



HIDRÁULICA FLUVIAL: PROCESOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN, OBRAS DE CONTROL Y GESTIÓN DE RÍOS
Hector Daniel Farias, José Daniel Brea, Carlos Marcelo García (Editores)

Memorias del *Quinto Simposio Regional sobre HIDRÁULICA DE RÍOS*
Santiago del Estero, Argentina. 2-4 Noviembre de 2011
ISBN 978-987-1780-05-1 (Libro + CD-ROM)

ESTIMACIÓN DE TIEMPOS CARACTERÍSTICOS DE VIAJE PARA LA EVALUACIÓN DE CAUDALES AMBIENTALES EN DOS RÍOS DE COLOMBIA

Mario A. Jiménez Jaramillo, Joany Sánchez Molina, Oscar A. Estrada Restrepo, Alejandro Aguilar Amaya y Rodrigo Vélez Otálvaro

GOTTA Ingeniería S.A.S. & Servicios Ambientales y Geográficos S.A.
E-mail: joany.sanchez@gottaingenieria.com – mario.jimenez@gottaingenieria.com
Web: <http://www.gottaingenieria.com>

ABSTRACT

The aim of this work was to determine characteristic travel times as well as dispersion parameters along two different stream reaches, as a part of the established methodology for estimating environmental discharges according with the environmental agencies in Colombia. Rivers Fonce and Cauca were selected since they will likely use for hydro electrical purposes and they provide different morphological settings which allow testing the methodology performance. Tracer experiments using salt dilutions were used in Fonce River taking into account the low flow it transports, unlike Cauca river where rhodamine WT was used in order to detect the concentration signal downstream. From the tracer experiments outcomes, the -ADZ- was set for modeling solute transport processes along Fonce river. However, the tracer experiments outcomes for Cauca river were not satisfactory given its high suspended sediment loads which lead the rhodamine-WT to be adsorbed, specially for the lower discharges. Alternatively for the latter, the solute transport processes was assessed using a HECgeoRas application.

INTRODUCCIÓN

Como parte del diagnóstico ambiental de alternativas -DAA-, requerido como paso previo a la obtención de una licencia ambiental en proyectos de aprovechamiento hídrico, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT- incluye dentro de sus requerimientos la evaluación de los caudales que deben preservarse de tal forma que los servicios ambientales y ecosistémicos ofrecidos por la fuente, al igual que los usos actuales y prospectivos del recurso, se afecten lo menos posible, luego de la intervención que representa la construcción y puesta en marcha de un proyecto hidroeléctrico (MAVDT y UNAL, 2008).

Entre las más recientes propuestas empleadas en Colombia para estimar caudales ecológicos y ambientales cabe mencionar la aún vigente Resolución 0865 de 2004 (MAVDT, 2004), la cual, suele emplearse en la evaluación de la disponibilidad hídrica superficial teniendo en cuenta como unidad de análisis, la cuenca hidrográfica. Sin embargo, en escalas espaciales locales, tal como puede considerarse la escala de tramo e incluso la escala de corredor aluvial, esquemas hidrológicos como los propuestos en la Resolución 0865 de 2004, pierden relevancia, ya que no permiten evaluar la sensibilidad del sistema ante intervenciones antrópicas tales como regulación del régimen hidrológico natural, cambios en las cargas de sedimento o abstracciones de agua de magnitud comparable con los caudales medios de la fuente.

Más recientemente, la misma entidad propuso la “Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados” que si bien no se ha convertido en Resolución del Ministerio, hace parte los requerimientos de éste, para los nuevos proyectos que surgen en el ámbito de generación hidroeléctrica. Junto con consideraciones hidrológicas, dicha metodología propende por una estimación más coherente de los caudales ambientales a través de la incorporación de factores hidráulicos, bióticos y de calidad de agua.

Como tal, dicha metodología puede enmarcarse en cuatro grandes áreas: Hidrología, Hidrodinámica, Calidad de agua y Análisis Biótico. La primera componente incluye un diagnóstico hidrológico de la región, a partir del cual es posible determinar los períodos naturalmente más críticos en términos de oferta hídrica (eventos extremos máximos y mínimos), los cuales determinan, a su vez, los servicios ambientales mínimos que deben garantizarse para la conservación de especies en el sitio o sector intervenido, o el desarrollo normal de las actividades económicas propias del mismo. De igual forma, la componente hidrológica permite estimar los caudales requeridos para llevar a cabo el diagnóstico hidrodinámico y de calidad de aguas de la fuente intervenida, pues dichas cantidades son determinantes de la capacidad que una corriente tiene para depurar las cargas de sustancias introducidas natural o antrópicamente en el sistema,

Una vez configurado un modelo hidráulico, el cual permite determinar los tiempos hidráulicos de viaje, puede iniciarse un análisis de calidad de agua y asimilación. La utilización de modelos existentes o la implementación de nuevas aplicaciones pueden ser consideradas en dicha fase del estudio. Tal como se sugiere en el proyecto de Resolución del MAVDT, el mínimo de indicadores de calidad de aguas incluye materia orgánica particulada (DBO), amonio, fósforo total, coliformes totales, coliformes fecales, sólidos suspendidos y oxígeno disuelto.

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de la “Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyecto licenciados” correspondientes a los proyectos hidroeléctricos Espíritu Santo y Piedra del Sol, proyectados sobre los ríos Cauca y Fonce, respectivamente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar tiempos característicos de viaje y parámetros dispersivos como parte de la estimación de los caudales ambientales requeridos para la puesta en marcha de los proyectos hidroeléctricos Espíritu Santo y Piedra del Sol, teniendo en cuenta factores hidrológicos, hidráulicos y de calidad de agua.

