura No. 5 - Análisis de Sensibilidad del Modelo Hidrodinámico - Influencia del Intercambio Río - Acuífero en la Velocidad

Una vez calibrado y verificado el modelo, se realizó el análisis de sensibilidad para determinar la influencia de los principales parámetros físicos (rugosidad, áreas de inundación, etc.) y numéricos del modelo ($Dx_{m\acute{a}x}$ y Dt) en los diferentes procesos fluviales. En la Figura No. 4 se muestra el efecto sobre la velocidad de la corriente cuando se consideran diferentes flujos de intercambio río-acuífero.

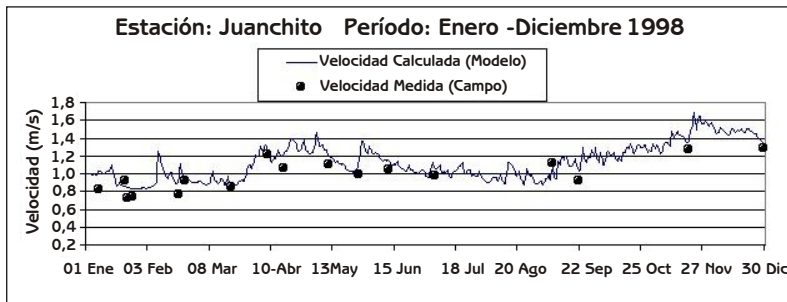


Figura No. 4 - Calibración Modelo Hidrodinámico Velocidad Calculada Vs. Velocidad Medida

7. MODELACIÓN MORFOLÓGICA

Para calibrar el modelo morfológico es necesario disponer de información hidrológica, geométrica y sedimentológica para un período importante de tiempo. En el Río Cauca, con excepción de los caudales que presentan un volumen apreciable de datos en las estaciones hidrométricas, la información disponible para realizar la modelación es bastante escasa y en algunos casos no muy confiable. Las limitaciones en la información de campo disponible no permitieron una generalidad de la calibración realizada. La calibración del modelo morfológico se realizó para el período comprendido entre Enero de 1986 y Octubre de 1998.

Para la simulación se seleccionó un espaciamiento máximo $Dx_{m\acute{a}x} = 30000$ m y un intervalo de tiempo $Dt = 40$ minutos, ya que emplea un tiempo computacional razonable (0.83 h) y genera un Número de Courant pequeño, garantizando la estabilidad del modelo.

Para estimar los cambios en los niveles de fondo se utilizó un modelo de sedimentación y erosión

uniformemente distribuida sobre toda la sección transversal, por cuanto sin llegar a ser el ideal es, de los modelos disponibles, el que mejor representa las variaciones ocurridas en el Río Cauca.

Dentro del proceso de calibración del modelo morfológico, inicialmente se realizó el ajuste del transporte de sedimentos para el año 1998 a través de los factores de calibración del modelo para calcular las cargas en suspensión (F_1) y de fondo (F_2).

Posteriormente, el modelo se corrió para todo el período de simulación (1986-1998) utilizando la información obtenida en el procedimiento anterior. La morfología obtenida presentó diferencias con la observada, por lo cual se procedió a revisar la información granulométrica disponible, descartando aquellas curvas que se consideraron podrían no ser representativas de la distribución de tamaños de los sedimentos del fondo; modificar los factores de calibración; e investigar la representatividad de las secciones transversales utilizadas, reemplazando o descartando algunas secciones consideradas atípicas o no representativas de la morfología del Río Cauca.

8. MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Se encontraron dificultades para la construcción de las bases de datos para propósitos de calibración y verificación del modelo de calidad del agua. Entre éstas se destacan la no simultaneidad de los muestreos en el Río Cauca y los tributarios. La información corresponde a muestreos realizados en el centro de la sección transversal del río y en algunos casos no se realizan aforos líquidos simultáneamente con los muestreos de calidad del agua.

Inicialmente se calibró el modelo de calidad del agua para condiciones de régimen permanente considerando el caudal y la concentración de los

componentes de la calidad del agua constantes, para un período de simulación de 10 días para abarcar el tránsito de la contaminación en el río y la estabilización de los resultados del modelo.

Posteriormente se calibró el modelo para flujo no permanente. Las bases de datos para este fin se construyeron considerando el caudal medio diario variable y la concentración de los componentes de la calidad del agua constante. Claramente esto es más próximo a las condiciones reales en el río, donde el flujo no es permanente ni uniforme. Los períodos de simulación dinámica también abarcaron aproximadamente 10 días.