Objetivos Específicos

- Caracterizar los procesos de mezcla y transporte de solutos en los tramos de estudio, con miras a configurar un modelo de tránsito de sustancias conservativas y no-conservativas.
- Configurar un modelo que permita evaluar las variaciones de variables hidráulicas tanto para las condiciones actuales del tramo como para las correspondientes a cada proyecto.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El tramo de estudio del proyecto Espíritu Santo, que aprovecha las aguas del río Cauca, se encuentra localizado en el Departamento de Antioquia (Noroeste de Colombia), en zona limítrofe de los municipios de Briceño, Ituango y Valdivia (Figura 1). Es importante mencionar que el proyecto hidroeléctrico Ituango, actualmente en fase de construcción, se encuentra localizado sobre el mismo río, aproximadamente 24 km aguas arriba de las alternativas contempladas para el proyecto Espíritu Santo, por lo tanto el régimen hidrodinámico de referencia para la evaluación de los caudales ambientales del proyecto Espíritu Santo, debe definirse bajo la premisa de dicha intervención.

En dicho tramo, el río Cauca drena un área de 37,173 km² aproximadamente y posee un alineamiento horizontal controlado por la geología y litología local, con un cauce predominantemente recto y que presenta pocas variaciones en la formas, lo cual se traduce en valores de sinuosidad cercanos a 1,. La pendiente longitudinal no refleja cambios significativos y posee un valor medio del orden del 0.3 %. Debido al alto nivel de confinamiento del cauce, no se aprecia la formación de llanuras aluviales, aunque pueden identificarse pequeñas barras puntuales de arenas.

De acuerdo con el sistema de clasificación de Flores et al. (2006), el tramo puede considerarse de lecho plano, ya que su imposibilidad de migrar lateralmente impide la formación de pozos en curvas y adquirir una morfología del tipo pozo-rápida.

El tramo de estudio del proyecto hidroeléctrico Piedra del Sol sobre el río Fonce, de una longitud aproximada de 9 km, comprendida entre el sitio de captación del proyecto y la descarga del mismo, se encuentra localizado en la cordillera Oriental, aguas abajo del municipio de San Gil (Departamento de Santander, Noreste de Colombia), y el cual se puede observar en la Figura 1.

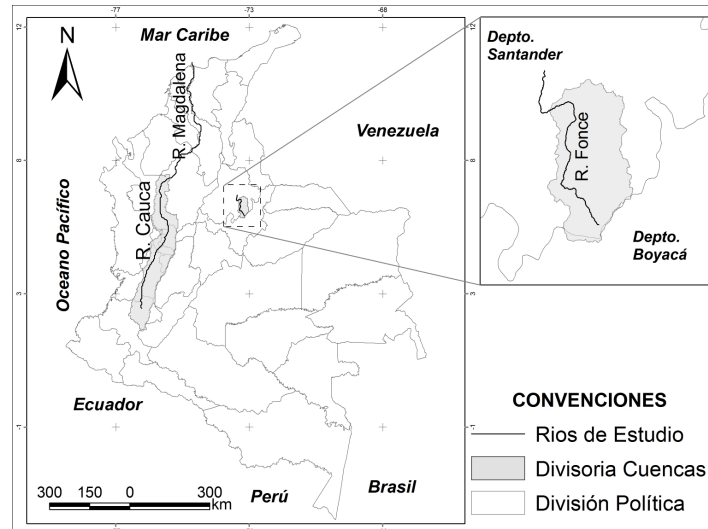


Figura 1.- Localización general de los proyectos

En este sector, el río Fonce tiene una pendiente media del 3.5 %, y posee una morfología tipo cascade de acuerdo con el sistema de clasificación de Motgomery y Buffington (1997).

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta los objetivos específicos, es claro que un gran componente técnico del estudio está enfocado a la simulación de procesos de tránsito de caudales y de solutos. Es preciso entonces definir como paso inicial, los elementos de discretización espacial que serán empleados para representar el tramo en estudio. Dicha discretización es denominada discretización topológica, pues se ocupa de establecer el tipo de elemento (tramo, volumen finito, sección transversal, tanque, etc.) que será empleado como representación conceptual del sistema natural. Un segundo tipo de discretización corresponde a la discretización hidráulica, que se refiere a la información requerida para representar los elementos topológicos escogidos (Cunge, 1980).

Para la simulación del tránsito de solutos se empleó el esquema ADZ -Aggregated Dead Zone (Beer y Young, 1983). El modelo ADZ permite representar de forma agregada y unidimensional el proceso de mezcla de un soluto a lo largo de un tramo de canal, proceso que es en esencia tridimensional e incluye mecanismos tanto superficiales como sub-superficiales. Dada la concentración de un soluto, al inicio de un tramo, el modelo permite estimar la concentración a la salida de acuerdo con:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{1}{t_m - \tau} [c_{up}(t - \tau) - c(t)] \quad (1)$$

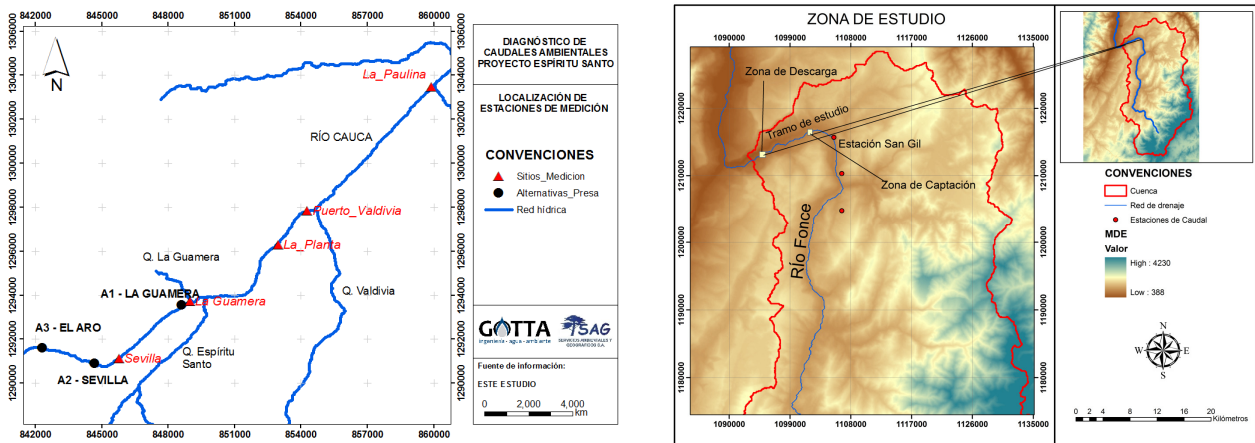
donde t_m representa el tiempo medio de viaje del soluto y τ el tiempo de viaje de la partícula

más veloz, c es la concentración aguas abajo del tramo y c_{up} es la concentración a la entrada de cada tramo.

La importancia relativa entre los mecanismos de advección y dispersión viene expresada por la fracción dispersiva, DF , dada por:

$$DF = 1 - \frac{\tau}{t_m} \quad (2)$$

Para el caso del río Cauca se establecieron 4 tramos de interés, el primero de ellos está comprendido entre los puntos conocidos como Sevilla y La Guamera, el segundo se encuentra entre La Guamera y la Planta, el tercero se encuentra entre La planta y Puerto Valdivia, y el cuarto se encuentra entre Puerto Valdivia y el puente peatonal La Paulina. El modelo de simulación de calidad del agua, es entonces, un modelo acoplado de cuatro modelos, uno por tramo, como se describió anteriormente. Para el río Fonce, se estableció un solo tramo de estudio, el cual, está comprendido entre la captación del proyecto y la descarga aguas abajo del mismo. En la Figura 2, se muestra un esquema de los tramos estudiados en ambos proyectos



a) Tramo de estudio proyecto hidroeléctrico Espíritu Santo, sobre el río Cauca

b) Tramo de estudio proyecto hidroeléctrico Piedra del Sol, sobre el río Fonce

Figura 2.- Localización de las zonas de estudio de ambos proyectos

Empleando el modelo de tránsito hidrológico MDLC (Camacho, 2000), se pueden determinar los parámetros del modelo ADZ. Este modelo está caracterizado por parámetros similares a los del modelo ADZ, y el canal se representa como una serie acoplada de n tanques. El frente de onda está caracterizado por un rezago τ_{fl} . Cada tanque de la serie se encuentra caracterizado por un coeficiente K , cuyo efecto de atenuación es análogo al tiempo de residencia del modelo ADZ. De este modo el tiempo medio de viaje de una onda esta dado por la ecuación (3).

$$\bar{t}_{fl} = nK + \tau_{fl} \quad (3)$$

En la Figura 3, e muestra esquemáticamente el proceso de transporte de cualquier sustancia visto dese un solo punto

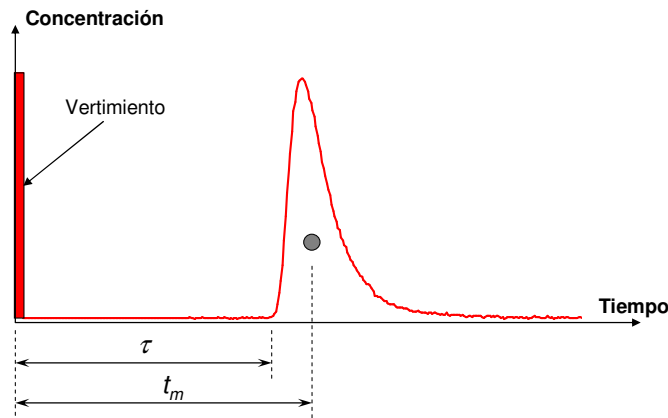


Figura 3. - Esquematización del proceso de dispersión de solutos en un tramo de un río

En el caso del río Fonce, se realizó un experimento, usando como trazador, la sal. Lo que permitió identificar los tiempos medios de viaje y de rezago para el caudal del día en el que se realizó el experimento, y luego haciendo uso de la metodología MDLC, antes descrita, se encontraron los tiempos medios de viaje y los tiempos de rezago para cada caudal.

Para el caso del río Cauca, para la estimación de tiempos de viaje y la caracterización de procesos dispersivos, se utilizó rodamina WT (20%), la cual es inerte y no genera ninguna afectación ambiental. Las altas cargas de sedimento y las tasas de sedimentación identificadas en el tramo de estudio, especialmente para los caudales más bajos, generaron efectos no esperados en los resultados de los experimentos con trazadores con rodamina, debido a procesos de adsorción. Por lo cual no fue posible obtener los parámetros de los modelos ADZ para los tramos descritos por lo cual se utilizó modelación hidráulica para obtener dichos tiempos.