Las simulaciones se realizaron para un período comprendido entre el 3 y el 12 de junio de 1998, bajo condiciones de régimen no permanente. Los resultados de la calibración para el día 11 de junio de 1998 se presentan en la Figura No. 5. Los datos de campo corresponden a la calidad del agua del Río Cauca para el día 11 de junio de 1998, pero no fueron tomados a la misma hora por esta razón no se unen los puntos entre sí en la figura. La curva graficada corresponde a los resultados del modelo para las 12:00 del día de la misma fecha. Estas diferencias constituyen una limitante en la comparación de los resultados y pueden explicar por qué no hay una calibración más ajustada.

El modelo reproduce de manera muy aproximada la temperatura y el OD a lo largo del río, sin embargo para la DBO_5 no se logra el mismo ajuste, esto como ya se mencionó puede ser una consecuencia de la falta de precisión de la información disponible.

Los coeficientes de dispersión más altos se generan al inicio del tramo en estudio entre las estaciones Antes Suárez y Antes Ovejas donde las velocidades son más altas como una consecuencia de la mayor pendiente del río.

Las tasas de reaeración más altas se encuentran entre las estaciones Antes Suárez y La Bolsa, donde se registran siempre los niveles más altos de OD. Esto puede ser una consecuencia de las velocidades más altas y las menores profundidades que se registran en esta zona del río.

Las tasas de degradación más altas se registraron entre Juanchito y Paso de la Torre, donde están las mayores descargas de materia orgánica provenientes de la ciudad de Cali. Esto coincide con la teoría de Chapra (1997) quien sugiere que las tasas de degradación más altas en una corriente de agua se encuentran inmediatamente después de una descarga de materia orgánica.

Las tasas de degradación más bajas se presentan en el tramo entre Riofrío y La Virginia y coinciden con la zona de menor tasa de reaeración. La relación entre k_2 y k_1 según Jolankai (1997) muestra que este tramo es característico de ríos con velocidades bajas y profundos. Esto puede contribuir a que la recuperación del OD en Río Cauca en este tramo sea más lenta.

Los parámetros de calibración se basan en los valores obtenidos durante la calibración bajo condiciones de régimen permanente, estos valores nuevamente fueron corregidos y ajustados hasta lograr la mejor aproximación posible a los valores medidos en campo. La tasa de reaeración se estimó con la expresión de O'Connor & Dobbins. En el Cuadro No. 2 se presenta un resumen de los parámetros de calibración de la calidad del agua del Río Cauca con el modelo Mike 11.

El modelo reproduce de manera muy aproximada la temperatura y el OD a lo largo del río, sin embargo para la DBO_5 no se logra el mismo ajuste, esto como ya se mencionó puede ser una consecuencia de la falta de precisión de la información disponible.

En el Cuadro No. 2 se presenta el coeficiente de dispersión y la tasa de reaeración k_2 calculados para las condiciones de flujo del día 11 de junio de 1998. Las tasas k_1 y k_2 también están corregidas de acuerdo a la temperatura del agua simulada por el modelo para el día 11 de junio de 1998 a las 12:00 PM.

Estación	Abscisa (Km)	Constante de Dispersión (D)	Degradac. K_1 a 20°C (día ⁻¹)	Reaireac. K_2 a 20°C (día ⁻¹)	Factor de Corrección (θ)	Consumo Adicional (gO ₂ /m ³ /día)
Antes Suárez	1.8	10	0.6	3.32	1.02	2.0
Antes Ovejas	3.2	10	0.6	2.09	1.02	2.0
Antes Timba	24.1	10	0.5	1.75	1.02	2.0
La Balsa	27.4	10	0.4	1.44	1.02	2.0
La Bolsa	78.9	10	0.2	1.49	1.02	2.0
Pte. Hormiguero	113.5	10	0.5	0.67	1.02	2.5
Antes Navarro	127.7	10	0.8	0.51	1.02	2.5
Juanchito	139.3	10	1.2	0.90	1.02	2.5
Paso del Comercio	144.6	10	1.1	0.92	1.02	5.0
Pte. Isaacs	155.5	10	0.9	0.56	1.02	5.0
Paso de La Torre	170.8	10	0.8	0.58	1.02	8.0
Vijes	181.9	10	0.8	0.60	1.02	9.0
Yotoco	211.8	10	0.4	0.52	1.02	17.0
Mediacanoa	220.9	10	0.4	0.39	1.02	16.0
Riofrío	284.8	10	0.2	0.47	1.02	14.0
Pte. Guayabal	347.0	10	0.2	0.53	1.02	7.0
La Victoria	369.9	10	0.2	0.59	1.02	7.0
Anacaro	416.5	10	0.2	0.46	1.02	4.0
La Virginia	444.7	10	0.2	0.43	1.02	4.0