La calibración del modelo hidráulico en estado permanente se realizó para el escenario correspondiente a la jornada de levantamiento batimétrico, ajustando los niveles simulados (configurado a partir de HEC-GeoRAS y geometría hidráulica) con los niveles registrados durante la batimetría en el tramo comprendido entre la quebrada Espíritu Santo y la última sección del levantamiento – Puerto Valdivia ubicada 2 km aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Valdivia en el río Cauca.

Para el proceso de calibración del modelo hidráulico se utilizó el valor calculado para el coeficiente de rugosidad con la ecuación de Jarret (1987), como se muestra en la ecuación (4), como valor de entrada. En dicha ecuación el coeficiente de Manning depende solo de la pendiente media del tramo y del radio hidráulico. El procedimiento consistió en simular en estado permanente el perfil de flujo correspondiente al caudal registrado durante el día del levantamiento batimétrico (2500 m³/s) con el coeficiente de Manning igual a 0.044 para todo el tramo de análisis. Posteriormente se realizó un procedimiento de ensayo y error, variando los valores del coeficiente de rugosidad en diferentes secciones, y el cual tiene como objetivo la definición de la rugosidad definitiva en el tramo.

$$n = 0.32S^{0.38}R^{-0.16} \quad (4)$$

Haciendo uso de este modelo se encontraron los tiempos medios de viaje y de rezago

Una vez encontrados todos los parámetros se hizo uso del modelo ADZ QUAZAR, para modelar la variación de la calidad del agua en el tramo de estudio

Para sustancias no conservativas tales como DBO, sólidos suspendidos y coliformes totales, Lees et al. (1998) desarrollaron una versión mejorada del modelo de calidad de aguas QUASAR (Quality Along System Rivers; Whitehead et al., 1997), el cual, además de los procesos advectivos y dispersivos representados por el esquema de simulación ADZ, incorpora sumideros (pérdidas) de masa de la sustancia modelada mediante reacciones de primer orden.

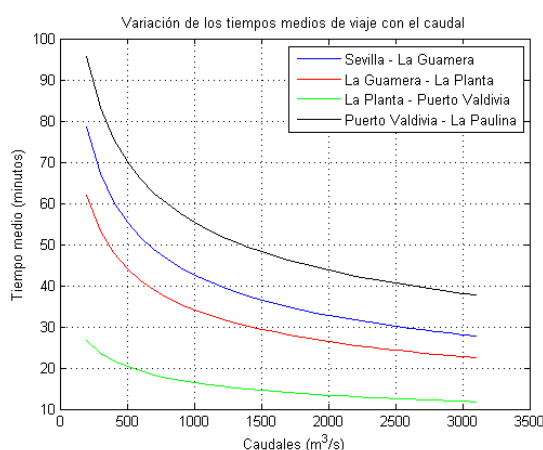
La ecuación (5), representa el modelo ADZ-QUASAR, donde k corresponde a la constante de decaimiento relacionada con la sustancia modelada.

$$\frac{d[c(t)]}{dt} = \frac{1}{t_m - \tau} [e^{-k\tau} c_u(t - \tau) - c(t)] - kc(t) \quad (5)$$

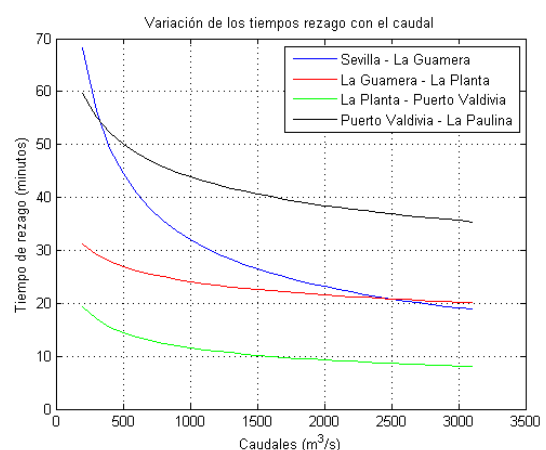
En el siguiente apartado, se mostraran los resultados obtenidos en ambos casos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

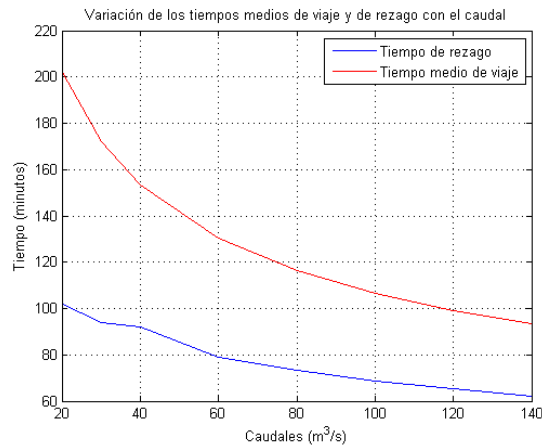
Para el cálculo de las concentraciones a la salida en ambos casos (se le recuerda al lector que para el caso del río Cauca es en el puente peatonal La Paulina y para el río Fonce es en el punto de descarga del proyecto hidroeléctrico Piedra del Sol), se usó el modelo ADZ-QUAZAR, el cual se describió en el apartado anterior. Las modelaciones se realizaron simulando series de concentraciones de las sustancias de interés ambiental descritas para diferentes regímenes de caudal (se simularon flujos permanentes). Los caudales para los cuales se realizaron simulaciones en el río Cauca varían entre $200 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3100 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en el río Fonce, están comprendidas entre $20 \text{ m}^3/\text{s}$ y $140 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 4, se muestran tiempos característicos de viaje en cada caso. En la Figura 5, se muestran las fracciones dispersivas para cada caso.