Cuadro No. 2 Parámetros Calibrados para la Simulación de la Calidad del Agua del Río Cauca con el Modelo Mike 11

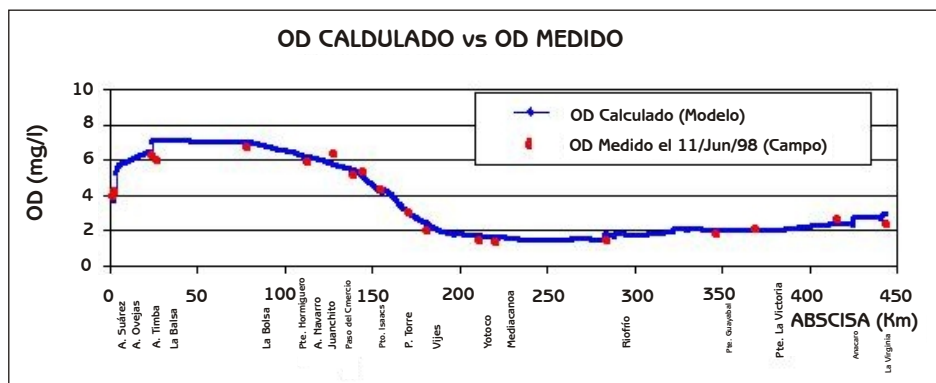


Figura No. 6 Calibración del Modelo de Calidad del Agua

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Río Cauca presenta, en una gran extensión del tramo Salvajina - La Virginia, las características de un río aluvial, atravesando zonas de depósitos aluviales y transportando fundamentalmente el material de su mismo lecho (conformado por arenas de diferentes tamaños y gravas medias y finas), así como materiales finos cohesivos (arcillas y limos) provenientes de la erosión de la cuenca y de las orillas.

Se desarrollaron los estudios hidrológicos, hidráulicos, sedimentológicos, geomorfológicos y de la calidad del agua del Río Cauca y los ríos afluentes en el tramo Salvajina - La Virginia. Se efectuó la implementación de un sistema de modelación matemática, con el fin de analizar los aspectos técnicos actuales y prospectivos relacionados con las características hidráulicas, sedimentológicas, morfológicas y de calidad del agua.

El sistema de modelación implementado se constituye en una herramienta valiosa y confiable para propósitos de gestión, planificación y evaluación de impactos, puesto que permitirá el análisis y la toma de decisiones con respecto a las diferentes acciones a emprender (proyectos de ingeniería, programas de manejo ambiental, etc.)

para la recuperación, control, aprovechamiento y conservación de uno de los más importantes recursos hídricos del país.

Para la red fluvial del Río Cauca y sus tributarios en el tramo Salvajina- La Virginia se dispone de una información de campo relativamente extensa. Sin embargo, debido a la dinámica propia de un cauce

aluvial como el Río Cauca y a las presiones que sobre él se ejercen, la información presenta limitaciones que no permiten una generalidad de la calibración efectuada. Con el fin de optimizar los modelos implementados, así como para lograr una mejor comprensión de los diferentes procesos en el Río, resulta necesario adelantar diferentes monitoreos e investigaciones de campo, tales como: topobatimetría de los tramos finales de los tributarios; implementar nuevas estaciones hidrométricas (una entre Juanchito y Mediacanoa y otra entre Mediacanoa y Guayabal); desarrollo de un modelo geoidal para actualizar los niveles y coordenadas de la red hidrométrica; muestreo intensivo del material del lecho; campaña de monitoreo simultáneo de los parámetros de calidad del agua; e investigar el intercambio de flujos entre el Río Cauca y las aguas subterráneas.

10. RECONOCIMIENTOS

La presente investigación fue realizada por la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente -EIDENAR- de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, con la participación del Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías para el Abastecimiento de Agua Potable, de Saneamiento Básico y la Conservación del Recurso Hídrico, CINARA de la Universidad del Valle. El estudio fue elaborado

con el apoyo técnico y económico de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC.

11. BIBLIOGRAFÍA

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Informe CVC No. 74-17. Contaminación del Río Cauca, reglamentación y control. Cali, 1975

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Boletín Hidro-lógico 1996. Cali, 1997

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Plan de gestión ambiental para el Valle del Cauca 1998-2000, Cali, 1997

CHAPRA, Steven C. Surface water quality modeling. McGraw Hill, Singapore, 1997

DAGMA : Caracterización de vertimientos finales de la ciudad de Cali, 1999

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. Mike 11: A modeling system for rivers and channels. Short description. Guide to getting started. Tutorial. Copenhagen, 1999

GALVIS C., Alberto. Simulación de la calidad del agua del Río Cauca. Simulación y aplicación. Universidad del Valle, Cali, 1988