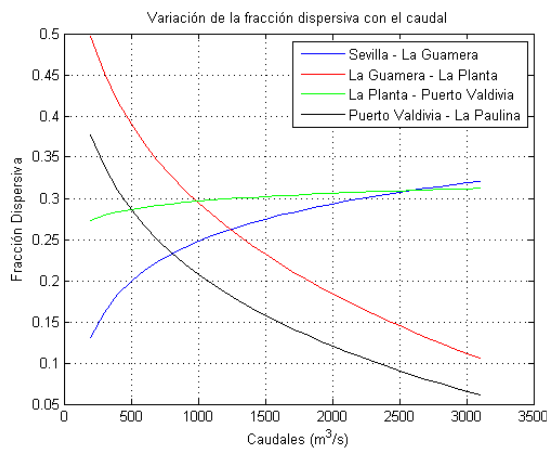
a) Tiempos medios de viaje en el caso del río Cauca



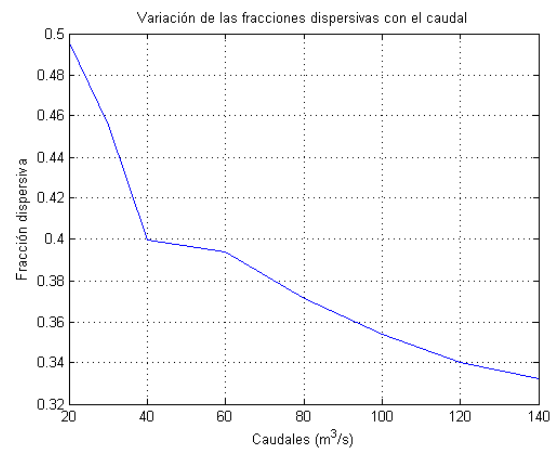
b) Tiempos de rezago en el caso del río Cauca



c) Tiempos medios de viaje y de rezago para el caso del río Fonce
Figura 4. – Tiempos característicos de viaje para ambos ríos



a) Fracciones dispersivas para el río Cauca



b) Fracciones dispersivas para el río Fonce

Figura 5. – Fracciones dispersivas en ambos ríos

Finalmente, haciendo uso del modelo ADZ QUAZAR, usando como condición de frontera las concentraciones para cada sustancia al inicio de cada tramo y para cada una de las campañas, se calibraron las correspondientes constantes de decaimiento. Se simuló las sustancias nitrógeno total, DQO, sólidos suspendidos totales, coliformes totales y coliformes fecales, para el río Cauca. Mientras que para el río Fonce se simuló amonio, DQO coliformes fecales, coliformes totales y ortofosfatos.

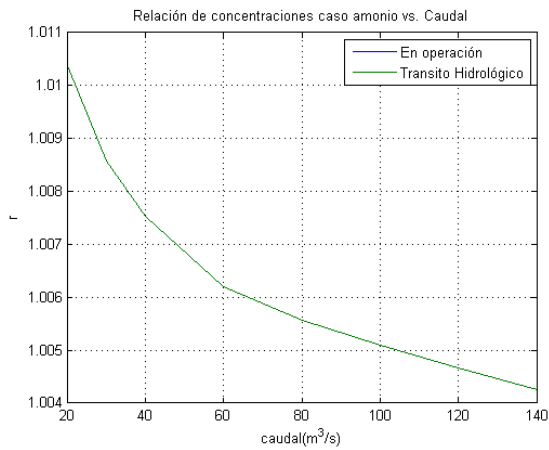
En este trabajo, se encontró la relación de concentraciones de cada sustancia de interés ambiental, en el ramo de estudio la cual se explica mediante la ecuación (6)

$$r = \frac{c_e}{c_s} \quad (6)$$

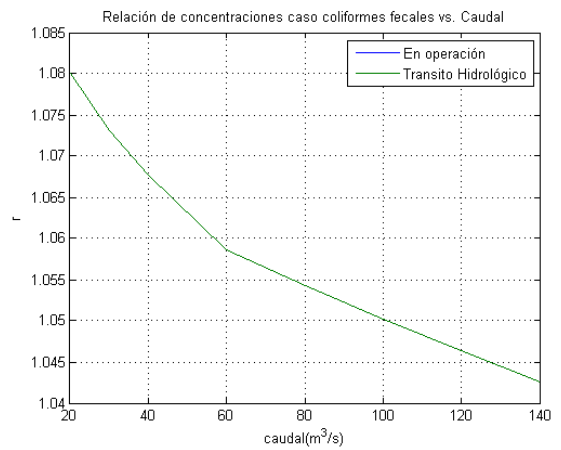
donde c_e es la concentración de cada sustancia a la entrada del tramo y c_s es la concentración de cada sustancia a la salida del tramo

En este caso, el tramo de simulación comprende desde el punto de captación del Proyecto hasta el punto de descarga del mismo para el río Fonce, mientras que para el río Cauca está comprendido entre la estación Sevilla y la estación La Paulina.

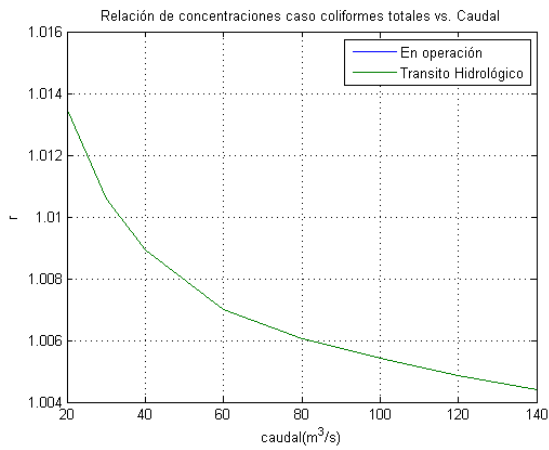
En la Figura 6, se muestran los resultados obtenidos para el factor de asimilación para el río Fonce y para las sustancias descritas



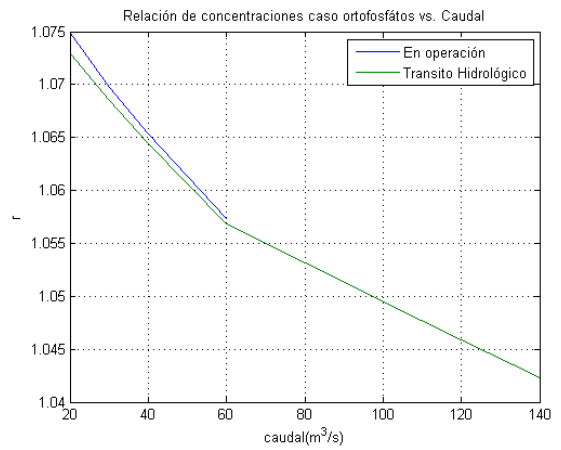
a) Caso amonio



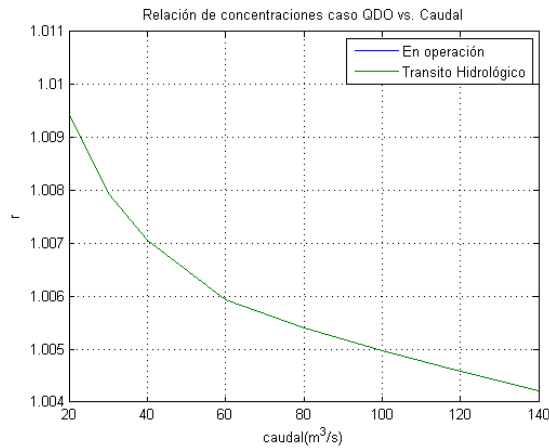
b) Caso coliformes fecales



c) Caso coliformes totales



d) Caso ortofosfatos



e) Caso DQO

Figura 5. – Relaciones de concentración para el caso del río Fonce

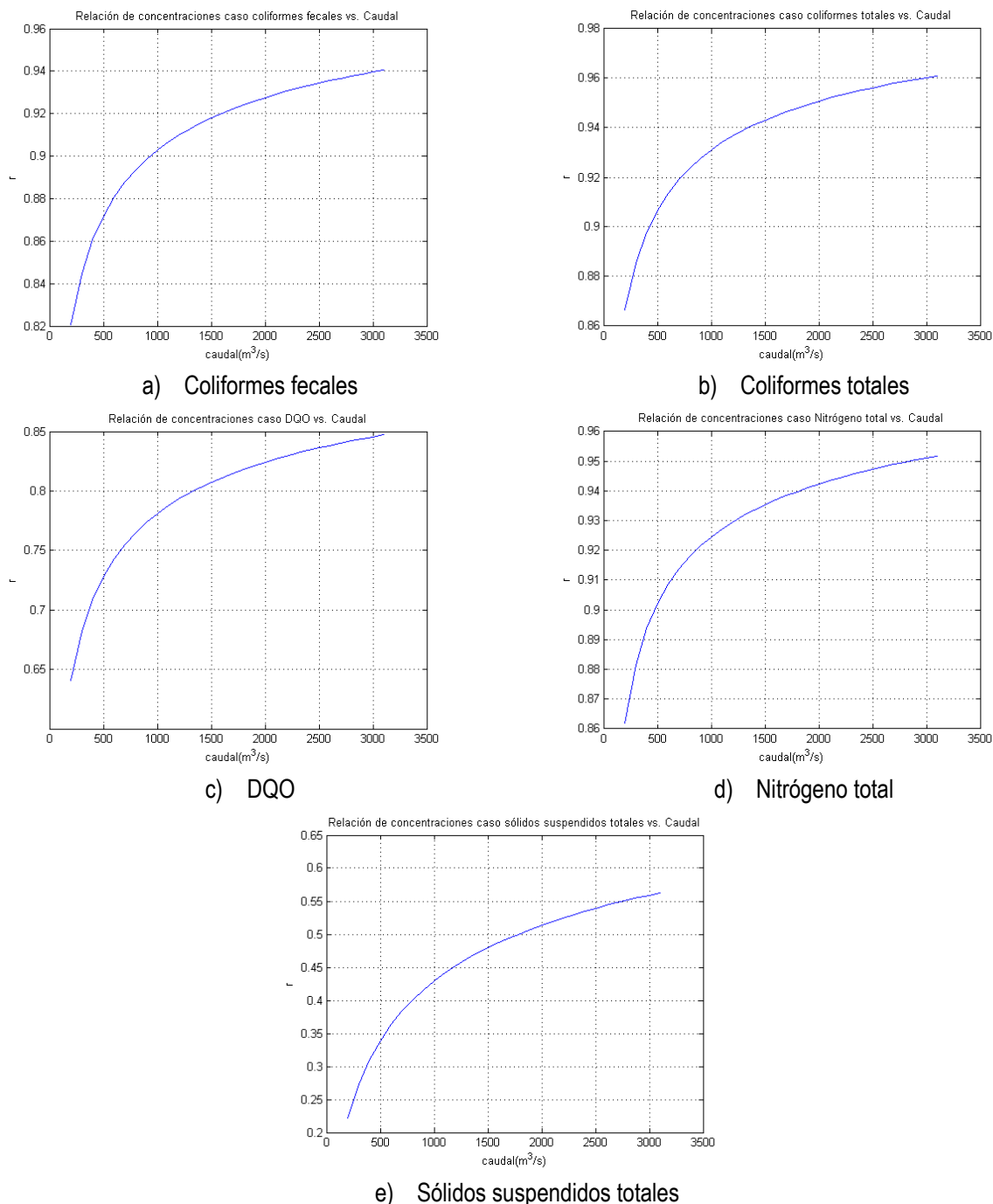


Figura 5. – Relaciones de concentración para el río Cauca

Para el caso del río Fonce, los resultados muestran que en todos los casos este factor es muy próximo a 1, lo cual implica que las concentraciones de cualquier sustancia que entren en el tramo de estudio, saldrán prácticamente intactas al final del mismo. La razón de esto, radica en que los tiempos de viaje y los tiempos primer arribo o rezagos son muy bajos para cualquier caudal que se transite en dicho tramo, lo cual hace que una sustancia sea transportada en tiempos muy cortos. Dado que estos tiempos son muy cortos, sin importar el régimen hidrológico, los procesos de decaimiento de cualquier sustancia que ingrese en el canal en la zona de estudio, se verán desfavorecidos, en el sentido de que no se alcanzaran a

dar en cantidades lo suficientemente grandes, como para representar procesos de depuración de dichos elementos en cantidades considerables.

Lo anteriormente dicho, pone de manifiesto, que desde el punto de vista de los procesos de transporte y depuración de sustancia de interés ambiental, el Proyecto no representa ningún tipo de problemas, pues las descargas de aguas servidas, se presentan en el municipio de San Gil, que se encuentra aguas arriba del proyecto, y dadas las condiciones de flujo en el río el cual cuenta con gran cantidad de zonas con rápidos, permite realizar una mezcla muy homogénea de estas sustancias, antes de que lleguen al sitio donde se ubicará la presa del proyecto. Es posible inferir, entonces, que las concentraciones de sustancias de interés ambiental en los caudales vertidos para conservar los caudales ecológicos y en los caudales usados para producción de energía son las mismas, es decir no se está aumentando la concentración de dichos elementos por causa de la generación, la única forma de que presenten problemas en dicho tramo sería que hubieran poblaciones existentes que hagan descargas importantes en el tramo de interés, caso que no se presenta en la realidad.

Para el caso del río Cauca, los resultados muestran que en todos los casos, a excepción de los sólidos suspendidos totales y la DQO, este factor varía entre 0.85 y 0.95, lo cual implica que las concentraciones de cualquier sustancia que entren en el tramo de estudio, están sufriendo degradaciones que varían entre el 5 % y el 15%, siendo más baja la tasa de degradación a medida que aumentan los caudales. La razón de esto radica en que los tiempos de viaje y los tiempos de primer arribo o rezagos son muy bajos para los caudales más grandes, lo cual hace que una sustancia sea transportada en tiempos muy cortos.

Se encuentra entonces, que desde el punto de vista de los procesos de transporte y depuración de sustancias de interés ambiental, el proyecto no representa ninguna alteración, pues en la zona de caudales mínimos, las tasas de remoción, r_i , sufren variaciones menores al 5%. De igual forma, los resultados muestran que los sólidos suspendidos totales al igual que la DQO presentan tasas de degradación más altas que las demás sustancias de interés ambiental. Hay una alta correlación entre éstas, lo cual puede ser explicado por adsorción de la DQO por parte de los sólidos suspendidos, lo cual sugiere que futuros estudios de este tipo se enfoquen en esta última variable.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado también una caracterización completa de los tiempos de viaje en el tramo de estudio, y se han propuesto diferentes modelos de calidad del agua para algunas sustancias de interés ambiental.

Para el caso del río Fonce los resultados muestran que en la zona oriental de la cuenca se presentan las pendientes más altas, al igual que en la margen derecha del tramo en estudio aguas abajo de la zona de descarga, lo que favorece la ocurrencia de procesos gravitacionales activos. El análisis regional muestra que la geomorfología dominante en toda la cuenca del río Fonce es la de tipología de cascada, mientras que el estudio de tipo local, con una topografía más detallada (1:5.000), muestra que la morfología dominante es de tipo salto-pozo. Esto se ve reflejado en los tiempos de viaje en los diferentes puntos del tramo de estudio. Mientras las velocidades son más altas en la parte alta del tramo, en la parte baja del mismo, estas son

menores debido a que en este sector presentan con mayor frecuencia, morfologías del tipo lecho plano.

Los resultados de la modelación de la calidad del agua, haciendo énfasis en la asimilación de sustancias de interés ambiental en el tramo de estudio, muestran que en general esta es muy próxima a 1, lo cual quiere decir que cualquier sustancia ingrese al tramo de estudio sufrirá una degradación casi nula, es decir, las concentraciones de dicha sustancia a la salida del tramo son prácticamente iguales a las concentraciones de entrada, esto se cumple para cualquier régimen hidrológico y para cualquier concentración de dichas sustancias. Sin embargo, esto no debe representar ningún tipo de problemas para el proyecto pues las concentraciones de las sustancias de interés ambiental son las mismas antes e inmediatamente después del sitio de presa.

Para el caso del río Cauca, las condiciones de acceso y navegabilidad, y en general la configuración morfológica del río Cauca en el tramo de estudio, imprimieron a las jornadas de campo un alto nivel de dificultad que limitó principalmente la estrategia de toma de muestras, tanto de calidad de agua como de rodamina WT (20%). Éstas fueron tomadas de forma puntual y superficial, y si bien permitieron caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua y estimar parámetros de transporte, se recomienda que en fases posteriores del proceso de licenciamiento, las muestras sean integradas cuando las condiciones lo permitan y/o compuestas mediante bombeos continuos en un mismo punto de la sección transversal.

Para la estimación de tiempos de viaje y la caracterización de procesos dispersivos, se utilizó rodamina WT (20%), la cual es inerte y no genera ninguna afectación ambiental. Las altas cargas de sedimento y las tasas de sedimentación identificadas en el tramo de estudio, especialmente para los caudales más bajos, generaron efectos no esperados en los resultados de los experimentos con trazadores con rodamina, debido a procesos de adsorción. Por lo anterior, cuando se emplee este trazador en futuros trabajos, se recomienda emplear cantidades superiores a las estimadas mediante expresiones disponibles en la literatura y realizar bombeos continuos durante el intervalo de recolección de cada muestra, en lugar de tomar una sola en el intervalo de muestreo.

Siempre que sea posible, se recomienda la realización de experimentos con boyas (tarros lastrados, bolas, bombas, etc.), con miras a predefinir tiempos de viaje antes de iniciar experimentos con trazadores como la rodamina WT (20%). Cabe anotar, sin embargo, que esto acarrea la utilización de grandes cantidades de boyas ya que los porcentajes de pérdidas pueden ser altos en las zonas muertas superficiales. Asimismo, es importante realizar, previa a la utilización de rodamina WT, una caracterización de la dinámica de sedimentos en suspensión en una corriente.

Combinando información primaria (levantamientos batimétricos) con la detallada cartografía disponible en el tramo de estudio (curvas de nivel cada 10 m), se configuró un modelo hidráulico que tuvo en cuenta no solo la configuración del cauce sino también su interacción con las laderas adyacentes. La estructura del modelo permitió determinar la variabilidad de los tiempos característicos de viaje t_m y τ , requeridos para la evaluación de los factores de asimilación de las sustancias DQO, SST, Coliformes y Nitrógeno total. Dicha variabilidad, expresada en términos de relaciones potenciales de la forma $t = aQ^b$ conllevaron también a la obtención de fracciones dispersivas con órdenes de magnitud similares a las encontradas

mediante los análisis con trazadores.

Los resultados de la modelación de la calidad del agua, haciendo énfasis en la asimilación de sustancias de interés ambiental en el tramo de estudio, muestran que en general esta se encuentra entre 0.86 y 0.95, esto con excepción de la DQO y los sólidos suspendidos totales, lo cual implica que las concentraciones de cualquier sustancia que entren en el tramo de estudio, están sufriendo degradaciones que van entre el 5 y el 15%. Siendo muy parecidas en el rango comprendido entre los 400 y los 1000 m³/s, pues esta relación, en este rango de caudales, varía entre 0.9 y 0.92.

Los resultados muestran igualmente que los sólidos suspendidos totales al igual que la DQO presentan tasas de degradación más altas que las demás sustancias de interés ambiental. Tal como se mostró en el capítulo 2, hay una alta correlación entre las concentraciones de sólidos suspendidos totales y de DQO, lo cual puede ser explicado por adsorción de la DQO, por parte de los sólidos suspendidos, lo cual sugiere que futuros estudios de este tipo se enfoquen en esta última variable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beer, T., Young, P.C. (1983). “Longitudinal dispersion in natural streams”. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 109, No. 5, pp. 1049-1067.

Camacho, L. A. (2000). “Development of a Hierarchical Modeling Framework for Solute Transport Under Unsteady Flow Conditions in Rivers”, PhD Dissertation, Imperial College of Science Technology and Medicine, London, England.

Cunge, J.A. ; Holly, F.M.; Jr.; Verwey, A. (1980): “Practical Aspects of Computational River Hydraulics”. Iowa Institute of Hydraulic Research. pp. 420.

Jarret, R. D. (1984). “Hydraulics of high - Gradient streams”, *Journal of Hydrology Engineering ASCE*, 101(11), 1519 - 1539.

Flores, A. N., B. P. Bledsoe, C. O. Cuhaciyan, and E. E. Wohl (2006). “Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data”, *Water Resour. Res.*, 42, W06412, doi:10.1029/2005WR004226.

Lees, M. J., L. A. Camacho, and S. Chapra (2000). “On the Relationship of Transient Storage and Aggregated Dead Zone Models of Longitudinal Solute Transport in Streams”, *Water Resour. Res.*, 36(1), 213–224.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT-, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá -UNAL- (2008). “Contrato No. 0076- 08 del Convenio Interadministrativo OEI –MAVDT No 004/07 de 2007”, Informe Final. pp 135.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT- (2004). “Resolución Número 0865 – julio 22 de 2004”. Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



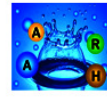
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo

