

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MENCIÓN RECURSOS HÍDRICOS



TESIS DE MAESTRÍA

**EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA
REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES.
APLICACIÓN EN UN TRAMO DEL RÍO SUQUÍA QUE INCLUYE LA
CONFLUENCIA CON EL ARROYO LA CAÑADA, PROVINCIA DE
CÓRDOBA.**

Ing. Santiago Aurelio Ochoa G.
Autor

Dra. Teresa Reyna
Directora

Córdoba, Junio del 2014.

**EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA
REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES.
APLICACIÓN EN UN TRAMO DEL RÍO SUQUÍA QUE INCLUYE
LA CONFLUENCIA CON EL ARROYO LA CAÑADA, PROVINCIA
DE CÓRDOBA.**

Resumen:

Debido a que los fenómenos en flujos a superficie libre que ocurren en la naturaleza son de una complejidad tal que difícilmente pueden ser resueltos con métodos analíticos exactos; se busca aplicar modelos y simulaciones con la utilización de técnicas experimentales y numéricas que permitan la determinación de las variables que caracterizan el flujo en ríos. El flujo libre se presenta cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente confinados por un contorno sólido. En la predicción de las variables de flujo para diferentes condiciones tiene gran importancia el desarrollo de modelos y simulaciones numéricas hidrodinámicas con precisión adecuada que permiten la correcta planificación de obras. Se ha estudiado el uso de modelos analíticos en la solución de fenómenos de mecánica de los fluidos, que están basados en las leyes de conservación de masa, momento y energía. Según sea el grado de simplificación al que se pueda llegar, manteniendo el nivel de precisión y verificando un buen comportamiento de lo modelado respecto a la naturaleza, se tienen los esquemas hidrodinámicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales. En este trabajo se presenta la formulación, métodos de solución y metodologías en general para el desarrollo de modelos físicos y matemáticos en flujos a superficie libre.

El sector de curso fluvial considerado para la aplicación es el de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía. La confluencia se encuentra localizada en el centro de la Ciudad de Córdoba que es la segunda concentración demográfica de la República Argentina. Como parte de las investigaciones ejecutadas en este trabajo se utilizó el modelo físico de la confluencia construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba. Este modelo hidráulico se representó con fondo fijo a una escala de longitudes no distorsionada 1:40; en el cual se ha caracterizado experimentalmente el flujo por diferentes métodos. Además se han implementado tres modelos numéricos (HEC-RAS, IBER y DELFT3D), los mismos se han calibrado y validaron con los datos medidos en el modelo físico. Con las consideraciones apropiadas para cada flujo, como por ejemplo la distribución espacial de la rugosidad; se llegó a la obtención de resultados en cada modelo hidrodinámico. En el escenario de estudio, se desarrolló un análisis de los efectos de escala producidos por el modelado experimental del flujo con una relación de longitudes modelo a prototipo de 1:40.

**EVALUATION MODEL TO REPRESENT HYDRODYNAMIC
FLOWS IN NATURAL CHANNELS. APPLICATION IN A
STRETCH OF RIVER SUQUÍA WHICH INCLUDES THE
CONFLUENCIA WITH LA CAÑADA BROOK, PROVINCE OF
CÓRDOBA.**

Abstract:

Because the phenomena in free surface flows that occur in nature are so complex that hardly can be solved with exact analytical methods; seeks to apply models and simulations using experimental and numerical techniques to determine the variables that characterize streamflow. The free flow occurs when the liquid flows by gravity and only partially confined by a solid circle. In the prediction of the flow variables for different conditions is of great importance to develop hydrodynamic models and numerical simulations with adequate precision to allow proper planning of works. We have studied the use of analytical models in solving phenomena fluid mechanics, which are based on the laws of conservation of mass, momentum and energy. Depending on the degree of simplification that can be reached while maintaining the level of accuracy and verify what good behavior modeled on the nature, there are one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional hydrodynamic schemes. In this paper the formulation, solution methods and methodologies for developing overall physical and mathematical models for free surface flows is presented.

Watercourse sector considered for implementation is the confluence of La Cañada brook and river Suquía. The confluence is located in the center of the city of Córdoba is the second demographic concentration of the Argentina Republic. As part of the research performed in this work, the physical model of the junction constructed in the Hydraulics Laboratory of the National University of Córdoba were used. This hydraulic model is represented with a fixed background undistorted length scale 1:40; in which the flow has been experimentally characterized by different methods. We have also implemented three numerical models (HEC- RAS, IBER and DELFT3D), they have been calibrated and validated with data measured in the physical model. With appropriate considerations for each stream, such as the spatial distribution of the roughness; was reached outcome in each hydrodynamic model. In the scenario study, an analysis of the effects of scale produced by the experimental flow modeling with a length ratio of 1:40 model prototype was developed.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Agradecimientos:

“El camino a la felicidad radica en dos principios simples: encuentra qué es lo que te interesa y que puedas hacer bien, y cuando lo encuentres pon toda tu alma en eso, toda la energía, ambición y capacidad natural que tengas.” John D. Rockefeller

Esta tesis se la quiero dedicar a María Victoria y a su madre María Florencia, a ellas que son esa familia por las que vale la pena sonreír y ser mejor cada día.

Agradezco el apoyo incondicional de mis padres José y Yolanda en cada proyecto por el que he decidido transitar, como también agradezco el apoyo y enseñanza que me han brindado en la vida mis hermanas Marcela y Silvia; y agradezco las inmensas muestras de cariño de mis sobrinos José, Dolores, Soledad, Paula e Isabela.

Los más sinceros agradecimientos a la tutora de esta tesis, Dra. Teresa Reyna, por estar siempre pendiente de que el avance de este trabajo tenga resultados óptimos con sus oportunos asesoramientos. También agradezco a la Ing. María Lábaque y al Dr. Santiago Reyna por la ayuda, información y asesoramiento dado cada vez que lo necesité.

Agradezco al Dr. Marcelo García, que me brindó sus valiosos consejos y su confianza al haber puesto a disposición los equipos y personal en el CETA (Centro de Estudios y Tecnología del Agua) y en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba.

Agradezco a todos los docentes de la Universidad Nacional de Córdoba, por los que tuve la oportunidad de sacar valiosas enseñanzas, tanto en lo laboral, en lo profesional y en la vida misma.

A la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo institucional brindado.

A Horacio Herrero, Eliana Jorquera, Érica Díaz, Antoine Patalano, Alejo Testa, Marcelo Baldissone, Leopoldo Saavedra, Nicolás Guillén y todos los demás compañeros y amigos que de alguna u otra forma contribuyeron al avance de este documento.

A la ciudad de Córdoba y su gente, que a pesar de estar lejos de mi querida ciudad Cuenca, me hicieron sentir cómodo con cálidas muestras de amistad de las que siempre obtuve las mejores energías cuando las necesite.

A todos los familiares y amigos que desde la distancia me alentaron, con su preocupación y aprecio hicieron que cada momento de sacrificio valiera la pena y sea más llevadero.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

ÍNDICE:

1. Introducción.....	1
2. Revisión de Antecedentes y Estado del Arte.....	5
2.1. Modelos Matemáticos para Flujos en Superficie Libre.....	10
2.1.1. Ecuaciones de Conservación de la Masa y del Momento....	10
2.1.2. Ecuaciones de Navier Stokes.....	14
2.1.3. Ecuaciones Promediadas de Reynolds.....	16
2.1.4. Ecuaciones de Saint-Venant.....	24
2.2. Modelación Física de Flujos a Superficie Libre.....	30
2.2.1. Condiciones de Similitud.....	30
2.2.2. Análisis Dimensional.....	32
2.2.3. Condiciones Generales para el Diseño de Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo con Flujo a Superficie Libre.....	33
2.3. Descripción de los Modelos Numéricos.....	37
2.3.1. Modelo Unidimensional HEC-RAS.....	37
2.3.2. Modelo Bidimensional IBER.....	40
2.3.3. Modelo Tridimensional DELFT.....	43
2.4. Motivación.....	45
2.5. Objetivos.....	47
3. Modelación Física en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada.....	49
3.1. Técnicas Experimentales.....	53
3.1.1. Velocimetría por Seguimiento de Partículas – PTV.....	53
3.2. Condiciones de Flujo ensayadas.....	58
3.3. Resultados.....	61

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

4. Calibración y Validación de los Modelos Numéricos HECRAS (1D), IBER (2D) y DELFT (3D)	66
4.1. Análisis de Sensibilidad	67
4.2. Análisis Estadístico	72
4.3. Calibración y Validación	75
5. Análisis de Resultados	85
6. Cálculo de Efectos de Escala en el Modelo Hidráulico Suquia- Cañada	93
7. Conclusiones	107
8. Referencias	112

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Zonificación del comportamiento de una confluencia. (Best, 1987).....	7
Figura 2.2 Desembocadura del arroyo La Cañada. A la izquierda se presenta una fotografía antes de las obras de revalorización y a la derecha después de las obras. (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina, 2011).....	8
Figura 2.3 Confluencia del río Suquía y el arroyo La Cañada. A la izquierda se presenta una fotografía antes de las obras de revalorización y a la derecha después de las obras. (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina, 2011).....	8
Figura 2.4 Notación para los esfuerzos (τ_{ij} = esfuerzos en la dirección j sobre la cara normal al eje i).	12
Figura 2.5 Variables principales para modelar ríos en HEC-RAS.....	38
Figura 2.6 Términos de la ecuación de energía.	39
Figura 2.7 Ejemplo de una rejilla escalonada.	45
Figura 2.8 Esquema de una coordenada vertical sigma (Lesser, 2009).	45
Figura 3.1 Modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba).	50
Figura 3.2 Esquema general del Modelo Hidráulico Suquía- La Cañada. (Fuente: Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba).	52
Figura 3.3 Partículas seleccionadas para implementar la técnica de PTV.	55
Figura 3.4 A la izquierda la imagen en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada con la cuadrícula para la rectificación y a la derecha la imagen rectificadas.	56
Figura 3.5 Trayectoria de las partículas en el ensayo con PTV realizado en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada.....	57
Figura 3.6 Vectores que representan la velocidad instantánea de las partículas en el ensayo con PTV realizado en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada.	57
Figura 3.7 Campo de velocidad media en el plano de la superficie del flujo en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada obtenidos a través de los ensayos con PTV.	58
Figura 3.8 Análisis de frecuencia aguas abajo de la confluencia del río Suquía con el arroyo La Cañada. (Reyna, 1999).....	58
Figura 3.9 Mediciones de Velocidad con ADV (T=10 años) (Gizzi, 2012).....	59
Figura 3.10 Mediciones de Velocidad con Tubo Pitot (T=10 años) (Gizzi, 2012).....	60
Figura 3.11 Mediciones de Velocidad con PTV (T=25 años).	60
Figura 3.12 Resultados experimentales de PIV (Hyun y otros, 2003).	60
Figura 3.13 Profundidad de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 10 años de período de retorno.	61
Figura 3.14 Cota de Fondo y de Superficie de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 10 años de período de retorno.....	61
Figura 3.15 Profundidad de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 25 años de período de retorno.	61
Figura 3.16 Cota de Fondo y de Superficie de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 25 años de período de retorno.....	62
Figura 3.17 Velocidades medidas en el tramo del río Suquía con la técnica del Tubo de Pitot considerando un periodo de retorno de 10 años.....	62
Figura 3.18 Velocidades medidas en el tramo del río Suquía con la técnica del ADV considerando un periodo de retorno de 10 años.....	63

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Figura 3.19 Velocidades superficiales medidas en el tramo del río Suquía con la técnica del PTV considerando un periodo de retorno de 25 años.....	63
Figura 3.20 Número de Froude en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 10 años de periodo de retorno.	64
Figura 3.21 Número de Reynolds en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 10 años de periodo de retorno.	64
Figura 3.22 Número de Froude en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 25 años de periodo de retorno.	64
Figura 3.23 Número de Reynolds en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 25 años de periodo de retorno.	65
Figura 4.1 Distribución de la Rugosidad.....	68
Figura 4.2 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando los coeficientes de expansión y contracción para flujo estacionario (T=25 años).....	69
Figura 4.3 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la condición de contorno del calado de agua inicial (T=25 años).....	69
Figura 4.4 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la condición de contorno del nivel inicial de la cota de agua (T=25 años).	70
Figura 4.5 Criterio estadístico usado en la evaluación de variables calculadas (Vázquez, 2003).	75
Figura 4.6 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=10 años).	76
Figura 4.7 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=10 años).	76
Figura 4.8 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en DELFT3D a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=10 años).	76
Figura 4.9 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=25 años).	77
Figura 4.10 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=25 años).	77
Figura 4.11 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en DELFT3D a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=25 años).	77
Figura 4.12 Altura de la superficie de agua calculado en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).	78
Figura 4.13 Altura de la superficie de agua calculado en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).....	78
Figura 4.14 Altura de la superficie de agua calculado en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).....	78

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Figura 4.15 Altura de la superficie de agua calculado en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).	79
Figura 4.16 Altura de la superficie de agua calculado en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).....	79
Figura 4.17 Altura de la superficie de agua calculado en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).	79
Figura 4.18 Velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).	80
Figura 4.19 Velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).....	80
Figura 4.20 Velocidad media longitudinal calculada en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).	80
Figura 4.21 Velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).	81
Figura 4.22 Velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).....	81
Figura 4.23 Velocidad media longitudinal calculada en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).	81
Figura 4.24 Resultados de la altura de superficie de agua del río Suquía para el periodo de retorno de 10 años.	83
Figura 4.25 Resultados de la altura de superficie de agua del río Suquía para el periodo de retorno de 25 años.	83
Figura 4.26 Resultados de la velocidad media longitudinal del río Suquía para el periodo de retorno de 10 años.	84
Figura 4.27 Resultados de la velocidad media longitudinal del río Suquía para el periodo de retorno de 25 años.	84
Figura 5.1 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.	86
Figura 5.2 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.	86
Figura 5.3 Esquema de la magnitud de las velocidades medias en el plano para el tramo correspondiente al río Suquía en el sector de aguas arriba de la confluencia, resultados obtenidos en IBER.....	87
Figura 5.4 Esquema de la magnitud de las velocidades medias en el plano para el tramo correspondiente a la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía, resultados obtenidos en IBER.	87
Figura 5.5 Esquema de la magnitud de las velocidades medias en el plano para el tramo correspondiente al río Suquía en el sector de aguas abajo de la confluencia, resultados obtenidos en IBER.....	88
Figura 5.6 Esquema de las zonas de estancamiento, desborde y recirculación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.....	89
Figura 5.7 Esquema de las zonas de estancamiento, desborde y recirculación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.....	89

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Figura 5.8 Número de Froude en el flujo de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.	90
Figura 5.9 Número de Froude en el flujo de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.	91
Figura 5.10 Representación del caudal específico por medio de áreas coloreadas en el tramo del río Suquía que incluye la confluencia del arroyo La Cañada correspondiente a un periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.	92
Figura 5.11 Representación del caudal específico por medio de áreas coloreadas en el tramo del río Suquía que incluye la confluencia del arroyo La Cañada correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.	92
Figura 6.1 Comparación de resultados de la altura de superficie de agua para el periodo de retorno de 10 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.	98
Figura 6.2 Comparación de resultados de la altura de superficie de agua para el periodo de retorno de 25 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.	98
Figura 6.3 Comparación de resultados de la velocidad media longitudinal para el periodo de retorno de 10 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.	99
Figura 6.4 Comparación de resultados de la velocidad media longitudinal para el periodo de retorno de 25 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.	99
Figura 6.5 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.	101
Figura 6.6 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 25 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.	102
Figura 6.7 Áreas coloreadas que representan la velocidad media bidimensional del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.	103
Figura 6.8 Áreas coloreadas que representan la velocidad media bidimensional del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 25 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.	104
Figura 6.9 Áreas coloreadas que representan el número de Froude del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.	105
Figura 6.10 Áreas coloreadas que representan el número de Froude del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.	106

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores de Ks en milímetros para superficies de concreto y albañilería (Sánchez, 1995).	35
Tabla 2.2 Valores de n y ϵ (Sánchez, 1995).	36
Tabla 2.3 Escalas para modelos sin distorsión para flujos a superficie libre (Sánchez, 1995).	37
Tabla 3.1 Relaciones de escala entre prototipo y modelo de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.	51
Tabla 4.1 Variables principales en la solución de flujos a superficie libre.	67
Tabla 4.2 Análisis de Sensibilidad Modelo HEC-RAS.	69
Tabla 4.3 Análisis de Sensibilidad Modelo IBER.	69
Tabla 4.4 Análisis de Sensibilidad Modelo DELFT.	70
Tabla 4.5 Análisis estadístico de los resultados de nivel y velocidad calculados por los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT comparados con los medidos en el modelo físico Suquía-Cañada para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años.	82
Tabla 6.1 Principales variables de entrada y condiciones de contorno para estimar los efectos de escala en el modelo Suquía-Cañada.	97
Tabla 6.2 Análisis estadístico de los resultados de nivel y velocidad calculados por el modelo bidimensional IBER; se comparan los resultados obtenidos con datos de entrada en tamaño de prototipo respecto a los obtenidos con datos de entrada en escala reducida para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años.	100

LISTA DE SÍMBOLOS

A = Escala de área.

a = Vector de aceleraciones.

α = Coeficiente de carga de la velocidad.

Λ = Función de la velocidad del sonido.

B = Función del ancho medio de la sección.

$\beta_x, \beta_y, \beta_z$ = Coeficientes de Boussinesq.

C = Coeficiente de Chezy.

C_o = Coeficientes de pérdida por expansión-contracción.

D_{ij} = Términos asociados a la dispersión.

δ = Espesor de la capa límite.

δ_{ij} = Función delta de Kronecker.

λ = Latitud de un punto.

Eu = Número de Euler.

ϵ = Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta.

ε = Espesor de la rugosidad.

ε_{ij} = Tensor de deformaciones.

ε'_{ij} = Tensor de deformaciones asociada a las fluctuaciones de velocidad.

F = Escala de fuerzas.

f = Vector de fuerzas aplicadas por unidad de volumen.

Fr = Número de Froude.

f = Coeficiente adimensional de fricción.

ζ = Coeficiente de coriolis.

G_{ii}, G_{ii} = Coeficientes para rectificación y transformación de coordenadas.

g = Aceleración de la gravedad.

σ = Tensión superficial.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

σ_K = Coeficiente de Schmidt.

σ_z = Coordenada sigma para la profundidad del flujo

H = Función de la profundidad o calado de la sección.

h_e = Pérdida de carga.

h_{fe} = Pérdida de carga por fricción.

$h_{c_{oe}}$ = Pérdida de carga por expansión-contracción.

J = Pendiente de fricción.

K = Energía cinética turbulenta del flujo.

k = Constante de von Karman.

k_s = Espesor de la rugosidad.

L = Escala de longitud.

M = Escala de la Masa.

m = Masa del fluido.

Ma = Número de Mach.

M_s, M_x, M_y = Términos fuente/sumidero de masa y de momento.

n = Coeficiente de rugosidad de Manning.

P = Escala de presiones.

p = Presión termodinámica.

\hat{p} = Presión piezométrica.

$\bar{\hat{p}}$ = Presión piezométrica media.

$\hat{\hat{p}}$ = Fluctuación debida a la turbulencia de la presión piezométrica.

ρ = Densidad del fluido.

Q = Gasto o caudal de flujo.

q = Descarga lateral de flujo por unidad de longitud.

Re = Número de Reynolds.

R_h = Radio hidráulico.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Γ = Producción de energía cinética turbulenta.

Ω = Velocidad angular de la tierra.

S = Pendiente Hidráulica.

\bar{S}_f = Pendiente representativa de la línea de energía.

T = Escala temporal del flujo.

t = Variable del tiempo.

τ = Esfuerzo Cortante.

τ_{ij} = Tensor de esfuerzos (en la dirección “ j ” sobre la cara normal al eje “ i ”; las componentes son simétricas: $\tau_{ij} = \tau_{ji}$)

τ_{tij} = Tensor de esfuerzos de Reynolds.

τ_{vij} = Tensor de esfuerzos de viscosos.

U = Escala de velocidades.

U_x, U_y = Velocidades horizontales promediadas en la profundidad.

$u \rightarrow u_1, v \rightarrow u_2, w \rightarrow u_3$ = Componentes de las velocidades en la dirección de los ejes cartesianos.

\bar{u}_i = Componente de la velocidad media del flujo.

\dot{u}_i = Componente de la fluctuación turbulenta de la velocidad del flujo.

u^* = Velocidad de corte.

μ = Viscosidad dinámica del fluido.

μ_t = Viscosidad debida a los vórtices.

V = Vector de velocidad del flujo.

ν = Viscosidad cinemática.

ν_t = Viscosidad cinemática debida a los vórtices.

Y = Escala de volumen del fluído.

∇ = Operador gradiente vectorial.

We = Número de Weber.

\bar{w} = Velocidad vertical relativa al plano sigma.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

X = Perímetro mojado.

$x \rightarrow x_1, y \rightarrow x_2, z \rightarrow x_3$ = Componentes de los ejes cartesianos.

$z = \eta$ = Nivel de referencia del fondo de la sección transversal del canal.

$z = \eta + H$ = Nivel de la superficie de agua en la sección transversal del canal.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1. Introducción

Estudios de cauces naturales se han llevado a cabo por la humanidad durante siglos para tratar de predecir las variables de las corrientes y en forma conjunta con la construcción de distintas obras hidráulicas extraer beneficios de los sistemas fluviales en busca del desarrollo de las sociedades. Es así que las ciudades más prósperas en el mundo han sido fundadas cerca de las riberas (Julien, 2002).

Un sistema fluvial se estructura en cuencas hidrográficas y en una red de drenaje compuesta por un sistema jerarquizado de cursos fluviales, desde pequeños surcos hasta ríos, que confluyen unos en otros hasta configurar el colector principal de la cuenca. Es así que, las confluencias son elementos presentes en los sistemas fluviales que juegan un rol importante en la hidrodinámica de los mismos, y son ambientes complejos, ya que la convergencia de dos o más flujos produce complicados patrones de movimiento de fluidos. Una característica hidrodinámica relevante de las confluencias fluviales es la formación de una interfase de mezcla entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras turbulentas coherentes de gran escala dentro de esta interfaz (Pozzi Piacenza y otros, 2013).

En el presente trabajo se expone el estudio de las variables hidrodinámicas de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada; el escenario de estudio se encuentra en el centro de la Ciudad de Córdoba, segunda concentración demográfica de la República Argentina (Córdoba Capital), con una actividad industrial de gran solidez e importancia, un importante centro turístico, gran actividad agrícola y ganadera.

El río Suquía o Primero nace de las confluencias de los ríos San Antonio y Cosquín a los que se les une el de Los Chorrillos y el arroyo de Las Mojarras. Su cuenca activa está limitada al norte por el dorso de La Cumbre; al sur, por la cresta de la Sierrita o Cordón de Santiago, que la separa de la cuenca del río Anizacate; al oeste, por las divisorias de las aguas del río Pintos, de la Pampa de San Luis y de la Sierra Grande.

Antes de su paso por la ciudad de Córdoba el Suquía se encuentra regulado aguas arriba con el embalse San Roque. Además sufre varias obstrucciones a lo largo de su recorrido con el azud El Diquecito y diversos puentes fuera y dentro de la

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

metrópolis. Sus afluentes generan con sus crecidas problemas importantes aguas arriba del Dique San Roque y el mismo río los genera aguas abajo en su tramo por la ciudad (Lábaque, 2010). El arroyo La Cañada nace en la depresión tectónica de La Lagunilla y cruza la parte sur de la ciudad, de SO a NE, para finalmente desaguar en el Suquía. Este arroyo de aspecto inofensivo por su escaso caudal, fue el causante de varias y desastrosas inundaciones a lo largo de la historia de la ciudad de Córdoba; la última ocurrió en la década del treinta, motivando la construcción de diques laterales en su recorrido ciudadano que han permitido controlar eficientemente el comportamiento del arroyo en épocas de crecidas violentas (Barbeito y Quintana, 1998).

La longitud aproximada del río Suquía es de unos 200 kilómetros (si se considera como su nacimiento al dique San Roque) y el ancho promedio de su cauce es de 200 metros. El arroyo La Cañada con aproximadamente 28 kilómetros de longitud (la canalización en el centro de la ciudad que deriva a la desembocadura en el río Suquía es de aproximadamente 3 kilómetros de longitud) y tiene un ancho medio de 20 metros. El caudal medio anual en la confluencia es de $9.66 \text{ m}^3/\text{seg.}$, con máximo promedio anual de $19.5 \text{ m}^3/\text{seg.}$ y mínimo promedio anual de $3.76 \text{ m}^3/\text{seg.}$ En condiciones de estiaje el caudal se reduce considerablemente, aunque aumenta de modo abrupto cuando se producen lluvias (Gizzi, 2012). La confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía se ubica alrededor de las coordenadas $31^\circ 24' 22'' \text{ S.}$ y $64^\circ 11' 20'' \text{ O.}$, a una altura aproximada de 384 metros sobre el nivel del mar.

A continuación se presenta la organización que tendrá el contenido de la Tesis de Maestría presentada:

- En el capítulo 1 se presenta una breve introducción al problema de cauces naturales, descripción del escenario de aplicación y la metodología para el desarrollo de este trabajo.
- En el capítulo 2 se presenta la Revisión de Antecedentes y Estado del Arte, donde se resuelven las ecuaciones teóricas y simplificadas para la correcta comprensión de la física de flujos a superficie libre; en este capítulo se presentará la metodología de la modelación física para canales con fondo fijo, las variables de similitud que deberán de ser satisfechas para un correcto funcionamiento de los modelos hidráulicos y se revisará la formulación para

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

cada método de cálculo en los esquemas unidimensional, bidimensional y tridimensional considerados en los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D, respectivamente; y finalmente, se presentará la motivación y se formularán los objetivos de la presente Tesis de Maestría.

- En el capítulo 3 se detallan aspectos relacionados al modelo físico que representa la confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía, las mediciones en laboratorio realizadas en el modelo; describiendo en primera instancia la instalación y las condiciones experimentales analizadas para posteriormente exponer los resultados obtenidos que serán de importancia en el capítulo de calibración y validación de los modelos numéricos.
- En el capítulo 4 con datos de las variables hidrodinámicas obtenidas en laboratorio a través del modelo físico que representa la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía se realizará la calibración y validación de los modelos numéricos considerados. En los resultados se destacan índices de calibración y las variables de importancia en el flujo.
- En el capítulo 5 se presentan los resultados de mayor importancia obtenidos a través del modelo numérico que mejor se adapte a las condiciones de flujo simuladas.
- En el capítulo 6 se analizan los posibles efectos de escala de la caracterización de inestabilidades turbulentas en el modelo físico de la confluencia a través del uso de los modelos numéricos previamente validados.
- En el capítulo 7 se presentan las conclusiones del estudio y finalmente en el capítulo 8 las referencias bibliográficas que fueron revisadas a lo largo de la investigación.

CAPÍTULO 2
REVISIÓN DE ANTECEDENTES
Y ESTADO DEL ARTE

2. Revisión de Antecedentes y Estado del Arte

En el análisis de la hidrodinámica fluvial están presentes una gran cantidad de variables a ser consideradas en el comportamiento del flujo: a) Las vinculadas a la descripción como los son variables de calado, velocidades, tensiones de corte, pendiente de fondo, etc. b) Las que relacionan al material que compone los bordes del río en el fondo y en las márgenes como la composición granulométrica y vegetación c) La componente de transporte de sedimentos y contaminantes puede también estar presente en el análisis de ríos. La necesidad de estudiar fenómenos más complejos en donde la hipótesis de unidimensionalidad se aleja demasiado de la realidad y en donde la importancia del proyecto lo justifique, y la observación, que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser efectivamente no unidimensional (como por ejemplo la confluencia de dos flujos), condujeron al desarrollo de los esquemas hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales (Cea y otros, 2009).

Estudios y observaciones de confluencias en cauces naturales han mostrado comportamientos con propiedades similares (todos con relación de ancho-profundidad pequeña); en la Figura 2.1 se presentan estas características (Herrero, 2011):

1. Zona de estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia.
2. Una capa de corte y una interface de mezcla en la combinación de los dos flujos. La capa de corte ha sido definida como una zona de intensa turbulencia por diferencias de cantidad de movimiento entre los flujos confluentes (Rhoads y Sukhodolov, 2008); y se observa como una estrecha franja dentro de la sección transversal del flujo orientada verticalmente, perpendicular al fondo del canal, y en la que se registran elevados niveles de energía cinética turbulenta.
3. Separación del flujo aguas abajo de la zona de estancamiento y en las caras aguas abajo de los escalones de los tributarios en la boca de la confluencia.
4. Aceleración del flujo alcanzando su máxima velocidad cuando se unen los dos tributarios.
5. Recuperación del flujo aguas abajo de la confluencia.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

6. Corrientes secundarias en la zona de convergencia del flujo asociada a su curvatura.

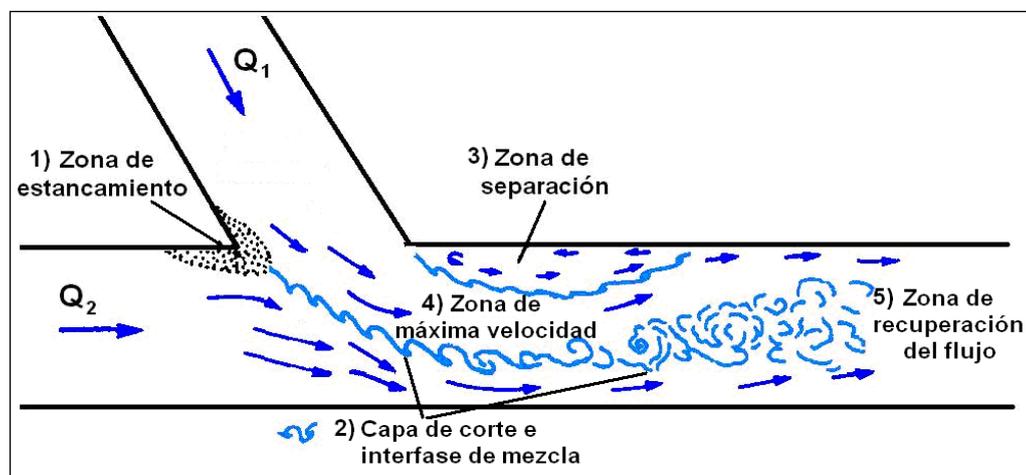


Figura 2.1 Zonificación del comportamiento de una confluencia. (Best, 1987)

La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, como una solución al mal estado del recubrimiento y riberas de inundación de la confluencia del río Suquía y el arroyo La Cañada; así como en las cercanías aguas arriba y aguas abajo, proyectó en el año 2010 las obras de “Revalorización del río Suquía en el Tramo Urbano” en donde planteó la adecuación del cauce del río reemplazando el canal de estiaje totalmente deteriorado en vastos sectores, restituyendo zonas erosionadas en ambas márgenes de dicho canal y removiendo áreas de acumulación o depósitos. Además se perfilaron las zonas del cauce entre el canal de estiaje y los muros costaneros de tal forma que se generó una sección regularizada que mejoró las condiciones del escurrimiento de los caudales de crecida del río. Los trabajos se completaron con la siembra de especies herbáceas que fijaron y protegen la cobertura de tierra vegetal en las riberas de inundación de toda la sección del río (UNC-SSRH Cba., 2011).

Las obras realizadas consisten en la demolición de las losas deterioradas y el reemplazo del canal de estiaje, ampliando las dimensiones de las banquetas y ejecutando un acorazado de piedra sobre base de hormigón. Los materiales que surgieron de las demoliciones, convenientemente adecuados se utilizaron para los rellenos de las erosiones laterales existentes. Además se perfilaron las zonas del cauce entre el canal de estiaje y los muros costaneros de tal forma de generar una sección regularizada que mejorará las condiciones del escurrimiento de los caudales

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

de crecida del río. En la zona de la desembocadura de La Cañada se realizó la limpieza del desarenador ubicado entre la Calle Humberto Primero y la Costanera y se rellenó con material compactado hasta el nivel superior del umbral ubicado aguas abajo. En el sector central de La Cañada se construyó un canal que se extendió hasta conectarse al canal de estiaje del río Suquía, con el objeto de minimizar los procesos de sedimentación para aguas bajas. En la Figura 2.2 y Figura 2.3 se muestran fotografías de la confluencia del río Suquía y el arroyo La Cañada antes y después de las obras de revalorización:



Figura 2.2 Desembocadura del arroyo La Cañada. A la izquierda se presenta una fotografía antes de las obras de revalorización y a la derecha después de las obras. (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina, 2011)



Figura 2.3 Confluencia del río Suquía y el arroyo La Cañada. A la izquierda se presenta una fotografía antes de las obras de revalorización y a la derecha después de las obras. (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina, 2011)

Las obras construidas cumplen con las siguientes funciones (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina):

- a) Fijación de un cauce estable y permanente para el río, significa que son menores las probabilidades a que el río en el futuro cambie de cauce y provoque daños en las márgenes o erosiones en el fondo que comprometan la estabilidad de las estructuras existentes como puentes, costaneras, etc.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

- b) Mejorar el comportamiento hidráulico del río, ya que la sección tipo establecida permite aumentar la capacidad no sólo del cauce principal sino también de las planicies para las crecidas.
- c) Estabilizar estructuralmente las descargas de los desagües pluviales y disminuir la posibilidad de zonas estancadas sin drenaje.
- d) Recuperar el valor social, paisajístico y recreativo del entorno del río, es decir, que sea un espacio destinado a actividades de recreación.
- e) Recuperar la continuidad longitudinal del sistema fluvial. Esta continuidad que se ha comprometido desde el punto de vista hidráulico con el progresivo deterioro de las losas existentes, lo que ha generado sectores laterales erosionados sin drenaje.
- f) Incrementar la conectividad lateral del cauce con sus riberas y llanura de inundación, función que se ha visto reducida con las erosiones y depósitos de sedimentos existentes, lo que ha generado aguas estancadas comprometiendo la situación sanitaria.
- g) Incrementar la dilución de contaminantes ante eventuales descargas, como posibles rupturas de desagües cloacales y que no queden almacenados en el entorno del río.

Además de los aspectos positivos en la canalización de cauces naturales, también existen problemáticas que deberán ser analizadas; por ejemplo, estos pueden resolver la evacuación del caudal líquido, pero técnicamente no son efectivos para el transporte sólido, alterándolo considerablemente. Habría que evaluar, por otro lado, si ha sido efectiva su realización y si es justificable el coste económico de la obra en relación con el de los daños que ha tratado de evitar o el valor de los bienes que protege. En espacios urbanos, donde hay población en riesgo y parece una actuación más necesaria, habría que preguntarse también si la canalización total responde sólo a la solución del problema de riesgo o también a las necesidades de urbanización y al propio gusto social por los canales estables e integrados en la malla urbana, con el aspecto de una calle en la que el tránsito hidrológico es solo uno de los usos. El frescor, la humedad, el sombreado que aportan unas riberas naturales desaparecen en cuanto se ejecuta la canalización y urbanización de las márgenes. Tanto las canalizaciones totales como los tramos de cauce defendidos producen generalmente efectos de incisión en el lecho por el incremento de energía

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

que propician y las dificultades para liberar esa energía mediante erosión lateral (González y otros, 2007).

Dentro del proyecto de sistematización se tomó la decisión de construir un modelo físico a escala con el objetivo de modelar diferentes condiciones de caudales para distintos periodos de retorno y de esta manera verificar el correcto funcionamiento de las obras propuestas. El Modelo Físico Suquía-Cañada fue construido por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba y será descrito con detalle en el Capítulo 3.

2.1. Modelos Matemáticos para Flujos en Superficie Libre

Las ecuaciones de flujos naturales han sido estudiadas por más de 100 años. En su forma completa, estas ecuaciones son muy difíciles de resolver, aun con el uso de las más modernas herramientas computacionales. Sin embargo, es muy importante el derivar y entender estas ecuaciones fundamentales para mejorar las ideas en el campo de la mecánica de los fluidos, en las soluciones de flujos particulares y para examinar leyes de modelamiento matemático (White, 1991).

2.1.1. Ecuaciones de Conservación de la Masa y del Momento

Las leyes de conservación para canales se pueden encontrar desarrolladas en forma Lagrangeana, es decir, están aplicadas a sistemas fijos (partículas); o de lo contrario, en un sistema Euleriano (se centra en lugares específicos en el espacio) donde es de gran utilidad la derivada total:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (V \cdot \nabla) \quad (2.1)$$

En la ecuación 2.1 “ t ” es el tiempo y “ V ” el vector de velocidad de flujo. Por lo tanto, la Ecuación de Continuidad o Ecuación de Conservación de la Masa puede ser expresada en términos Lagrangeanos como:

$$m = \rho Y = \text{constante} \quad (2.2)$$

Donde “ m ” es la masa, “ ρ ” la densidad y “ Y ” el volumen del fluido. En términos Eulerianos es equivalente a:

$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{D}{Dt}(\rho Y) = 0 = \rho \frac{DY}{Dt} + Y \frac{D\rho}{Dt} \quad (2.3)$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

En la ecuación 2.3 se puede relacionar $\frac{DY}{Dt}$ con la velocidad del flujo, conociendo que la dilatación total o tasa normal de deformación es igual a la tasa de incremento del volumen de una partícula por unidad volumétrica:

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{1}{V} \frac{DY}{Dt} \quad (2.4)$$

Sustituyendo, en la ecuación 2.4, las ecuaciones que relacionan las tasas de deformación con las velocidades en cada dirección; se tiene:

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } V = \nabla \cdot V \quad (2.5)$$

En la ecuación 2.5 “*u*”, “*v*” y “*w*” son las componentes de velocidad en las direcciones “*x*”, “*y*” y “*z*” respectivamente. Combinando las ecuaciones 2.3 y 2.5, para eliminar “*Y*”, se obtiene la Ecuación de Continuidad para flujos en su forma general:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \text{div} V = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho V = 0 \quad (2.6)$$

Si la densidad es constante (flujo incompresible), que es una hipótesis muy razonable para un flujo de agua, la ecuación 2.6 se reduce a:

$$\text{div} V = 0 \quad (2.7)$$

Para derivar las Ecuaciones de Conservación de Momento se parte de la relación comúnmente conocida como La Segunda Ley de Newton que expresa que la fuerza aplicada es el resultado de la aceleración de una partícula de masa “*m*”. En la siguiente ecuación 2.8, “*a*” representa el vector de aceleraciones y “*F*” el vector de fuerzas aplicadas en un punto:

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a} \quad (2.8)$$

Si el sistema es la partícula de un fluido, es conveniente el dividir la ecuación 2.8 para el volumen de la partícula, tal que se trabaje con la densidad en vez de la masa. Cambiando el sentido la ecuación 2.8 se puede escribir como:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = f = f_{\text{cuerpo}} + f_{\text{superficie}} \quad (2.9)$$

Donde, en la ecuación 2.9, “*f*” es la fuerza aplicada por unidad de volumen sobre la partícula de fluido. Se dividió “*f*” en dos partes: fuerzas de superficie y fuerzas del

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

cuerpo. Las así llamadas “fuerzas del cuerpo” son aquellas aplicadas a toda la masa del elemento, tales fuerzas son usualmente debidas a campos externos tales como potenciales gravitatorios o fuerzas electromagnéticas. Si se ignoran los efectos magneto-hidrodinámicos y se consideran solo las fuerzas debidas a la aceleración de la gravedad “ g ” (fuerzas gravitatorias), se tiene que:

$$f_{cuerpo} = \rho g \quad (2.10)$$

Las “fuerzas de superficie” son aquellas aplicadas por esfuerzos externos sobre los lados del elemento. La convención de signos para los componentes de esfuerzo sobre un elemento cartesiano se muestra en la Figura 2.4, donde todos los esfuerzos son positivos:

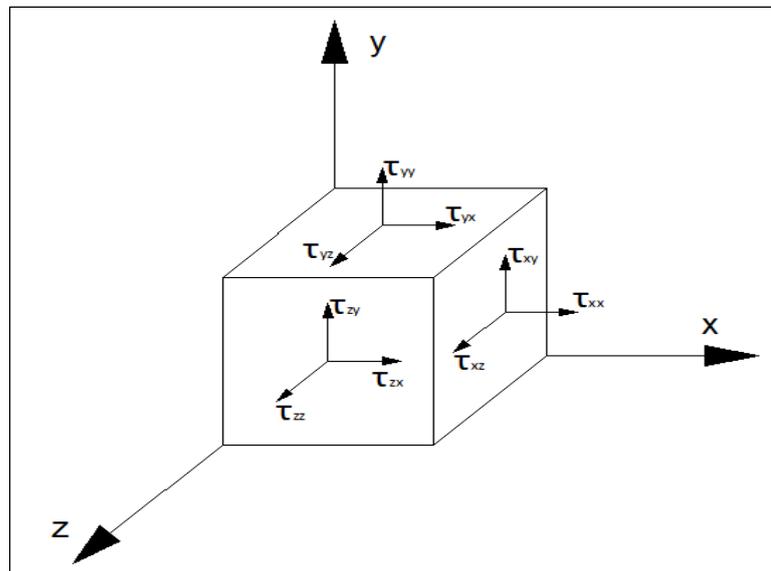


Figura 2.4 Notación para los esfuerzos (τ_{ij} = esfuerzos en la dirección j sobre la cara normal al eje i).

El tensor de esfuerzos puede ser escrito como:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

La ecuación 2.11 de la tasa de esfuerzos forma un tensor simétrico, es decir, que $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. Esta simetría es necesaria para satisfacer el equilibrio de momentos sobre los tres ejes del elemento.

Considerando las caras frontales del elemento de la Figura 2.4, la fuerza total debido a los esfuerzos en cada dirección es:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

$$\begin{aligned}
 dF_x &= \tau_{xx} dydz + \tau_{yx} dx dz + \tau_{zx} dx dy \\
 dF_y &= \tau_{xy} dydz + \tau_{yy} dx dz + \tau_{zy} dx dy \\
 dF_z &= \tau_{xz} dydz + \tau_{yz} dx dz + \tau_{zz} dx dy
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Para un elemento en equilibrio, estas fuerzas deben ser balanceadas por fuerzas opuestas de igual magnitud en las caras posteriores del elemento. Si el elemento está acelerándose, los esfuerzos de las caras frontales y posteriores serán distintos por cantidades diferenciales. Por ejemplo en las caras normales al eje “x”:

$$\tau_{xx,frontal} = \tau_{xx,posterior} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \tag{2.13}$$

Por lo tanto, la fuerza neta sobre el elemento en la dirección “x”, será debido a derivar la fuerza diferencial en las tres caras en la dirección correspondiente, como se muestra en la ecuación 2.14:

$$dF_{x,net} = \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) dydz + \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dz + \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) dx dy \tag{2.14}$$

Dividiendo la ecuación 2.14 para el volumen del elemento, y sabiendo que $\tau_{ij} = \tau_{ji}$, se tiene que:

$$f_x = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \tag{2.15}$$

La ecuación 2.15 es equivalente a obtener la divergencia a la fila superior del tensor de esfuerzos (ecuación 2.11). Similarmente, “ f_y ” y “ f_z ” se obtienen de la divergencia de la segunda y tercera fila del tensor de esfuerzos. Así el vector de las fuerzas de superficie total:

$$f_{superficie} = \nabla \cdot \tau_{ij} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2.16}$$

Finalmente, remplazando las fuerzas de cuerpo y superficiales (ecuación 2.10 y ecuación 2.16) en la relación de la Segunda Ley de Newton para una partícula de un fluido (ecuación 2.9), resulta:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g + \nabla \cdot \tau_{ij} \tag{2.17}$$

En la ecuación 2.17 se puede expresar el tensor de deformaciones “ τ_{ij} ” en términos del vector de velocidad “ V ”; esto es hecho relacionando “ τ_{ij} ” y “ ϵ_{ij} ” mediante la

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

suposición de una ley de la tasa de deformación viscosa de un fluido Newtoniano; de esta manera se llega a las relaciones de Navier Stokes.

2.1.2. Ecuaciones de Navier Stokes

Análogamente a la ley de elasticidad de Hooke, se realizó la suposición de que la variación del esfuerzo viscoso es linealmente proporcional a la tasa de deformación en la partícula de un fluido. Esta consideración fue hecha por el físico Navier Stokes, la misma que es satisfecha por todos los gases y los fluidos más comunes. Para que la suposición de Navier Stokes sea válida, se deben tomar en cuenta los postulados descritos a continuación (Panton, 2005):

- 1) El fluido es continuo, y su tensor de esfuerzos “ τ_{ij} ” es una función lineal de la tasa de deformación “ ϵ_{ij} ”.
- 2) El fluido es isotrópico, es decir, sus propiedades son independientes de la dirección, y por lo tanto, la ley de deformación es independiente de los ejes coordenados en que sea expresada.
- 3) Cuando la tasa de deformación sea cero, la ley de deformación debe reducirse a la condición de presión hidrostática $\tau_{ij} = -p\delta_{ij}$, donde “ δ_{ij} ” es la función delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, sí $i = j$; y $\delta_{ij} = 0$, sí $i \neq j$).

Por lo tanto, las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un flujo Newtoniano incompresible son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. Para fluidos homogéneos, se puede escribir en notación vectorial de la siguiente forma:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V \right\} = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 V \quad (2.18)$$

En la ecuación 2.18, “ μ ” indica la viscosidad dinámica del fluido y “ \hat{p} ” la presión piezométrica, que incluye, los términos de la fuerza de presión y gravitacionales como se muestra en la ecuación 2.19, donde “ h ” es la medida de un eje vertical positivo hacia arriba, contrario al sentido de la fuerza de gravedad:

$$\hat{p} = p + \rho gh \quad (2.19)$$

Todos los términos en la ecuación 2.18 tienen solución lineal, con excepción de la aceleración advectiva $((V \cdot \nabla)V)$ que es un término de segundo orden. El primer término en el lado derecho de la ecuación 2.18 representa el balance entre las

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

fuerzas de masa y fuerzas normales de superficie, asociados con la presión termodinámica. El último término de la ecuación 2.18 representa el efecto de las fuerzas viscosas, esta relación lineal es válida solo para fluidos Newtonianos. Este último término representa la difusión de momento debida a la acción de la viscosidad.

La parte de la izquierda de la ecuación 2.18, y en especial la aceleración advectiva $((V \cdot \nabla)V)$, proporciona una condición hiperbólica a la ecuación 2.18.; mientras que, los términos viscosos representan características parabólicas. La condición definitiva de toda la ecuación depende de cual término es el más relevante en una situación particular. Generalmente en flujos laminares las expresiones dominantes son las parabólicas (o elípticas sí el flujo es estacionario), esto es porque, los términos de difusión viscosa predominan sobre los términos no lineales asociados a la aceleración advectiva. De manera contraria, en flujos turbulentos los términos advectivos se imponen, así se puede generalizar las inestabilidades de flujos turbulentos contra los efectos estabilizantes de la viscosidad en el flujo (García y Niño, 2003).

La ecuación 2.18 contiene cuatro incógnitas, una por cada componente de velocidad del vector “ V ” y una correspondiente la presión termodinámica “ p ”. Para resolver el problema, debe ser considerada la ecuación 2.7, derivada del principio de conservación de la masa.

Es conveniente el uso de la Notación Tensorial, esto para una mejor visualización de los diferentes términos que compone las ecuaciones de conservación de la masa y momento. En las ecuaciones 2.20 y 2.21, las tres coordenadas han sido consideradas ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$); así también, las tres componentes del vector de velocidad “ V ”: $u_1 = u$, $u_2 = v$ y $u_3 = w$:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.21)$$

En la ecuación 2.21, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática.

2.1.3. Ecuaciones Promediadas de Reynolds

Las ecuaciones de Navier-Stokes, incluyendo la ecuación de continuidad, son válidas tanto en flujos laminares como turbulentos. Sin embargo, en el caso de flujos turbulentos la velocidad se convierte en inestable, presentando características cuasi-aleatorias, con variaciones significantes de las propiedades del flujo en el tiempo, aún en el caso de flujo estacionario, es decir, con descarga constante. Las fluctuaciones no estacionarias de la velocidad de flujo son conducidas principalmente por los términos no lineales de las ecuaciones de movimiento, es decir, aquellos términos asociados con la aceleración advectiva. Las fluctuaciones de la velocidad surgen debido a la presencia de remolinos o vórtices en el flujo, que tienen una gran variedad de tamaños. En general, los remolinos más grandes tienen un tamaño que escala con las dimensiones del conducto o canal por donde se desplaza el fluido. En el caso del flujo en ríos, que en la mayoría de casos ocurre en régimen turbulento, los remolinos más grandes tienen un tamaño que es conmensurable con la profundidad. Debido a la acción de términos no lineales, estos remolinos de gran tamaño transfieren su energía a los remolinos de menor tamaño, y estos, a su vez, transfieren su energía a los remolinos aún más pequeños. Este mecanismo de transferencia de energía, ocurre en promedio, de grandes a pequeñas escalas y es muy eficiente en el sentido de que la menor energía es disipada en este proceso. Esta transferencia de energía desde grandes a pequeños remolinos es llamada “Cascada de Energía Turbulenta” (García y Niño, 2003).

La disipación de la energía es despreciable en las grandes escalas del flujo, sin embargo en las escalas suficientemente pequeñas, la viscosidad del fluido domina los procesos de disipación de energía, transformando la energía cinética turbulenta del flujo en calor. Esta energía de disipación ocurre en la escala de Kolmogorov, que representa los tamaños más pequeños de remolinos en un flujo turbulento. La escala de Kolmogorov decrece cuando el número de Reynolds en el flujo se incrementa, esta escala, puede ser fácilmente menor a un milímetro en flujos de agua en cauces naturales.

El criterio de Nyquist dice que para la resolución completa de una onda de longitud “ L ”, es necesario conocer los términos de al menos tres puntos de esta. Esto implica que para la resolución adecuada de una onda de longitud “ L ” con un tamaño de

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

grilla discreto " Δx ", se requiere que $\Delta x < L/2$ para satisfacer el teorema de Nyquist. Este requerimiento, para la modelación numérica de flujos turbulentos usando las ecuaciones de Navier-Stokes, impone muy fuertes restricciones sobre la grilla discreta a ser usada en la simulación numérica: El tamaño de grilla debe ser menor que la mitad de la escala de Kolmogorov. En la práctica esta restricción hace imposible la resolución numérica de las ecuaciones completas de Navier-Stokes para flujos turbulentos. Un método conocido como Simulación Numérica Directa (DNS por sus siglas en inglés: Direct Numerical Simulation), resuelve las ecuaciones completas; esto solo puede ser llevado a cabo con súper computadoras y para casos de flujos de muy pequeñas dimensiones con bajos números de Reynolds, simulaciones que se llevan a cabo en laboratorio para el estudio de flujos turbulentos, sin aplicación válida para problemas de ingeniería y de campo. Por estas razones, se han desarrollado otros modelos de simulación para flujos turbulentos. Un método con menos restricciones que el DNS es conocido como Simulación de Grandes Vórtices (LES por sus siglas en inglés: Large Eddy Simulation). Este método se basa en la idea de que las grandes escalas del flujo que tienen dimensiones comparadas con aquellas del dominio espacial en el cual el flujo se desarrolla, están moduladas por las condiciones de contorno específicas para ese dominio espacial. Esta idea no es universal; por ejemplo, en escalas de flujo de dominio muy pequeño, los vórtices tendrán dimensiones cerradas y aún mayor que la escala de Kolmogorov, y de esto, su tamaño que tiende a ser independiente de las condiciones de contorno.

Se ha demostrado de manera empírica que las escalas más pequeñas de algún flujo turbulento tienden a un comportamiento universal que es independiente de la situación particular de flujo analizado. Desde este punto de vista, parece apropiado el probar en un modelo las pequeñas escalas, basado en información empírica, ya que, su comportamiento es similar en cualquier flujo. De manera contraria, no es una buena idea el modelar grandes escalas basadas en información empírica, por lo que aquellos modelos son solo válidos en condiciones particulares para cuales fueron desarrollados. Teniendo en cuenta estos argumentos, el método LES fue desarrollado para numéricamente resolver el comportamiento de las escalas grandes del flujo (los grandes vórtices), usando modelos empíricos para darle una validez universal que simulan el comportamiento de las escalas no resueltas (los pequeños

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

vórtices). Ya que las escalas espaciales que deben ser resueltas en este caso son más grandes que las escalas de Kolmogorov, la discretización de la grilla para un dominio espacial no resulta costosa en términos de requerimientos computacionales como en el caso del DNS (García y Niño, 2003).

Un método alternativo al DNS y LES es el denominado Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas de Reynolds (RANS por sus siglas en inglés: Reynolds Averaged Navier-Stokes Ecuations). Este método es basado en la idea que el flujo turbulento experimenta fluctuaciones cuasi o pseudo aleatorias que pueden ser analizadas estadísticamente. De hecho, este análisis es posible distinguiendo entre el comportamiento medio del flujo y el de las fluctuaciones de velocidad sobre el flujo principal. Ya que, en general, las fluctuaciones son la menor fracción de la velocidad total del flujo (la desviación estándar de las fluctuaciones de velocidad para flujo turbulento en un canal abierto está cerca del 15% de la velocidad total del flujo), se puede argumentar que es de mayor interés el conocer el comportamiento del flujo medio contra el de las fluctuaciones. Esto llevó al desarrollo de un método en el que se promedió las ecuaciones de Navier-Stokes que ocurren en un régimen turbulento, para extraer el comportamiento de las velocidades medias del flujo, eliminando las fluctuaciones de la turbulencia en el cálculo.

Tomando esto en cuenta para el procedimiento de promediado, la velocidad de flujo instantánea en la dirección “ x_i ” puede ser descompuesta en un valor medio “ \bar{u}_i ” y en el valor de la fluctuación de la velocidad “ \hat{u}_i ”, como se muestra en la ecuación 2.22:

$$u_i = \bar{u}_i + \hat{u}_i \quad (2.22)$$

De manera similar, para la presión se tiene que:

$$\hat{p} = \bar{p} + \hat{p} \quad (2.23)$$

Se introducirá las ecuaciones 2.22 y 2.23 en la ecuación de Navier-Stokes para realizar el promediado conjunto de las variables. Para esto es conveniente modificar la ecuación de momento 2.21; multiplicando la ecuación 2.20 por “ u_i ” y sumando el resultado a la ecuación 2.21, de esta manera remplazando en las ecuaciones 2.22 y 2.23 se obtiene:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

$$\frac{\partial(\bar{u}_i + \dot{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial((\bar{u}_j + \dot{u}_j)(\bar{u}_i + \dot{u}_i))}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p} + \dot{p})}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2(\bar{u}_i + \dot{u}_i)}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.24)$$

Por lo tanto, realizando el promediado conjunto sobre la ecuación 2.24; sabiendo que $\overline{\bar{a}} = \bar{a}$ y $\overline{\dot{a}} = 0$ para cualquier variable “a”, resulta que:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \bar{u}_i + \overline{\dot{u}_j \dot{u}_i})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.25)$$

De la misma forma, a continuación se presenta la ecuación de continuidad promediada:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.26)$$

De tal manera que multiplicando la ecuación 2.26 por “ \bar{u}_i ” y al añadir este resultado a la ecuación 2.25, se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j}}{\partial x_j} \quad (2.27)$$

Note que el término $\overline{\dot{u}_i \dot{u}_j}$ de la ecuación 2.27 no es cero, ya que en general, las fluctuaciones de velocidad están correlacionadas. En este particular, el hecho de que las correlación cruzada $\overline{\dot{u}_i \dot{u}_j}$ con $i \neq j$ es diferente de cero implica que la turbulencia no tiene una naturaleza totalmente aleatoria. Estas correlaciones representan flujos de momento turbulento, por lo tanto están asociados con los esfuerzos efectivos del flujo. Estos son conocidos como esfuerzos turbulentos o esfuerzos de Reynolds:

$$\tau_{tij} = -\rho \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j} \quad (2.28)$$

Así los esfuerzos viscosos, de acuerdo a la ley de esfuerzos de Navier-Stokes para un fluido Newtoniano, serán:

$$\tau_{vij} = 2\mu \epsilon_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.29)$$

Donde, en la ecuación 2.29, “ ϵ_{ij} ” representa el tensor de deformación y por lo tanto es posible expresar el esfuerzo total en un flujo turbulento como:

$$\tau_{ij} = \tau_{vij} + \tau_{tij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j} \quad (2.30)$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Así, la ecuación 2.27 puede ser escrita como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.31)$$

De este resultado se puede concluir, que las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas sobre la turbulencia no resuelven realmente el problema de las fluctuaciones, ya que, en la ecuación 2.31 todavía aparecen los términos en la forma de los esfuerzos de Reynolds. El intento de obtener un conjunto de ecuaciones que describan el comportamiento sólo del flujo medio no da resultado, ya que otras incógnitas aparecen, así, se excede el número de las ecuaciones promediadas de Reynolds. Esto es conocido como el problema de cierre de la turbulencia (García y Niño, 2003). Por lo tanto, el método RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Ecuations) requiere introducir ecuaciones adicionales (externas) para cerrar el problema. Este cierre consiste en diferentes modelos de los esfuerzos de Reynolds. Una de las hipótesis más usadas es el asumir que los esfuerzos de Reynolds siguen un comportamiento similar al de los esfuerzos viscosos. Esto es, asumir que los momentos del flujo turbulento (los esfuerzos de Reynolds) son proporcionales a la tasa de deformación del flujo medio, ya que el momento de flujo molecular es proporcional a aquella tasa. El factor de proporcionalidad, que es análogo al de los esfuerzos viscosos, es denominado Viscosidad de Vórtices. De esta manera, la ecuación 2.32 es conocida como la hipótesis de Boussinesq y se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_{tij} = 2\mu_t \epsilon_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.32)$$

En la ecuación 2.32, “ μ_t ” describe la viscosidad de los vórtices. Es de importancia notar que “ μ_t ” no es una propiedad del fluido, como si lo es la viscosidad dinámica “ μ ”, pero si es una propiedad del flujo, y por lo tanto es una variable que depende de la velocidad. Si se define $\nu_t = \mu_t/\rho$ como la viscosidad cinemática de los vórtices, es posible reescribir las ecuaciones RANS de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2.33)$$

Este resultado no contribuye realmente a resolver el problema de cierre de la turbulencia, ya que es necesario especificar como se estimará la viscosidad de los

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

vórtices “ ν_t ”. Sin embargo, la hipótesis de Boussinesq ha probado adecuadamente resolver un gran número de problemas prácticos, a pesar del hecho que existen muchos casos para el cual el gradiente de esta hipótesis no es válido. Existen varios métodos diferentes para modelar “ ν_t ”. Los métodos son denominados modelos de cero, una y dos ecuaciones; dependiendo del número de ecuaciones diferenciales usadas en estimar las viscosidad de los vórtices. Esta variable puede ser expresada como el producto de la escala de velocidad “ U ”, y la escala de longitud “ L ”:

$$\nu_t = UL \quad (2.34)$$

Varios modelos determinan “ U ” y “ L ” de diferente manera. Por ejemplo, el modelo más básico considera “ U ” y “ L ” constante, de donde obviamente resulta “ ν_t ” constante. Un modelo de cierre menos básico es conocido como Modelo de Longitud de Mezcla, que asume que la longitud de escala “ L ” corresponde a la longitud de mezcla que determina la amplitud de los desplazamientos de las parcelas del fluido conducidas por las fluctuaciones de velocidad turbulenta (Delgado y otros, 2005). Por ejemplo, para un flujo de una dimensión en la dirección “ x_1 ”, con velocidad media “ $\bar{u}_1(x_2)$ ”, por la hipótesis de longitud de mezcla resulta:

$$U = \left| \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} \right| L \quad (2.35)$$

Remplazando 2.35 en la ecuación 2.34:

$$\nu_t = \left| \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} \right| L^2 \quad (2.36)$$

En los contornos de pared de los flujos, generalmente se asume que la longitud de mezcla incrementa linealmente con la distancia a la pared, así resulta que:

$$L = k x_2 \quad (2.37)$$

Donde, en la ecuación 2.37, “ x_2 ” representa una coordenada normal con el origen en la pared y “ k ” es la constante de von Karman. Generalmente, se considera que “ L ” alcanza el máximo valor a cierta distancia desde la pared y se conserva constante hasta la otra región del flujo.

El modelo de la longitud de mezcla es también denominado un modelo de cero ecuaciones, ya que, la viscosidad de los vórtices es estimada por una ecuación

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

algebraica y sin el uso de alguna ecuación diferencial. Los modelos de una y dos ecuaciones son más sofisticados, los cuales hacen uso de una o dos ecuaciones diferenciales sobre las ecuaciones RANS, para determinar la viscosidad de los vórtices. En los modelos de una ecuación, la escala de longitud “ L ”, es estimada desde una ecuación algebraica usando un modelo como el usado en la ecuación 2.37. Sin embargo, la escala de velocidad turbulenta “ U ”, es determinada de la energía cinética turbulenta del flujo “ K ”, definida como:

$$K = \frac{1}{2} \overline{\dot{u}_i \dot{u}_i} \quad (2.38)$$

Tal que:

$$U \approx \sqrt{K} \quad (2.39)$$

Donde se supone que:

$$\nu_t = \alpha \sqrt{K} L \quad (2.40)$$

Donde “ α ” es un coeficiente de proporcionalidad. Para determinar la viscosidad de los vórtices, una ecuación diferencial para “ K ” debe ser resuelta. Esta ecuación es obtenida de las ecuaciones de Navier-Stokes. Para esto, si se considera la ecuación de las fluctuaciones de velocidad, que resulta de la diferencia de las ecuaciones 2.24 menos las 2.25; de donde resulta:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\dot{u}_i \dot{u}_j + \dot{u}_i \bar{u}_j + \bar{u}_i \dot{u}_j - \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \dot{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \dot{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.41)$$

Multiplicando la ecuación 2.41 por “ \dot{u}_i ” y promediando conjuntamente sobre la turbulencia, la ecuación de transporte para “ K ” resulta ser:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{1}{\rho} \overline{\dot{u}_j \dot{p}} + \frac{1}{2} \overline{\dot{u}_i \dot{u}_i \dot{u}_j} - 2\nu \overline{\dot{u}_i \dot{\epsilon}_{ij}} \right\} - \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j \epsilon_{ij}} - 2\nu \overline{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (2.42)$$

Donde en la ecuación 2.42, “ $\dot{\epsilon}_{ij}$ ” es el tensor de deformación asociado a las fluctuaciones de velocidad:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \quad (2.43)$$

El último término en el lado derecho de la ecuación 2.42 representa la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

$$\epsilon = 2\nu \overline{\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}} \quad (2.44)$$

Y el penúltimo término del lado derecho de la ecuación 2.42, representa la tasa de producción de energía cinética turbulenta desde el flujo debido a su interacción con los esfuerzos de Reynolds:

$$\Gamma = -\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \epsilon_{ij} \quad (2.45)$$

Introduciendo el concepto de viscosidad de los vórtices y considerando las ecuaciones 2.28 y 2.32, la producción de energía cinética turbulenta puede escribirse como:

$$\Gamma = 2\nu_t (\epsilon_{ij})^2 = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (2.46)$$

Los primeros tres términos en el lado derecho de la ecuación 2.42 están relacionados con la difusión turbulenta y molecular de la energía cinética turbulenta, con la contribución de fluctuaciones de presión para la transferencia de esta energía (García y Niño, 2003). A continuación se presenta una ecuación de transporte simplificada para “K”:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \frac{\partial K}{\partial x_j} \right\} + \Gamma - \epsilon \quad (2.47)$$

En la ecuación 2.47, “ σ_K ” es el coeficiente de Schmidt que relaciona la difusividad turbulenta de “K” con la viscosidad de los vórtices “ ν_t ”. En esta ecuación 2.47, la difusión molecular y el término de la presión se han despreciado, mientras que, el término de la difusión turbulenta ha sido incluido parcialmente (García y Niño, 2003). En los modelos de una ecuación, la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta es modelada de la siguiente manera:

$$\epsilon = C_D \frac{K^{3/2}}{L} \quad (2.48)$$

Donde, en la ecuación 2.48, “ C_D ” representa una constante empírica.

En los modelos de dos ecuaciones, “U” es determinada con la ecuación 2.39 y “L” se relaciona con “ ϵ ” de la siguiente manera:

$$\epsilon \propto \frac{U^3}{L} \quad (2.49)$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Remplazando la ecuación 2.39 en la 2.49, resulta:

$$L \propto \frac{(\sqrt{K})^3}{\epsilon} \quad (2.50)$$

De esta manera, se obtiene:

$$v_t = \alpha \frac{K^2}{\epsilon} \quad (2.51)$$

Donde “ α ” es un coeficiente de proporcionalidad. De la misma forma que en el modelo de una ecuación, “ U ” se determina con la ecuación 2.39; sin embargo, en el caso de los modelos de dos ecuaciones es necesario introducir una ecuación extra para “ ϵ ”. No es posible obtener formalmente tal ecuación de las ecuaciones de Navier-Stokes, como fue hecho antes para “ K ”. Sin embargo, se acepta que el siguiente modelo de la ecuación de transporte para “ ϵ ” es válido:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{v_t}{\sigma_K} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} P - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{K} \quad (2.52)$$

Donde en la ecuación 2.52, “ $C_{1\epsilon}$ ” y “ $C_{2\epsilon}$ ” son constantes empíricas. El modelo de dos ecuaciones resultante de las ecuaciones 2.47, 2.51 y 2.52 es denominado modelo $K - \epsilon$. Los coeficientes en el modelo han sido calibrados usando datos empíricos que se asume ser bastante universales. Este no es el único modelo de dos ecuaciones que existe, pero es uno de los más conocidos y, a pesar de sus limitaciones, ha producido buenos resultados cuando se compara con observaciones experimentales en varias aplicaciones ingenieriles (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2012).

2.1.4. Ecuaciones de Saint-Venant

Como se dijo antes, para la resolución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes se han introducido varias simplificaciones que conducen a modelos que pueden ser aplicados a problemas prácticos en la ingeniería. Una de estas aproximaciones es conocida como las ecuaciones de Saint-Venant o Ecuaciones de Onda en Aguas Superficiales. Los flujos en canales abiertos y ríos son típicos ejemplos que pueden ser tratados con esquemas unidimensionales, en estos casos es usual que el principal interés sea determinar la variación longitudinal de las propiedades del flujo en la dirección de la corriente. La versión unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant se obtiene integrando las ecuaciones de continuidad

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

y de Navier-Stokes en la sección transversal del flujo, asumiendo presión hidrostática en la dirección normal al fondo del cauce. Sin embargo, la suposición de un flujo unidimensional puede no ser válida en varias aplicaciones de flujo a superficie libre, como por ejemplo en canales no prismáticos, donde se tienen grandes variaciones en el alineamiento y sección transversal del canal; en estos casos es posible simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes a un esquema bidimensional en el que en el análisis considerado se obtengan resultados con una razonable precisión. La versión bidimensional de estas ecuaciones es obtenida promediando con respecto a la profundidad las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, tal que las ecuaciones resultantes describan el movimiento del fluido en un plano paralelo al fondo del canal (Chaudhry, 2008).

La información respecto a la estructura vertical del flujo se pierde cuando se promedia las variables respecto a la sección transversal o profundidad. Esto no es de gran importancia, ya que, tal información es menos relevante que las propiedades de flujo longitudinales (caso unidimensional) o transversales (caso bidimensional). Las ecuaciones de Saint-Venant son usadas en varias aplicaciones ingenieriles de ríos, transporte de sedimentos, estuarios y cuerpos de agua superficiales con resultados con suficiente aproximación a la física real del problema.

Integrando la ecuación de continuidad promediada de Reynolds en la dirección normal al fondo del canal, “z”, entre el fondo “z = η ” y la superficie libre “z = $\eta + H$ ”, resulta que:

$$\int_{\eta}^{\eta+H} \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right\} dz = 0 \quad (2.53)$$

Donde en la ecuación 2.53, “H” es la profundidad local del flujo. De acuerdo a la regla de integración de Leibnitz, que se escribe a continuación en la ecuación 2.54:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \int_a^b f ds \right\} = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial r} ds + f_{(b)} \frac{\partial b}{\partial r} - f_{(a)} \frac{\partial a}{\partial r} \quad (2.54)$$

De esta manera, la ecuación 2.53 puede ser escrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \int_{\eta}^{\eta+H} \bar{u} dz \right\} - \bar{u}_{(\eta+H)} \frac{\partial(\eta+H)}{\partial x} + \bar{u}_{(\eta)} \frac{\partial(\eta)}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \int_{\eta}^{\eta+H} \bar{v} dz \right\} - \bar{v}_{(\eta+H)} \frac{\partial(\eta+H)}{\partial y} + \bar{v}_{(\eta)} \frac{\partial(\eta)}{\partial y} + \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\bar{w}_{(\eta+H)} - \bar{w}_{(\eta)} = 0$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Las condiciones de contorno cinemáticas será tratadas ahora, las cuales afirman que si “ $F(x, y, z, t)$ ” es una función que describe a la superficie libre, entonces se tiene que:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (V \cdot \nabla)F = 0 \quad (2.56)$$

Donde en la ecuación 2.56, “ V ” representa el vector de velocidad de superficie libre. Se describe la superficie libre con la siguiente ecuación 2.57:

$$F_{(x,y,z,t)} = z - (\eta(x, y) + H(x, y, z)) = 0 \quad (2.57)$$

Y remplazando la ecuación 2.57 en la 2.56, resulta:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \bar{u}_{(\eta+H)} \frac{\partial(\eta+H)}{\partial x} + \bar{v}_{(\eta+H)} \frac{\partial(\eta+H)}{\partial y} + \bar{w}_{(\eta+H)} = 0 \quad (2.58)$$

Las condiciones de contorno de no deslizamiento y no penetración en el fondo del canal son: $\bar{u}_{(\eta)} = \bar{v}_{(\eta)} = \bar{w}_{(\eta)} = 0$. Remplazando estas condiciones en las ecuaciones 2.58 y 2.55, se obtiene el siguiente resultado descrito en la ecuación 2.59 que representa la ecuación de continuidad promediada en la profundidad:

$$\frac{\partial(\langle \bar{u} \rangle H)}{\partial x} + \frac{\partial(\langle \bar{v} \rangle H)}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2.59)$$

Los corchetes triangulares representan el promedio en la profundidad; de esta manera “ $\langle \bar{u} \rangle$ ” y “ $\langle \bar{v} \rangle$ ” son las velocidades promediadas en la profundidad del flujo y paralelo al fondo en las direcciones “ x ” y “ y ” respectivamente. En este punto, conviene introducir las siguientes definiciones:

$$\int_{\eta}^{\eta+H} \bar{u} dz = \langle \bar{u} \rangle H \quad (2.60)$$

$$\int_{\eta}^{\eta+H} \bar{v} dz = \langle \bar{v} \rangle H \quad (2.61)$$

Siguiendo un procedimiento similar es posible obtener la versión de las ecuaciones de Reynolds promediadas respecto a la profundidad en las direcciones “ x ” y “ y ”, para lo cual, la ecuación de momento en la dirección “ z ” debe ser remplazada por una ley de presión hidrostática:

$$\bar{p} = \bar{p} + \rho gh = \text{constante en } z \quad (2.62)$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Evaluando esta ecuación en la superficie libre ($z = \eta + H$), donde la presión relativa “ \bar{p} ” desaparece, se tiene:

$$\bar{p} = \rho g(\eta + H) \quad (2.63)$$

Con estas consideraciones, se puede fácilmente obtener las ecuaciones 2.64 y 2.65:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\langle \bar{u} \rangle H)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_x \langle \bar{u} \rangle^2 H)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{xy} \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle H)}{\partial y} = -gH \frac{\partial(\eta + H)}{\partial x} + \\ \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(\langle \tau_{xx} \rangle H)}{\partial x} + \frac{\partial(\langle \tau_{xy} \rangle H)}{\partial y} + \tau_{xz}(\eta + H) - \tau_{xz}(\eta) \right\} \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\langle \bar{v} \rangle H)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{xy} \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle H)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_y \langle \bar{v} \rangle^2 H)}{\partial y} = -gH \frac{\partial(\eta + H)}{\partial y} + \\ \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial(\langle \tau_{xy} \rangle H)}{\partial x} + \frac{\partial(\langle \tau_{yy} \rangle H)}{\partial y} + \tau_{yz}(\eta + H) - \tau_{yz}(\eta) \right\} \end{aligned} \quad (2.65)$$

Las ecuaciones 2.59, 2.64 y 2.65 constituyen las ecuaciones de Saint-Venant para esquemas de flujo bidimensional. Las siguientes definiciones han sido utilizadas para obtener las ecuaciones 2.64 y 2.65:

$$\int_{\eta}^{\eta+H} \langle \bar{u} \rangle^2 dz = \beta_x \langle \bar{u} \rangle^2 H \quad (2.66)$$

$$\int_{\eta}^{\eta+H} \langle \bar{v} \rangle^2 dz = \beta_y \langle \bar{v} \rangle^2 H \quad (2.67)$$

$$\int_{\eta}^{\eta+H} \bar{u} \bar{v} dz = \beta_{xy} \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle H \quad (2.68)$$

En las tres últimas ecuaciones “ β_x ”, “ β_y ” y “ β_{xy} ” son los coeficientes de Boussinesq, y sus valores dependen de la estructura vertical de las velocidades de flujo. Usualmente se asume que estos coeficientes puede tomar un valor cercano a la unidad, así desaparecen de la formulación.

Las ecuaciones 2.64 y 2.65 pueden tomar diferentes formas dependiendo de las suposiciones y cierres usados para los términos de la derecha. Por ejemplo, los términos “ $\tau_{xz}(\eta + H)$ ” y “ $\tau_{yz}(\eta + H)$ ”, corresponde a los esfuerzos de corte en la superficie en las direcciones “ x ” y “ y ”, respectivamente, que son determinadas por la velocidad del viento soplando sobre la superficie libre. Los términos “ $\tau_{xz}(\eta)$ ” y “ $\tau_{yz}(\eta)$ ”, corresponden al esfuerzo de corte en el fondo del canal en las direcciones “ x ” y “ y ”, respectivamente. Para estimar estos términos es necesario introducir un

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

modelo de cierre para la resistencia, que relaciona los esfuerzos de corte con la velocidad promediada en la profundidad. Usando las pendientes de fricción en las direcciones “ x ” y “ y ”, que son, “ J_x ” y “ J_y ” respectivamente, resulta que:

$$\tau_{xz}(\eta) = \rho g H J_x \quad (2.69)$$

$$\tau_{yz}(\eta) = \rho g H J_y \quad (2.70)$$

Por ejemplo, la ecuación de Manning puede ser usada como modelo de cierre para la resistencia al fondo del canal (Chow, 1994):

$$J_x = \left(\frac{\langle \bar{u} \rangle n}{H^{2/3}} \right)^2 \quad (2.71)$$

$$J_y = \left(\frac{\langle \bar{v} \rangle n}{H^{2/3}} \right)^2 \quad (2.72)$$

En las ecuaciones 2.71 y 2.72 “ n ” representa el coeficiente de rugosidad de Manning, este se estima empíricamente para aproximar los esfuerzos de corte del fondo del cauce. Los términos “ $\langle \tau_{xx} \rangle$ ”, “ $\langle \tau_{xy} \rangle$ ” y “ $\langle \tau_{yy} \rangle$ ” que representan los diferentes componentes del esfuerzo promediado respecto a la profundidad (viscoso y turbulento), también necesitan ser estimados. Se los puede obtener con el uso de los modelos de cero, una o dos ecuaciones discutidos previamente.

A continuación se derivará la versión unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant. Estas ecuaciones son muy utilizadas en casos prácticos de la ingeniería, en aplicaciones para estimar las inundaciones en un evento supuesto en flujos de ríos y canales abiertos. En este caso, como ya se dijo antes, se promediará las ecuaciones de Reynolds sobre la sección transversal del flujo.

La forma más directa para derivar las ecuaciones diferenciales de Saint-Venant es considerar el balance de masa y momento en un volumen de control infinitesimal de longitud “ dx ” y con área de sección transversal “ A ”, que puede variar en el tiempo y el espacio. Aquí “ x ” representa una coordenada longitudinal en la dirección de la descarga “ Q ” (Castelló, 2009). Para el flujo de un líquido incompresible, la conservación de la masa manifiesta que el volumen neto de entrada debe ser balanceado por el incremento correspondiente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2.73)$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

En la ecuación 2.73 “ q ” representa la descarga de flujo lateral por unidad de longitud en la dirección “ x ”. En el caso de la conservación del momento longitudinal, la variación neta de momento (considerando variaciones espaciales y de tiempo), debe ser balanceada por las fuerzas externas totales actuando sobre el volumen de control. Esta fuerza total está compuesta por la gravedad, fuerzas de presión hidrostática actuando sobre las secciones transversales aguas arriba y aguas abajo de la porción de flujo considerado, esfuerzos de corte superficiales actuando sobre el área considerada (de ancho “ B ” y longitud “ dx ”) y esfuerzos de corte en el fondo actuando sobre el perímetro mojado, “ X ”, sobre toda la longitud del volumen de control. El balance del momento puede ser formulado como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} = -gA \frac{\partial(\eta+H)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \{ \tau_{xz}(\eta+H)B - \tau_{xz}(\eta)X \} \quad (2.74)$$

En la ecuación 2.74, “ β ” representa el coeficiente de Boussinesq, que depende de la estructura de velocidad dentro de la sección transversal del flujo (usualmente toma valores cercanos a la unidad), “ $\tau_{xz}(\eta+H)$ ” representa el esfuerzo de corte del viento actuando en la superficie libre y “ $\tau_{xz}(\eta)$ ” representa los esfuerzos de corte en el fondo del canal. En esta ecuación 2.74, $z = \eta$ es la elevación local del fondo y $z = \eta + H$ es la elevación local de la superficie libre, donde “ H ” es la profundidad de flujo y “ z ” una coordenada normal a la pared de fondo. Para estimar “ $\tau_{xz}(\eta)$ ” se puede utilizar la siguiente ecuación de cierre:

$$\tau_{xz}(\eta) = \rho g R_h J \quad (2.75)$$

Donde $R_h = A/X$ representa el radio hidráulico de la sección transversal del flujo y “ J ” es la pendiente de fricción que puede estimarse utilizando la ecuación de Manning:

$$J = \left(\frac{Qn}{AR_h^{2/3}} \right)^2 \quad (2.76)$$

El momento transferido por los flujos laterales, “ q ”, ha sido despreciado en la ecuación 2.74, ya que se supone que la descarga será lo suficientemente grande comparada con los flujos laterales. Aunque, no tiene ninguna complicación el incorporar el momento transferido por los flujos laterales en los casos en la ecuación 2.74, siempre y cuando, este se determine ser de un tamaño considerable que afecte a las condiciones del flujo.

2.2. Modelación Física de Flujos a Superficie Libre

El uso de modelos físicos a escala reducida, llamados simplemente modelos hidráulicos, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual deben satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica; que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas. La modelación física hidráulica es ampliamente usada en la investigación del diseño y para determinar las características de dispositivos de operación en la ingeniería hidráulica. Esto implica, dependiendo del grado de sofisticación que varía según el objetivo de la investigación, el uso de modelos a escala para replicar el flujo y procesos de transporte de diversos sistemas naturales y evaluar el comportamiento de las estructuras y maquinarias de control hidráulico. Una de las mayores ventajas del modelamiento hidráulico es la capacidad potencial de replicar características complicadas de situaciones de flujo (Ettema, 2000).

Los modelos hidráulicos que reproducen sistemas de flujo a superficie libre como canales, ríos y estuarios, generalmente se usan para resolver problemas de variación de niveles y cambios de patrones de flujo debidos a modificaciones del cauce o emplazamientos de estructuras dentro del flujo, así como a la determinación del comportamiento de avenidas bajo sistemas de regulación. Es común que las longitudes o áreas a representar sean grandes por lo que los efectos de fricción son importantes; el flujo es gravitatorio y turbulento, omitiéndose por tanto el flujo laminar. Con frecuencia, usando la técnica de modelos hidráulicos se resuelven otros problemas con flujo a superficie libre. Entre éstos se encuentran estructuras hidráulicas tratadas aisladamente y que forman parte de sistemas de obras para fines agrícolas, industriales, sanitarios, control de avenidas, navegación y de disipación de energía. Para este tipo de estudios, no interesa tratar las deformaciones que puedan sufrir las fronteras del cauce, por lo que los modelos son de fondo fijo y, en condiciones de medición de gastos y niveles únicamente, éstos podrán construirse con distorsión (Sánchez, 1995).

2.2.1. Condiciones de Similitud

Para satisfacer las condiciones de similitud de todo Prototipo-Modelo, se requiere cumplir con las siguientes condiciones (Gherardelli, 2007):

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

- 1) **Similitud Geométrica**, que se cumple cuando la relación de todas las dimensiones de longitud homólogas (geoméricamente equivalentes) son iguales; de donde implica que solo la similaridad de forma se toma en cuenta.
- 2) **Similitud Cinemática**, la relación de todos los puntos geoméricamente homólogos, velocidades y aceleraciones entre modelo y prototipo en cualquier espacio de tiempo son constantes.
- 3) **Similitud Dinámica**, se debe satisfacer la similitud cinemática y considerar una relación constante de la acción de las fuerzas sobre las partículas del fluido, tales como fuerza de fricción, de gravedad, de Coriolis y de inercia. Lo anterior implica que el polígono de fuerzas sobre los puntos homólogos debe ser geoméricamente similar.

En la formulación que se desarrolla a continuación, los subíndices “*r*”, “*m*” y “*p*” representan razón, modelo y prototipo; respectivamente. El parámetro básico para la similitud geométrica es la razón de longitud:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.77)$$

La ecuación 2.77 debe ser constante para todas las medidas del modelo y prototipo. Como una consecuencia de la similitud, la relación de área “*A*”, será:

$$A_r = L_r^2 \quad (2.78)$$

Y la relación de volumen “*Y*”:

$$Y_r = L_r^3 \quad (2.79)$$

Para la similitud cinemática, la relación de velocidad “*U_r*” y la de aceleración “*a_r*”, deben ser constantes en todos los puntos homólogos del modelo y prototipo. Estas relaciones son:

$$U_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (2.80)$$

$$a_r = \frac{U_r}{T_r} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad (2.81)$$

En las ecuaciones 2.80 y 2.81, “*T_r*” representa la relación de tiempo:

$$T_r = \frac{T_p}{T_m} \quad (2.82)$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

En la similitud dinámica se involucra la razón de la fuerza “ F_r ”. Las fuerzas en un modelo surgen debido a una variedad de fenómenos físicos (fricción, tensión superficial, presión, gravedad, etc.). Las fuerzas de inercia son siempre importantes para cuando los flujos se aceleran o desaceleran por cambios en el área de flujo o turbulencia. El flujo laminar uniforme es una excepción, que casi no sucede en la naturaleza, en que las fuerzas de inercia no son importantes. La segunda ley de Newton relaciona las fuerzas de inercia debidas a la masa “ M ” y a la aceleración “ a ”:

$$F_r = M_r a_r \quad (2.83)$$

La razón de la masa puede ser escrita en términos de densidad “ ρ ” y de razón de longitud:

$$M_r = \rho_r Y_r = \rho_r L_r^3 \quad (2.84)$$

Así, la ecuación 2.83 de la segunda ley de Newton puede ser expresada de la siguiente manera:

$$F_r = \rho_r L_r^3 \frac{U_r}{T_r} \quad (2.85)$$

Remplazando en la ecuación 2.80 la razón del tiempo, la ecuación 2.85 de la razón de las fuerzas puede ser escrita como:

$$F_r = \rho_r L_r^2 U_r^2 \quad (2.86)$$

2.2.2. Análisis Dimensional

El análisis dimensional utiliza el principio de homogeneidad dimensional, que se postula de la siguiente manera: “Si una ecuación verdaderamente expresa una relación propia entre variables en un proceso físico, será dimensionalmente homogénea, esto es, que cada termino adicionado en la ecuación tendrá las mismas unidades”. Este principio es muy útil, ya que, provee una lógica para reducir el número y complejidad de las variables que influencia un proceso físico considerado. Esto es de gran ayuda en el planeamiento de los experimentos. Se recomienda el uso de ecuaciones adimensionales, para desarrollar la eficiencia computacional y chequear efectivamente la consistencia de los términos en las ecuaciones (Ettema, 2000). Existen varios métodos desarrollados para identificar las variables adimensionales, entre estos los más utilizados son el Teorema de Π de

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Buckingham, el Procedimiento de Rayleigh y el desarrollado por Ipsen. A continuación se presentan las principales variables adimensionales utilizadas en el modelamiento hidráulico:

- **Número de Reynolds**, relaciona los términos de inercia con los términos viscosos; de importancia si los valores de la fricción debida a la viscosidad cinemática “ ν ” son preponderantes.

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Viscosidad}} \quad (2.87)$$

- **Número de Froude**, relaciona los términos de inercia con los debidos a la gravedad; de importancia en los flujos a superficie libre, en donde por lo general, los términos debidos a las fuerzas de gravedad son muy influyentes.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Gravedad}} \quad (2.88)$$

- **Número de Mach**, relaciona los términos de inercia con los de compresibilidad del fluido (función de la velocidad del sonido “ Λ ”); de importancia en los flujos de fluidos compresibles.

$$Ma = \frac{U}{\Lambda} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Compresibilidad}} \quad (2.89)$$

- **Número de Weber**, relaciona los términos de inercia con los términos de tensión superficial (σ); de importancia en los flujos poco profundos a superficie libre.

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Tensión Superficial}} \quad (2.90)$$

- **Número de Euler**, relaciona los términos de las fuerzas de presión con las fuerzas debidas a la inercia del fluido; de importancia en los flujos a superficie libre y de conductos cerrados.

$$Eu = \frac{p}{\rho U^2} = \frac{\text{Presión}}{\text{Inercia}} \quad (2.91)$$

2.2.3. Condiciones Generales para el Diseño de Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo con Flujo a Superficie Libre

En los modelos hidráulicos de fondo fijo con flujo a superficie libre, las fronteras del modelo, así como el patrón de flujo conformado por las líneas de corriente,

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

deben satisfacer la similitud geométrica con el prototipo. Por otra parte, la semejanza de los campos de velocidad y aceleraciones del sistema, además deben satisfacer la semejanza del campo de fuerzas de inercia, de gravedad, de viscosidad y de presión; que para un flujo unidireccional a superficie libre gradualmente variado y no permanente, se resume a satisfacer los términos de la ecuación 2.74 de Sant-Venan. Si se considera que las fuerzas preponderantes son las de inercia y la de presión, se deduce que las condiciones de similitud a satisfacer son las de Euler y de Froude:

$$Fr_r = \frac{Fr_p}{Fr_m} = Constante \quad (2.92)$$

$$Eu_r = \frac{Eu_p}{Eu_m} = Constante \quad (2.93)$$

Por lo tanto la similitud de un flujo a superficie libre está dada por:

a) Similitud Geométrica:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} = Constante \quad (2.94)$$

b) Similitud Cinemática:

$$U_r = L_r^{1/2} = Constante \quad (2.95)$$

$$T_r = L_r^{1/2} = Constante \quad (2.96)$$

Como la aceleración de la gravedad en el prototipo y modelo es la misma, también se tiene que:

$$g_r = \frac{g_p}{g_m} = 1 \quad (2.97)$$

c) Similitud Dinámica:

$$F_r = L_r^3 = Constante \quad (2.98)$$

$$P_r = L_r = Constante \quad (2.99)$$

También el fluido en modelo y prototipo será el mismo, por lo tanto:

$$\rho_r = \frac{\rho_p}{\rho_m} = 1 \quad (2.100)$$

Adicionalmente a las similitudes anteriores, el flujo a superficie libre en casi la totalidad de aplicaciones está en régimen turbulento, por lo que es necesario que el modelo también lo sea, aun cuando no se cumpla con el grado (igual número de Reynolds en el modelo y en el prototipo), pero sí con las condiciones; es decir, las correspondientes a las de fronteras hidráulicamente lisas, hidráulicamente rugosas

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

(flujo sumamente turbulento) o de transición entre estas dos, según sea el caso. En la ingeniería el régimen de flujo (laminar o turbulento) se relaciona con el número de Reynolds, el mismo que al ser mayor a cierto valor se supone en régimen turbulento de flujo. A continuación se presentan algunos criterios para estimar si el régimen es turbulento (Sánchez, 1995):

a) Criterio de Ven Te Chow:

$$Re = \frac{u R_h}{\nu} > 500 \quad (2.101)$$

b) Criterio de F. M. Henderson:

$$Re^* = \frac{u^* K_s}{\nu} > 100 \quad (2.102)$$

c) Criterio de M. S. Yalin

$$Re^* = \frac{u^* K_s}{\nu} > 70 \quad (2.103)$$

Donde en las ecuaciones 2.101, 2.102 y 2.103, las variables tienen los siguientes significados:

$\langle u \rangle$ = Velocidad media de flujo.

R_h = Radio hidráulico de la sección, que en el caso de canales es el área de la sección transversal dividida para el perímetro mojado.

K_s = Tamaño de la rugosidad, equivalente al diámetro de arena uniformemente distribuida. En la Tabla 2.1, se muestran algunos valores de “ K_s ”.

u^* = Velocidad de corte: $\left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/2} = (gR_h S)^{1/2}$.

ν = Viscosidad cinemática.

τ = Esfuerzo Cortante.

S = Pendiente Hidráulica.

SUPERFICIE	K_s (mm)
Concreto con cimbra metálica plana y lisa:	0.15
Aplanado de cemento liso, con bordes y junta enrasadas:	0.30
Concreto lanzado sobre cimbra metálica lubricada con cuidado o acabado liso	0.40
Concreto aplanado semiliso	0.60

Tabla 2.1 Valores de K_s en milímetros para superficies de concreto y albañilería (Sánchez, 1995).

Por lo que respecta a la condición de fricción, ésta se establece mediante la escala de coeficientes de fricción que se deduce a partir del coeficiente de Chezy “ C ”, el mismo que puede expresarse en función del coeficiente adimensional de fricción “ f ”, el cual a su vez resulta ser función de “ Re ” y “ ε/R_h ” (rugosidad relativa). Así,

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

para la condición de flujo con fronteras hidráulicamente lisas, donde el valor de la rugosidad es $\varepsilon \ll \delta$, siendo “ δ ” el espesor de la capa límite; la fricción o resistencia al flujo depende básicamente de la fuerza de arrastre de superficie, donde $Re < 25000$ es de mayor importancia que “ ε/R_h ” y que, de acuerdo a los trabajos de Nikuradse, Colebrook y White (García, 2008):

$$f = \frac{0.223}{Re^{1/4}} \quad (2.104)$$

$$C = \frac{18.76}{Re^{1/8}} \quad (2.105)$$

Para flujo con fronteras hidráulicamente rugosas, donde $\varepsilon > \delta$, la resistencia al flujo depende de la fuerza de arrastre de forma, en la que el factor “ ε/R_h ” es de mayor importancia que “ Re ”. De esto resulta:

$$\frac{1}{f} = \frac{C}{\sqrt{8g}} = 2 \log \left(\frac{12R_h}{K_s} \right) \quad (2.106)$$

Si en lugar de expresar “ C ” en función de “ f ”, se hace en función del coeficiente de fricción “ n ” de Manning, resulta:

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (2.107)$$

La ecuación 2.107 es válida únicamente para flujo con fronteras hidráulicamente rugosas, en la Tabla 2.2 se presentan algunos valores de “ n ” relacionados con respecto a “ ε ”:

Condiciones de Superficie	Valor de ε (mm)	Valor de n
Lucita/Plástico		0.009
Madera Pulida	0.12-0.24	0.010-0.014
Madera Rugosa	0.24-0.48	0.011-0.015
Cemento Liso	0.32-0.72	0.011-0.013
Cemento Rugoso	0.99-1.98	0.013-0.016
Ladrillo	0.99-2.7	0.012-0.020
Tierra Lisa y Uniforme	1.5-18	0.020-0.030
Grava	20-100	0.022-0.035
Tierra con Yerba		0.025-0.040

Tabla 2.2 Valores de n y ε (Sánchez, 1995).

Finalmente, en la Tabla 2.3 se muestran las escalas de las longitudes más importantes cuando se aplican las condiciones de similitud a un modelo sin distorsión ($L_{xr} = L_{yr} = L_{zr} = L_r$), y considerando que el fluido a emplear en el modelo es el mismo que en el prototipo (agua), y que también la aceleración debida a la gravedad es igual en ambos sistemas:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

MAGNITUD FÍSICA	ESCALA
Área	$A_r = L_r^2$
Perímetro Mojado	$X_r = L_r$
Volumen	$Y_r = L_r^3$
Velocidad	$U_r = L_r^{1/2}$
Tiempo	$T_r = L_r^{1/2}$
Aceleración	$a_r = g_r = 1$
Pendiente	$S_r = 1$
Radio Hidráulico	$R_{hr} = L_r$
Gasto o Caudal	$Q_r = L_r^{5/2}$
Coefficiente de Fricción de Chezy	$C_r = 1$
Coefficiente de Fricción de Manning	$n_r = L_r^{1/6}$
Fuerzas	$F_r = L_r^3$
Presión	$P_r = L_r$

Tabla 2.3 Escalas para modelos sin distorsión para flujos a superficie libre (Sánchez, 1995).

2.3. Descripción de los Modelos Numéricos

2.3.1. Modelo Unidimensional HEC-RAS

HEC-RAS 4.1.0 (River Analysis System 4.1.0) es un programa cuya principal función es la delineación de planicies de inundación, es decir de calcular el nivel del agua en cada sección transversal en el tramo de un río o canal artificial. En la actual versión el flujo puede ser permanente o no permanente. Además de calcular los niveles de agua en cada sección, HEC-RAS tiene la capacidad de calcular otras variables hidráulicas como la socavación en los elementos de apoyo de un puente para el diseño de la cimentación de los mismos, así como el transporte de sedimentos y contaminantes. El ingreso de datos es sencillo porque las ventanas en entorno Windows permiten introducir los datos de manera ordenada. Este programa de cómputo es el sucesor del HEC-2, originalmente programado en FORTRAN IV por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (Us Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010). En la Figura 2.5 un esquema de las principales variables a tomar en cuenta en el modelamiento de ríos utilizando HEC-RAS:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

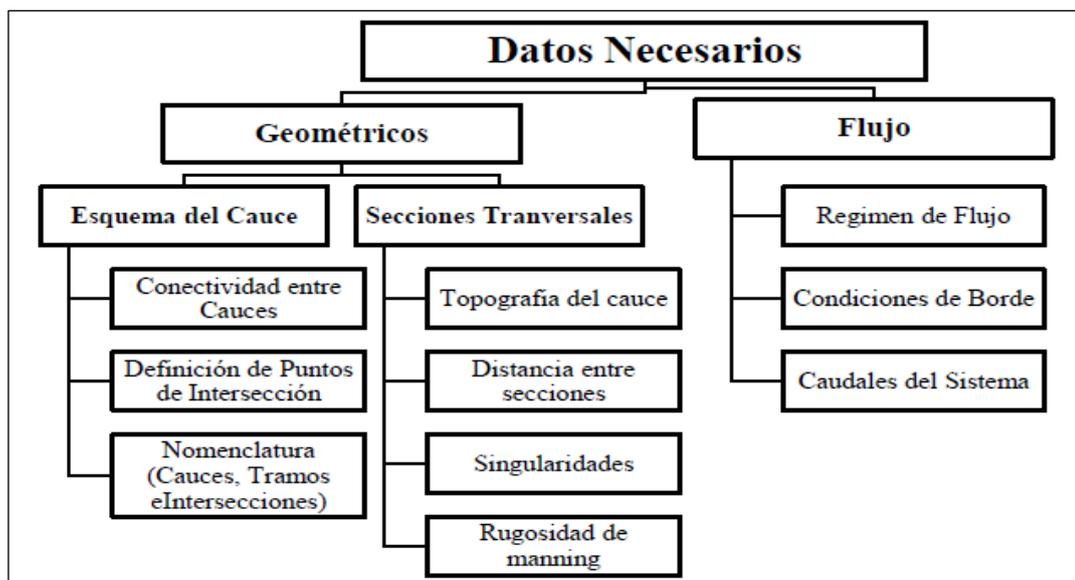


Figura 2.5 Variables principales para modelar ríos en HEC-RAS.

El HEC-RAS y su antecesor, el HEC-2, utilizan el método del paso estándar para el cálculo de los niveles de agua en cada sección transversal en el flujo estacionario. Para esto es necesario conocer las secciones transversales, la distancia entre las secciones transversales, el coeficiente de Manning en cada porción de cada sección transversal, el o los caudales de diseño y la condición de borde. Si el flujo es subcrítico, la condición de borde a usar es aguas abajo; si el flujo es supercrítico, la condición de borde a usar es aguas arriba. En un tramo sólo es necesario conocer una condición de borde, a menos que el flujo sea mixto. En este caso, se debe contar con una condición de borde aguas arriba y otra aguas abajo (Chaudhry, 2008). El método del paso estándar se basa en la resolución de la ecuación de energía:

$$z_2 + H_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = z_1 + H_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2.108)$$

Dónde: “ z_1 ” y “ z_2 ” es la elevación del fondo del canal; “ H_1 ” y “ H_2 ” es la profundidad del flujo; “ α_1 ” y “ α_2 ” el coeficiente de carga de la velocidad; “ V_1 ” y “ V_2 ” es la velocidad media de la sección; “ g ” la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y “ h_e ” la pérdida de carga. A continuación en la Figura 2.6 se representan los términos de la ecuación de la energía en un flujo:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

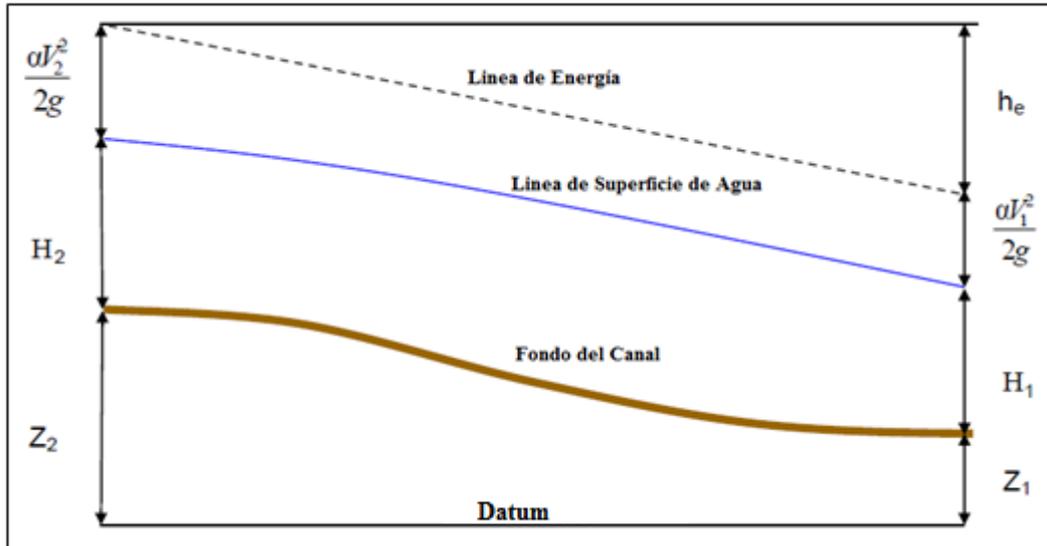


Figura 2.6 Términos de la ecuación de energía.

La pérdida de carga de energía es la suma de pérdida de carga por fricción y pérdidas por expansión-contracción (pérdidas locales):

$$h_e = h_{fe} + h_{coe} \quad (2.109)$$

Que se expresa como:

$$h_e = L\bar{S}_f + C_o \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2.110)$$

En la ecuación 2.110, “L” es la longitud ponderada, “ \bar{S}_f ” la pendiente representativa de la línea de energía entre dos secciones y “ C_o ” el coeficiente de pérdidas por expansión-contracción. La distancia ponderada se calcula con el uso de la siguiente ecuación 2.111:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (2.111)$$

Dónde: “ L_{lob} ”, “ L_{ch} ” y “ L_{rob} ” son las longitudes entre dos secciones para el flujo en la planicie de inundación izquierda, canal principal, y planicie de inundación derecha; “ \bar{Q}_{lob} ”, “ \bar{Q}_{ch} ” y “ \bar{Q}_{rob} ” el promedio aritmético de los caudales entre secciones para la planicie de inundación izquierda, canal principal, y planicie de inundación derecha, respectivamente.

Por lo tanto, las pérdidas por fricción son calculadas como el producto de “ \bar{S}_f ” y “L”, donde “ \bar{S}_f ” es la pendiente representativa de la línea de energía para un tramo de longitud “L” definida en la ecuación 2.111. La pendiente de la línea de energía

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

para cada sección transversal puede ser calculada por la fórmula de Manning de la siguiente manera:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{n Q}{A R_h^{2/3}} \right)^2 \quad (2.112)$$

Las pérdidas por contracción y expansión son calculadas a partir de un coeficiente que depende de la contracción o expansión local (se obtiene de valores experimentales tabulados) y considerando la variación de las velocidades en dos secciones del flujo:

$$h_{c_{oe}} = C_o \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2.113)$$

HEC-RAS asume que una contracción está ocurriendo cuando la altura de velocidad aguas abajo es mayor que su correspondiente aguas arriba; y viceversa, cuando la altura de velocidad aguas arriba es mayor que aguas abajo, el programa asume que está ocurriendo una expansión (Castelló, 2009).

2.3.2. Modelo Bidimensional IBER

IBER es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2012).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Las ecuaciones de aguas someras bidimensionales se obtienen promediando en profundidad las ecuaciones de Reynolds tridimensionales. En su derivación matemática se asume una distribución de presión hidrostática (se desprecia la presión dinámica debido al movimiento del fluido) y un campo de velocidad relativamente uniforme en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática equivale a despreciar las aceleraciones verticales del fluido, cumpliéndose de manera razonable en flujos con una extensión horizontal mucho mayor que su profundidad, lo cual es habitual tanto en hidráulica fluvial como en regiones costeras. La homogeneidad en profundidad del campo de velocidad depende de las condiciones locales de flujo. Algunas causas comunes que invalidan esta hipótesis son la presencia de obstáculos abruptos en el fondo o la curvatura excesiva de las líneas de corriente. Aún en estos casos las ecuaciones de aguas someras pueden utilizarse, teniendo siempre en cuenta a la hora de analizar los resultados que en las zonas en las que se rompen las hipótesis de partida se está introduciendo un error de modelización (Cea y otros, 2009).

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa (ecuación 2.114) y de momento en las dos direcciones horizontales (ecuación 2.115 y 2.116):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU_x}{\partial x} + \frac{\partial HU_y}{\partial y} = M_s \quad (2.114)$$

$$\frac{\partial HU_x}{\partial t} + \frac{\partial HU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial HU_x U_y}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{H^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \text{sen}\lambda U_y + \frac{\partial H\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (2.115)$$

$$\frac{\partial HU_y}{\partial t} + \frac{\partial HU_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial HU_y^2}{\partial y} = -gH \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{H^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + 2\Omega \text{sen}\lambda U_x + \frac{\partial H\tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial H\tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (2.116)$$

Donde “ H ” es el calado, “ U_x ”, “ U_y ” son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, “ g ” es la aceleración de la gravedad, “ Z_s ” es la elevación de la lámina libre, “ τ_s ” es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, “ τ_b ” es la fricción debido al rozamiento del fondo, “ ρ ” es la densidad del agua, “ Ω ” es la velocidad angular de rotación de la tierra, “ λ ” es la latitud del punto considerado, “ τ_{xx}^e ”, “ τ_{xy}^e ”, “ τ_{yy}^e ” son las tensiones tangenciales

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

efectivas horizontales, y “ M_s ”, “ M_x ”, “ M_y ” son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Las tensiones efectivas horizontales que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas incluyen los efectos de las tensiones viscosas, de las tensiones turbulentas y los términos de dispersión debido a la no homogeneidad en profundidad del perfil de velocidad:

$$\tau_{ij}^e = \tau_{vij} - \overline{u_i u_j} + D_{ij} \quad (2.117)$$

En la ecuación 2.117 “ τ_{vij} ” son las tensiones viscosas, $\overline{u_i u_j}$ son las tensiones turbulentas y “ D_{ij} ” son los términos de dispersión:

$$D_{ij} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} (U_i - \bar{u}_i)(U_j - \bar{u}_j) dz \quad (2.118)$$

Los términos de dispersión se desprecian en las ecuaciones 2D-SWE (hipótesis de perfil de velocidad uniforme en profundidad), debido a la imposibilidad de calcularlos de forma general. Su importancia será mayor cuanto menos uniforme sea el perfil de velocidad en profundidad. Una situación típica en la que estos términos pueden cobrar importancia es en canales con codos o radios de curvatura pequeños. En general, excepto cerca de las paredes, y excepto en flujo laminar, el orden de magnitud de las tensiones viscosas es mucho menor que el del resto de los términos que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas, y pueden por lo tanto también despreciarse. Las tensiones turbulentas son mucho más importantes, especialmente en zonas de recirculación, en donde la producción de turbulencia es elevada. En el caso de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales las tensiones turbulentas constituyen 3 nuevas incógnitas a calcular, que sumadas al calado y a las velocidades “ U_x ”, “ U_y ” produce un total de 6 incógnitas. Esto es lo que se conoce como problema de cierre de la turbulencia, porque es necesario resolver un conjunto de 3 ecuaciones con 6 incógnitas. Debido a ello, es necesario utilizar un modelo de turbulencia que permita calcular las tensiones turbulentas (Cea, 2010).

2.3.3. Modelo Tridimensional DELFT

El paquete de software DELFT3D ha sido desarrollado por el grupo de investigadores de Deltares y proporciona una plataforma para los cálculos de flujos en la costa, ríos y estuarios. El paquete puede simular flujos, transporte de sedimentos, las olas, la calidad del agua y la evolución morfológica (Hasselaar, 2012). DELFT3D-FLOW es una herramienta hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) de simulación que calcula el flujo no estacionario y fenómenos de transporte que resultan de las mareas, movimiento en ríos y forzamiento meteorológico en una forma rectangular o una red equipada límite curvilínea (Deltares, 2012a).

DELFT3D resuelve las ecuaciones no lineales en aguas poco profundas. Las ecuaciones de aguas someras (SWE por sus siglas en inglés: Shallow Water Equations) se obtienen promediando la ecuación de Navier-Stokes en la dirección vertical. Varias hipótesis se han hecho para derivar estas ecuaciones: la hipótesis principal es que la escala de longitud horizontal es mucho mayor que la escala de longitud vertical. Esta suposición reduce la ecuación de momento vertical a una ecuación de la presión hidrostática. Mientras que esto es una suposición válida en la resolución gruesa, el cuidado adicional se debe tomar en los casos de resoluciones muy finas, así como en aquellos casos en los que la interacción de flujo de fluido con la batimetría en la parte inferior es el proceso dominante (Deltares, 2012b). En estas regiones, la velocidad vertical juega un papel importante en la mezcla, e incluso en el transporte de la energía (Abouali, 2013).

La ecuación de continuidad promediada en la profundidad, con los términos de fuentes y sumideros, que resuelve DELFT3D se presenta a continuación:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}}\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial[(\eta+H)]U_x\sqrt{G_{ii}}}{\partial x_i} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}}\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial[(\eta+H)]U_y\sqrt{G_{jj}}}{\partial x_j} = M_s \quad (2.119)$$

Donde “ G_{ii} ” y “ G_{jj} ” son coeficientes usados para transformar de coordenadas curvilíneas asociadas a la curvatura de la tierra a una grilla rectangular, “ U_x ” y “ U_y ” son las velocidades horizontales integradas en la profundidad en el dominio de cálculo y “ M_s ” es un término fuente/sumidero. Las ecuaciones de momento consideradas en DELFT3D son:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{u}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{\partial u}{\partial x_i} - \frac{v}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial u}{\partial x_j} - \frac{\bar{w}}{\eta+H} \frac{u}{\partial \sigma_z} + \frac{v^2}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{jj}}}{\partial x_i} - \frac{uv}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{ii}}}{\partial x_j} + \zeta v + \tau_{xx}^e + M_x - \frac{P_x}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{1}{(\eta+H)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma_z} \left(v \frac{\partial u}{\partial \sigma_z} \right) \quad (2.120)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{u}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{\partial v}{\partial x_i} - \frac{v}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial v}{\partial x_j} - \frac{\bar{w}}{\eta+H} \frac{v}{\partial \sigma_z} - \frac{uv}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{jj}}}{\partial x_i} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{ii}}}{\partial x_j} + \zeta u + \tau_{yy}^e + M_y - \frac{P_y}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{1}{(\eta+H)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma_z} \left(v \frac{\partial v}{\partial \sigma_z} \right) \quad (2.121)$$

$$w = \bar{w} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \left[u\sqrt{G_{jj}} \left(\sigma_z \frac{\partial H}{\partial x_i} + \frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right) + v\sqrt{G_{ii}} \left(\sigma_z \frac{\partial H}{\partial x_j} + \frac{\partial \eta}{\partial x_j} \right) \right] + \left(\sigma_z \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \quad (2.122)$$

Donde en las ecuaciones 2.120, 2.121 y 2.122 “u”, “v” y “w” son las velocidades en un punto del plano cartesiano, “ \bar{w} ” la velocidad vertical relativa al plano sigma, “ σ_z ” es la coordenada sigma para representar la profundidad del flujo, “ ζ ” término que relaciona la fuerza de coriolis, “ τ_{xx}^e ” y “ τ_{yy}^e ” un balance de las tensiones efectivas horizontales, “ M_x ” y “ M_y ” representan términos fuente/sumideros en el plano y “ ν ” la viscosidad cinemática del flujo. Finalmente “ P_x ” y “ P_y ” definen los términos de presión que aparecen en la ecuación de momento 2.120 y 2.121:

$$\frac{P_x}{\sqrt{G_{ii}}} = \frac{g}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x_i} \quad (2.123)$$

$$\frac{P_y}{\sqrt{G_{jj}}} = \frac{g}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial \eta}{\partial x_j} + \frac{1}{\sqrt{G_{jj}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial x_j} \quad (2.124)$$

Donde “ P_{atm} ” representa la presión atmosférica del lugar de referencia. Las tensiones efectivas horizontales se resuelven reduciéndolas por operadores de Laplace:

$$\tau_{xx}^e = \nu \left(\frac{1}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial^2 v}{\partial x_j^2} \right) \quad (2.125)$$

$$\tau_{yy}^e = \nu \left(\frac{1}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{ii}\sqrt{G_{jj}}}} \frac{\partial^2 u}{\partial x_j^2} \right) \quad (2.126)$$

Como se ha visto, en cualquier modelo hidrodinámico, incluyendo en DELFT3D, hay varias variables que son simuladas, que pueden incluir tres componentes de la velocidad, la presión, la salinidad y la temperatura. En general, pueden dividirse en las variables de vectores, tales como la velocidad, y las variables escalares, tales como la presión, la salinidad y la temperatura. Dependiendo de cómo se organizan estas diferentes variables en una cuadrícula, uno puede tener diferentes tipos de

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

mallas, conocido como tipo A, B, C, D, y E (Griffies y otros, 2000). Delft3D utiliza una malla “C”, también conocida como una rejilla escalonada (Figura 2.7). En una rejilla escalonada, los valores escalares se almacenan en el centro de la celda, y diferentes componentes de las variables del vector (por lo general la velocidad) se almacenan en el medio de las caras de las células (Deltares, 2012c).

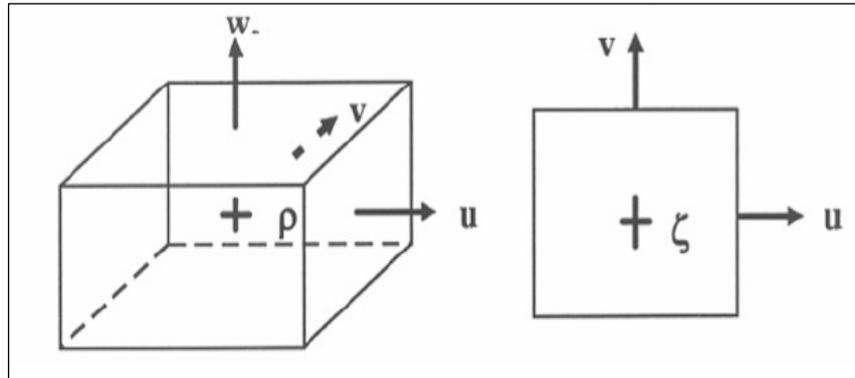


Figura 2.7 Ejemplo de una rejilla escalonada.

La coordenada vertical sigma (σ_z) se designa de tal forma que $\sigma_z = -1$ en el fondo del canal y $\sigma_z = 0$ en la superficie libre (Figura 2.8). La transformación a una coordenada cartesiana “z” se realiza de la siguiente manera:

$$\sigma_z = \frac{z-H}{\eta+H} \quad (2.127)$$

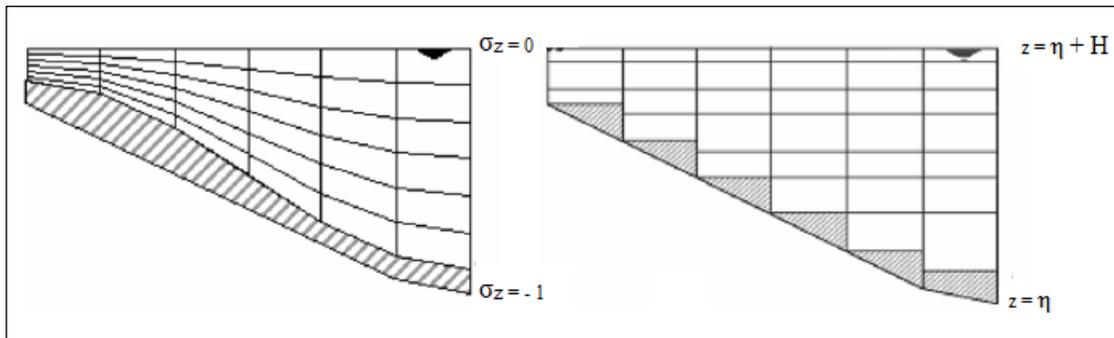


Figura 2.8 Esquema de una coordenada vertical sigma (Lesser, 2009).

2.4. Motivación

Los fenómenos en flujos a superficie libre que ocurren en la naturaleza son de una complejidad tal que es imposible resolverlos con métodos analíticos exactos. Esto hace que sea necesario y conveniente desarrollar modelos y simulaciones con la utilización de técnicas experimentales y numéricas que permitan la obtención de soluciones prácticas aplicadas a problemas de ingeniería. La predicción de las variables de flujo para diferentes períodos de retorno tiene gran importancia

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

científica e ingenieril, el desarrollo de modelos y simulaciones hidrodinámicas con precisión adecuada permitirá la correcta planificación de obras públicas y propiedades privadas (vertederos, puentes, obras de protección, etc.) de indudable valor.

Inevitablemente, los supuestos simplificadores, el empirismo y otros componentes sensatos son necesarios para que la formulación del comportamiento físico de la naturaleza sea de uso práctico en la ingeniería. Se trata de un tema común en múltiples desarrollos de formulación de la dinámica de sedimentos y movimiento del agua en ríos (Ettema y Mutel, 2004).

El uso de métodos analíticos en la solución de fenómenos de mecánica de los fluidos está basado en las leyes de conservación de masa, momento y energía; y por lo tanto, al menos potencialmente, estas leyes tienen mayor validez general que las relaciones estrictamente empíricas. Las leyes de conservación están expresadas por ecuaciones exactas que describen todos los detalles del movimiento de un fluido. Por la dificultad de resolver estas ecuaciones teóricas y ya que en la mayoría de casos en la ingeniería no interesan los detalles en las fluctuaciones del movimiento, un enfoque estadístico también fue tomado (en primer lugar sugerido por Osborne Reynolds) y las ecuaciones fueron promediadas sobre la escala de tiempo. Las ecuaciones resultantes describen la distribución del promedio de la velocidad, presión, temperatura y otras variables en el flujo y así se obtuvieron las cantidades de mayor interés para la ingeniería. Desafortunadamente, el proceso de promediar las variables ha creado un nuevo problema: ahora las ecuaciones no constituyen un sistema cerrado ya que contienen nuevas incógnitas que representan el transporte medio de momento, calor y masa por el movimiento turbulento. El sistema puede ser cerrado solo con la ayuda de aportes empíricos, así los métodos de cálculo en las ecuaciones de flujo promediado son semi-empíricos (Wolfgang, 1993).

También el uso de modelos físicos es de fundamental importancia en el estudio de las obras hidráulicas. Sin embargo, los modelos no reproducen exactamente todos los procesos envueltos en las variables de un flujo. Los defectos en los modelos son usualmente llamados “Efectos de Escala” o “Efectos de Laboratorio”. Los efectos de escala demuestran la incompleta solución de un conjunto de criterios de similitud en una situación de flujo particular. Estos efectos de escala aumentan

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

severamente con el incremento de la relación del tamaño de prototipo a modelo o con el número de procesos físicos que se desea replicar simultáneamente. Los efectos de laboratorio surgen por limitaciones en espacio, constructibilidad del modelo o instrumentación que impide mediciones con precisión. Los defectos se pueden incrementar por la incorrecta réplica de las condiciones de contorno. Sin embargo, mejoras significativas han sido hechas en el equipamiento de laboratorios y metodología de modelamiento. Muchas de estas mejoras se han facilitado por el uso de computadoras e instrumentación electrónica auxiliar (Ettema, 2000).

2.5. Objetivos

El Objetivo General de esta Tesis de Maestría es el estudio de las características hidrodinámicas en cauces naturales a través del uso y contraste de modelos numéricos y experimentales; se va a considerar el escenario de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para predecir el comportamiento de este tipo de flujos en eventos de crecida. Es así que, mediante la aplicación de esquemas numéricos y un modelo físico ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba se busca caracterizar las variables de mayor importancia que afectan el comportamiento de estos elementos de vital importancia en los sistemas fluviales. De este Objetivo General se desprenden los siguientes Objetivos Específicos que permitirán llevar el análisis con éxito:

- Formular y resolver las ecuaciones que rigen en los procesos hidráulicos a superficie libre suponiendo flujos unidimensional, bidimensional y tridimensional.
- Exponer las variables a ser tomadas en cuenta para la modelación física de un flujo a superficie libre y fondo fijo. Demostrar los criterios de similitud que serán necesarios para garantizar un correcto funcionamiento de la física del modelo a la escala considerada.
- Mediante el uso de instrumental adecuado medir y procesar los datos de las variables del flujo en el modelo físico construido por el equipo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Validar, calibrar y analizar la sensibilidad de las variables en los modelos numéricos hidrodinámicos HEC-RAS (1D), IBER (2D) y DELF3D (3D)

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

respecto a los datos medidos en el modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.

- Comparación y análisis de los resultados obtenidos a través de los esquemas numéricos hidrodinámicos HEC-RAS (1D), IBER (2D) y DELF3D (3D), aplicados en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.
- Evaluar los efectos de escala presentes en estudios de confluencias fluviales en laboratorio aplicando los resultados obtenidos en los modelos numéricos validados.
- Delinear trabajos futuros en la hidráulica de cauces naturales agregando variables no consideradas en este trabajo, como lo son la dinámica de sedimentos y el transporte de contaminantes.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN FÍSICA EN UN TRAMO DEL RÍO SUQUÍA QUE INCLUYE LA CONFLUENCIA CON EL ARROYO LA CAÑADA

3. Modelación Física en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada

El modelo físico hidráulico Suquía-Cañada es de tipo tridimensional con semejanza de Froude ejecutado en escala no distorsionada de longitudes $L=1:40$, permite analizar el tramo del río Suquía comprendido entre los puentes Centenario y Avellaneda, de aproximadamente 1000 metros de longitud, con un ancho efectivo variable de 70 a 280 metros en prototipo, incluyendo la desembocadura del arroyo La Cañada y el parque Las Heras localizado aguas abajo del mencionado arroyo. Las obras modeladas se encuentran incluidas dentro del proyecto de sistematización del cauce del río Suquía, el cual comprende la reparación y readecuación del cauce principal y su llanura de inundación. A continuación en la Figura 3.1 se presenta el modelo físico ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba:



Figura 3.1 Modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba).

El modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía fue construido con el objetivo principal de examinar el desempeño hidráulico de las obras de sistematización para la revalorización del arroyo La Cañada y el río Suquía; se analizaron los procesos de disipación de la energía para verificar el impacto que el flujo pueda tener en las obras construidas. Se estudiaron las características del flujo en dos períodos de recurrencia, de 10 y 25 años, que se consideraron de importancia en la planificación de inundaciones en la confluencia.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

El 12 de Marzo del 2000 ocurrió un evento que fue asociado a un período de retorno de 25 años (Castelló y otros, 2001), compatible a un caudal de 1003 m³/seg en el sector de la confluencia del río Suquía con el arroyo La Cañada (Reyna, 1999); dicho evento fue relevado por personal de la DiPAS (hoy Secretaría del Agua y Ambiente) y de la Universidad Nacional de Córdoba, poniendo en manifiesto la fuerza y velocidad del flujo que produjo varios daños de la propiedad privada y pública con un calado de agua de aproximadamente seis metros de profundidad en la confluencia, de ahí la importancia de estudiar los distintos eventos para la planificación contra catástrofes por inundaciones.

La fuerza que domina la hidráulica del modelo Suquía-Cañada es la gravedad, siendo las otras fuerzas, tales como las debidas a la viscosidad, capilaridad y elasticidad despreciables en sus efectos, siempre y cuando, el flujo entre prototipo y modelo estén en el mismo régimen y el espesor del calado de flujo en el modelo sea suficiente para despreciar efectos debido a la tensión superficial. Por lo tanto, teniendo en cuenta la disponibilidad de espacio en el laboratorio, se ha desarrollado un modelo físico tridimensional sin distorsión L=1:40 (escala horizontal igual a la escala vertical), siguiendo la ley de semejanza de Froude que satisface las características principales del modelo, respetando la condición de similitud dinámica para el caso de flujo en modelo y prototipo. A continuación en la Figura 3.2 se presenta un esquema del modelo hidráulico descrito y en la Tabla 3.1, se presenta las relaciones de escala entre prototipo y modelo; esto en base a las consideraciones anteriormente explicadas y a lo desarrollado en la sección 2.2:

MAGNITUD FÍSICA	ESCALA	MAGNITUD
Longitud	L_r	40
Área	$A_r = L_r^2$	1600
Perímetro Mojado	$X_r = L_r$	40
Volumen	$Y_r = L_r^3$	64000
Velocidad	$U_r = L_r^{1/2}$	6.324
Tiempo	$T_r = L_r^{1/2}$	6.324
Aceleración	$a_r = g_r = 1$	1
Pendiente	$S_r = 1$	1
Radio Hidráulico	$R_{hr} = L_r$	40
Gasto o Caudal	$Q_r = L_r^{5/2}$	10119.289
Coefficiente de Fricción de Chezy	$C_r = 1$	1
Coefficiente de Fricción de Manning	$n_r = L_r^{1/6}$	1.849
Fuerzas	$F_r = L_r^3$	64000
Presión	$P_r = L_r$	40

Tabla 3.1 Relaciones de escala entre prototipo y modelo de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

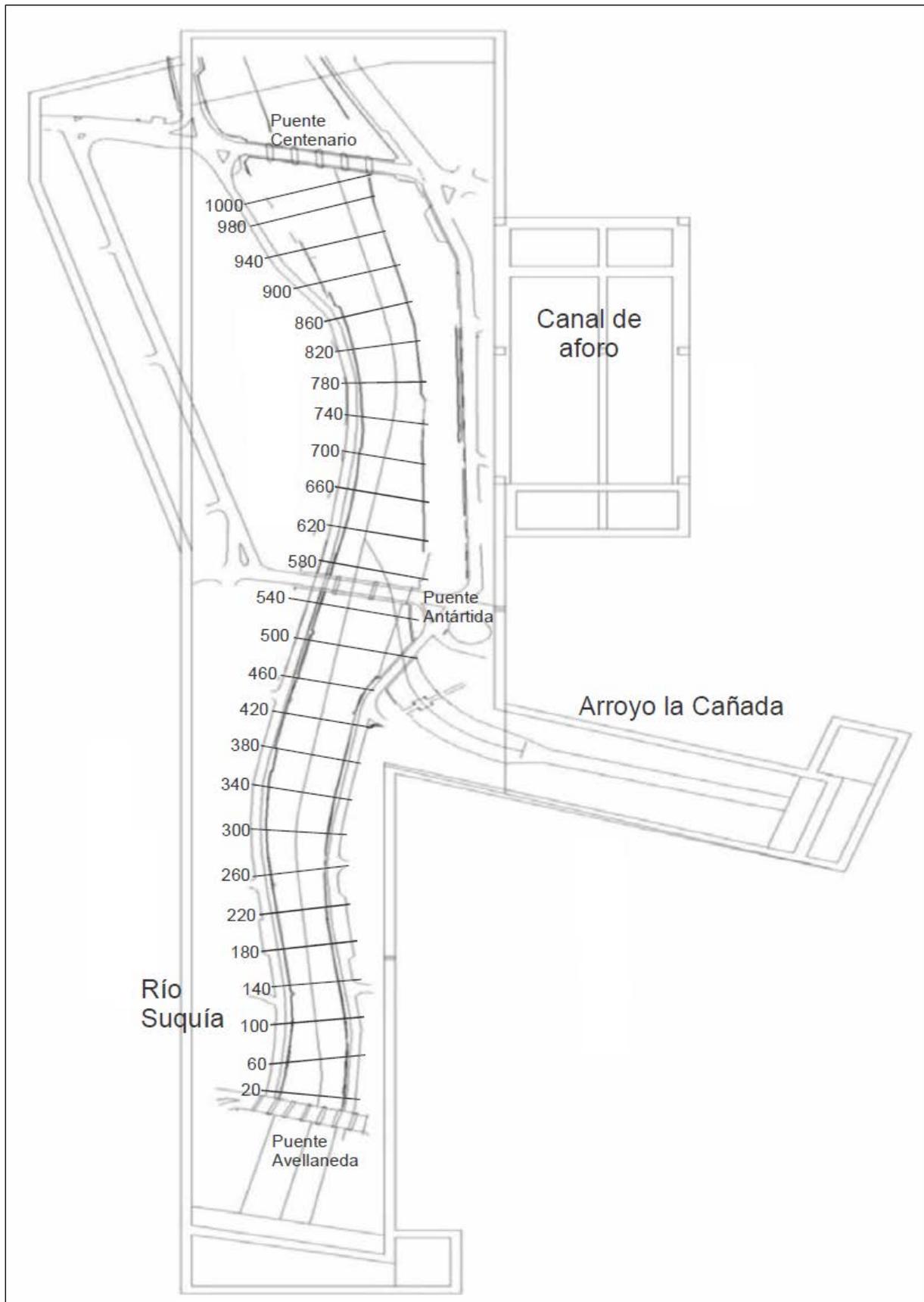


Figura 3.2 Esquema general del Modelo Hidráulico Suquía- La Cañada. (Fuente: Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba).

3.1. Técnicas Experimentales

En esta sección se presentan las técnicas que se utilizaron para obtener los registros de las variables de flujo en el modelo físico Suquía-Cañada, principalmente valores de velocidad y profundidad. En la caracterización de flujos turbulentos someros se requiere calcular con precisión los parámetros de la turbulencia, tales como velocidades medias, energía cinética turbulenta, tensiones de Reynolds, velocidades convectivas de las estructuras turbulentas, tasa de disipación de la energía cinética turbulenta y escalas de longitud representativas de la turbulencia del flujo (escalas de los grandes vórtices y las escalas de Taylor y de Kolmogorov). Modernas técnicas de medición como la del velocímetro acústico doppler y la velocimetría por seguimiento de partículas permiten una buena caracterización experimental de la turbulencia con alta resolución espacial y temporal (Herrero, 2011).

Los datos de las mediciones realizadas con la técnica de Tubo Pitot y Velocímetro Acústico Doppler, correspondientes al periodo de retorno de 10 años y se obtuvieron del trabajo de Gizzi (2012). Se realizaron campañas para caracterizar las variables de interés para el periodo de retorno de 25 años utilizando la técnica de PTV (Particle Tracking Velocimetry) en el modelo físico Suquía-Cañada. A continuación se describe brevemente la técnica experimental de la Velocimetría por Seguimiento de Partículas que se implementó en esta investigación.

3.1.1. Velocimetría por Seguimiento de Partículas – PTV

El método de la velocimetría por seguimiento de partículas (PTV - Particle Tracking Velocimetry) es una forma de medición no intrusiva de donde se obtiene el campo de velocidades superficiales instantáneas del flujo (velocidades bidimensionales), con alta resolución temporal y espacial. La técnica se basa en determinar el desplazamiento de las partículas que son sembradas en el flujo (asumiendo que las partículas se desplazan a la velocidad del flujo) a partir del análisis de imágenes digitales registradas a intervalos constantes de tiempo " Δt ". Se utiliza un marco de referencia Lagrangiano y permite la determinación del campo de velocidades basándose en la determinación del desplazamiento de cada partícula trazadora individual (Cenedese y Querzoli, 1997).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

La técnica se basa en la localización de cada partícula en dos imágenes secuenciales, y con el tiempo entre las imágenes se determina el vector velocidad. La técnica de velocimetría por seguimiento de partículas permite la medición del campo de velocidades instantáneas en el plano, esto en función de la cantidad de partículas detectadas. La dificultad de la técnica del PTV se encuentra en la identificación de cada partícula individualmente entre imágenes consecutivas cuando hay muchas partículas sembradas en el flujo y se produce su aglomeración.

Se han propuesto una variedad de técnicas para el procesamiento de los resultados de PTV que básicamente tienen 4 etapas principales: información de entrada, proceso de cálculo principal, filtrado de los resultados y post-procesamiento. Dentro del proceso principal se realiza el pre-procesamiento de la imagen (eliminación de ruido), la detección de las partículas y la aplicación de una técnica de correlación a los fines de encontrar el vector de velocidad correspondiente a cada partícula. En la identificación de las partículas normalmente se emplean dos metodologías: a) nivel de umbral, o b) máscara Gaussiana. El método basado en el umbral de intensidad consiste en elegir un nivel de corte o umbral en la matriz de intensidades de la imagen de tal forma que todos los píxeles que presenten niveles que superen o se encuentren por debajo, dependiendo del caso, de ese valor corresponden a partículas o fondo de la imagen. La segunda metodología consiste en correlacionar una sub-matriz de intensidad, centrada en cada uno de los píxeles que componen la imagen, con un kernel o máscara Gaussiana. Cuando una partícula se registra en una matriz del sensor de la cámara (CCD), su distribución de intensidad alrededor del centro de la partícula es Gaussiana con una desviación estándar igual al diámetro medio de las partículas. Usando esta observación es posible detectar la posición de la partícula con exactitud de subpíxel. Para esto se correlaciona la distribución Gaussiana alrededor del elemento central con la imagen en grises del campo del flujo y si la correlación es mayor a un cierto nivel definido previamente, la misma indica la presencia de una partícula (Herrero, 2011). Para la correspondencia entre la posición de dos partículas en dos imágenes sucesivas se han propuesto una variedad de algoritmos, basados en los métodos de relajación (Ohmi y Dao, 1998) y el tensor del gradiente de la velocidad (Ishikawa y otros, 2000). Con respecto a la eliminación de vectores erróneos, el método utiliza filtros de correlación y filtros de dirección-magnitud.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

La elección de las partículas a sembrar es una parte importante de la técnica ya que éstas deben tener características muy específicas en cuanto a: La densidad (0.9 - 0.97 g/cm³ para partículas flotantes, el color (que sean visibles), el tamaño (se recomienda tengan un diámetro mínimo en la imagen de entre 3 a 4 píxeles), y la forma (uniforme para evitar errores en el cálculo de velocidad inducidos por la rotación de las partículas). En la Figura 3.3 se presentan las partículas seleccionadas que consisten en una esfera de polietileno expandido con un tornillo de hierro para aumentar su densidad:



Figura 3.3 Partículas seleccionadas para implementar la técnica de PTV.

Además de la puesta a punto del modelo físico, el proceso que se llevó a cabo para caracterizar el flujo con la técnica de PTV se resume de la siguiente manera: 1) Se definió la zona del flujo a caracterizar, se deben realizar los experimentos bajo una iluminación uniforme y difusa de forma tal de garantizar una correcta identificación de las partículas y evitar que se generen reflejos y sombras por lo que es recomendable realizar el experimento en un día nublado en el caso de tener el escenario experimental a la intemperie. 2) Se coloca la cámara apuntando al área por donde pasarán las partículas; se debe tener cuidado que el ángulo formado por la vertical de la lente y el sector analizado sea lo más cercano a 90°. Se deben rectificar las imágenes registradas para obtener resultados válidos, para lo cual se localizaron puntos fijos para formar una cuadrícula (Figura 3.4); con las medidas de la cuadrícula se obtienen los índices de rectificación al comparar el área que se registró en la grabación respecto al área real. 3) Sembrado de partículas de manera

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

uniforme, también se tomará en cuenta el tiempo de filmación suficiente para obtener la información completa del recorrido de cada una de las partículas luego de lo cual se realizará la recolección de las mismas, que si se encuentra en buenas condiciones podrán volver a ser usadas en otro ensayo. 4) Extracción y procesamiento de las imágenes; para este análisis se utilizó el código escrito en el software Matlab denominado PTVLab (Patalano y otros, 2013), en este programa, que fue desarrollado por el grupo de trabajo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, se realiza el pre-procesamiento de las imágenes, detección de partículas, determinación por correlación cruzada de las trayectorias de las partículas para lo cual es necesario aplicar filtros sobre las imágenes y a través de la metodología previamente descrita se obtienen los campos de velocidad media en la superficie del flujo.

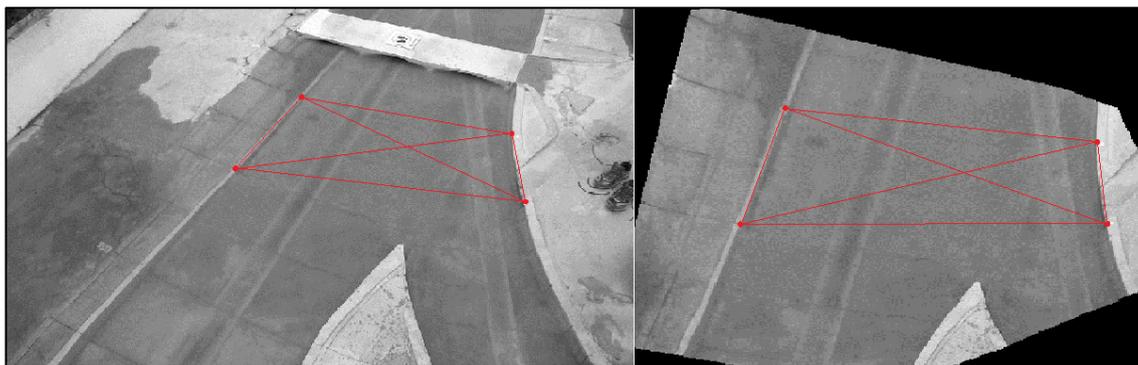


Figura 3.4 A la izquierda la imagen en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada con la cuadrícula para la rectificación y a la derecha la imagen rectificada.

Además de obtener la magnitud de la velocidad media en el plano superficial del flujo, a través del post-procesamiento de las imágenes, usando la herramienta PTVLab, se puede obtener otros resultados interesantes como el que se muestra en la Figura 3.5 que representa las trayectorias de las partículas registradas, en la Figura 3.6 los vectores que representan la velocidad instantánea de las partículas y en la Figura 3.7 el campo de velocidad media en el plano de la superficie del flujo.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

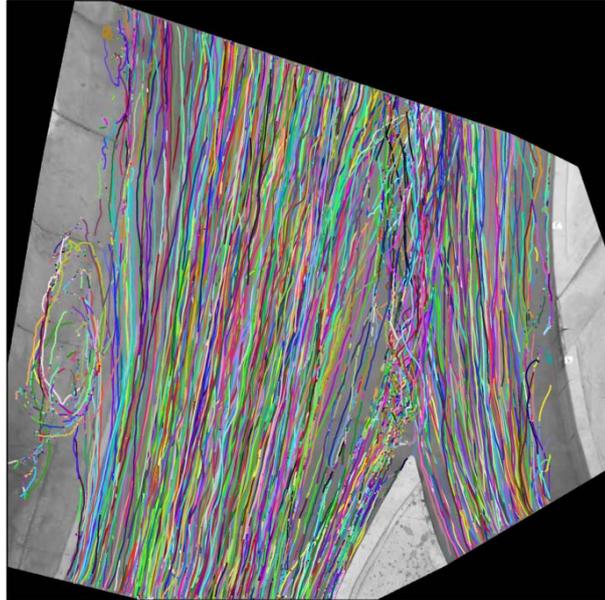


Figura 3.5 Trayectoria de las partículas en el ensayo con PTV realizado en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada.

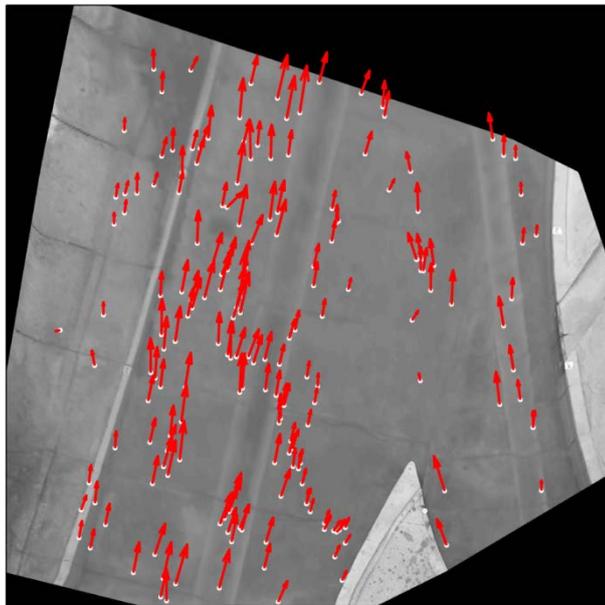


Figura 3.6 Vectores que representan la velocidad instantánea de las partículas en el ensayo con PTV realizado en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

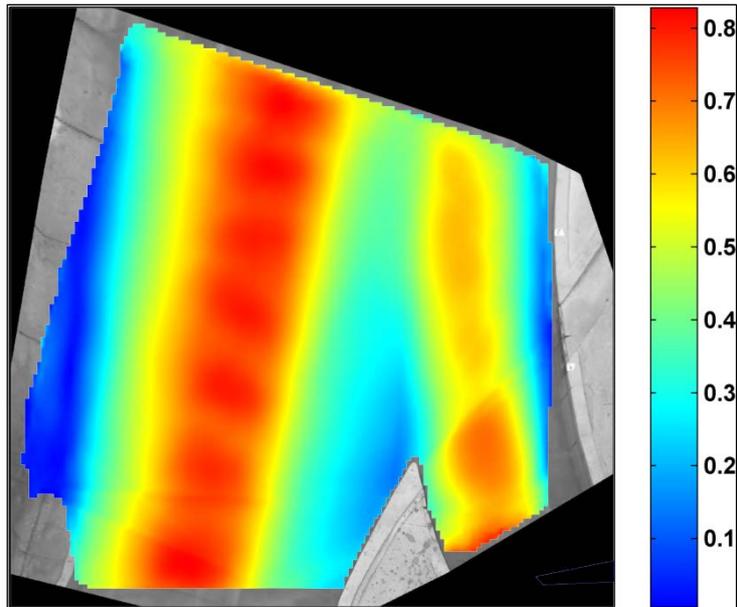


Figura 3.7 Campo de velocidad media en el plano de la superficie del flujo en el tramo de la confluencia del modelo físico Suquía-Cañada obtenidos a través de los ensayos con PTV.

3.2. Condiciones de Flujo ensayadas

Las condiciones de flujo consideradas en este estudio corresponden a periodos de retorno de 10 y 25 años; el caudal para el tramo del río Suquía: $Q_{10}=454 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=675 \text{ m}^3/\text{seg}$, el caudal para el tramo del arroyo La Cañada $Q_{10}=210 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=328 \text{ m}^3/\text{seg}$. El caudal total en la confluencia para los escenarios considerados fue de $Q_{10}=664 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=1003 \text{ m}^3/\text{seg}$; en la Figura 3.8 se presenta el análisis de frecuencia obtenido en estudios previos (Reyna, 1999).

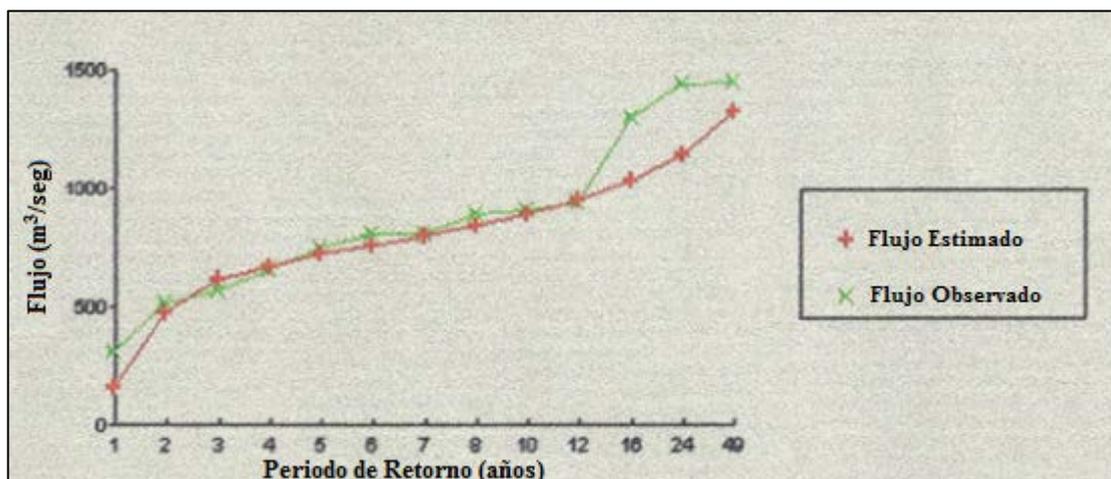


Figura 3.8 Análisis de frecuencia aguas abajo de la confluencia del río Suquía con el arroyo La Cañada. (Reyna, 1999)

Las condiciones de contorno para la modelación hidráulica han sido calibradas, aguas abajo de la confluencia se ha calculado un valor de altura del pelo de agua

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

correspondiente a los periodos de retorno de 10 y 25 años de $H_{10}=5.09$ metros y $H_{25}=6.28$ metros, y la cota de fondo de 382.25 m.s.n.m. Las condiciones de contorno aguas arriba de la confluencia, tanto en el río Suquía como en el arroyo La Cañada, es el correspondiente a la pendiente normal de fondo: $S=0.002$.

Respecto a las técnicas experimentales, se utilizó limnímetros diferenciales para obtener la profundidad a lo largo del modelo hidráulico para las dos condiciones ensayadas. Con la técnica del ADV y Tubo Pitot se ensayó el periodo de retorno de 10 años entre la progresiva 0 a 1000 metros del río Suquía (Figura 3.9 y Figura 3.10), en un total de 57 y 41 secciones, respectivamente. Para el periodo de retorno de 25 años se usó la técnica de PTV (Figura 3.11) entre las progresivas 240 a 980 en 35 secciones transversales. Para la corrección de la velocidad media superficial de flujo obtenida con la técnica de PTV, se aplicó un factor de corrección de 0.7, obtenido de estudios experimentales previos (Figura 3.12) realizados por Hyun y otros (2003) que recomiendan tomar este factor en un rango de 0.7 a 0.9.



Figura 3.9 Mediciones de Velocidad con ADV (T=10 años) (Gizzi, 2012).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

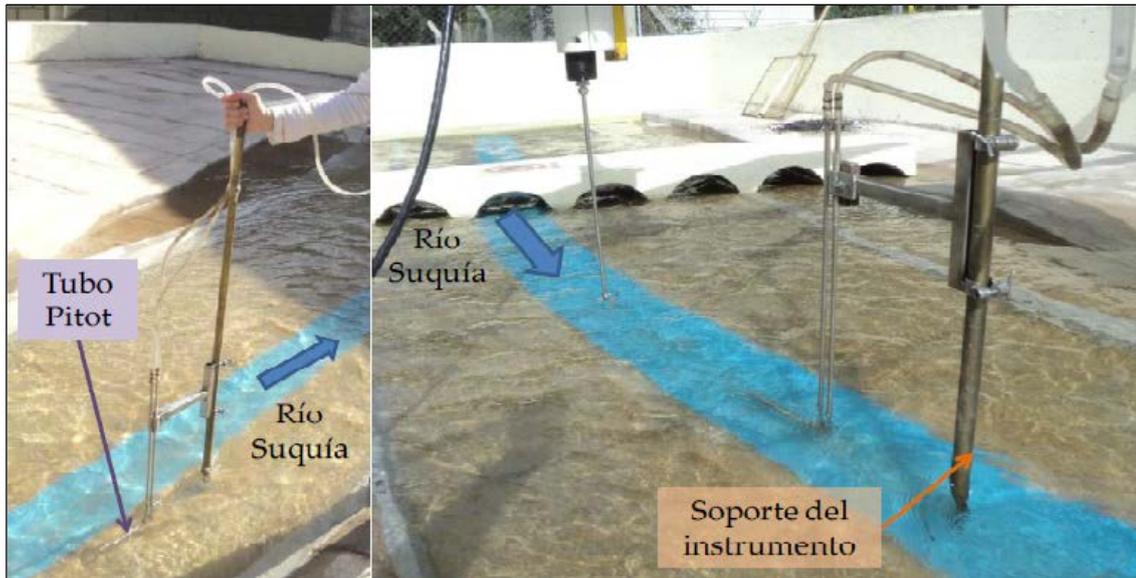


Figura 3.10 Mediciones de Velocidad con Tubo Pitot (T=10 años) (Gizzi, 2012).



Figura 3.11 Mediciones de Velocidad con PTV (T=25 años).

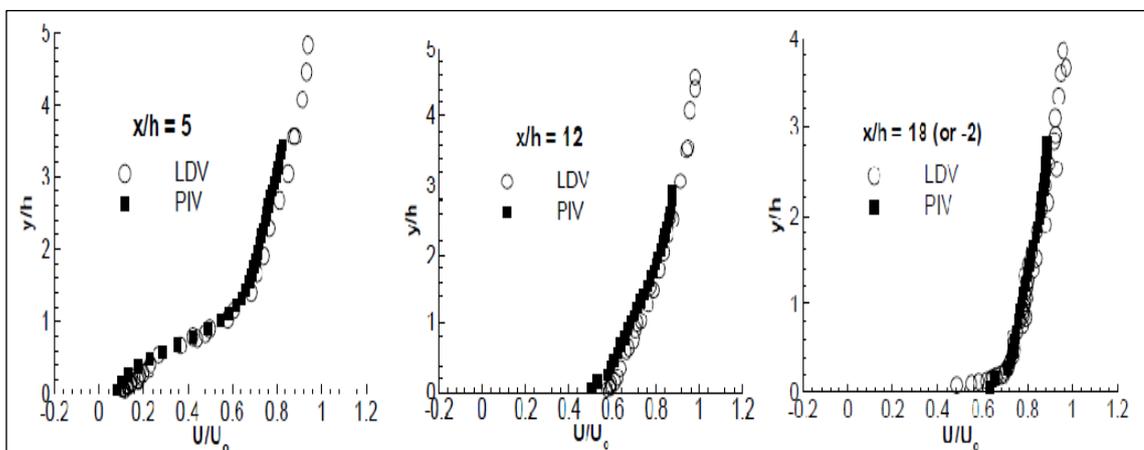


Figura 3.12 Resultados experimentales de PIV (Hyun y otros, 2003).

3.3. Resultados

A continuación se presentarán los resultados obtenidos en el modelo físico con las técnicas experimentales presentadas, en la Figura 3.13 se presenta la profundidad de flujo para un periodo de retorno de 10 años y en la Figura 3.14 las respectivas cotas de fondo y superficie libre a lo largo del río Suquía:

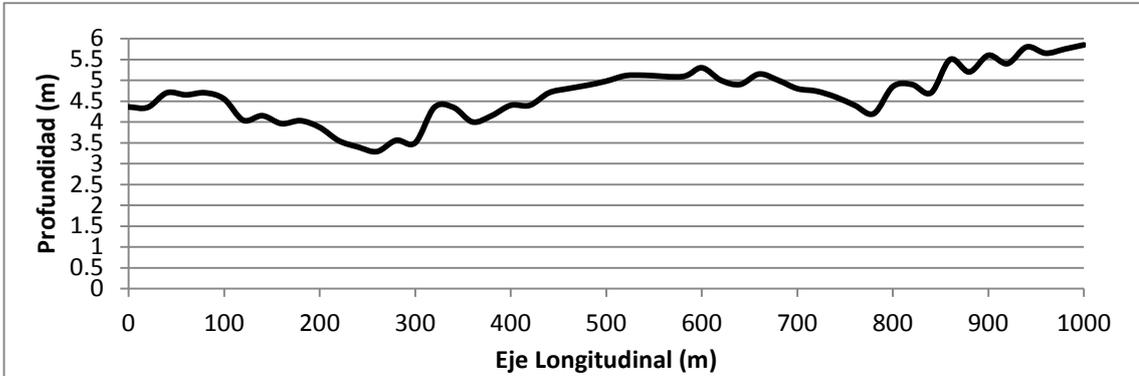


Figura 3.13 Profundidad de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 10 años de período de retorno.

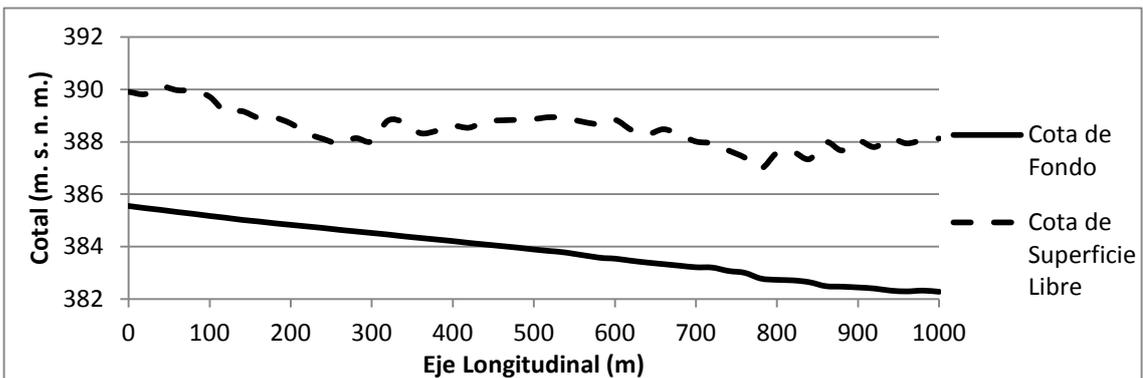


Figura 3.14 Cota de Fondo y de Superficie de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 10 años de período de retorno.

En las siguientes Figura 3.15 y Figura 3.16 se presenta los resultados de profundidad de agua para un período de retorno de 25 años:

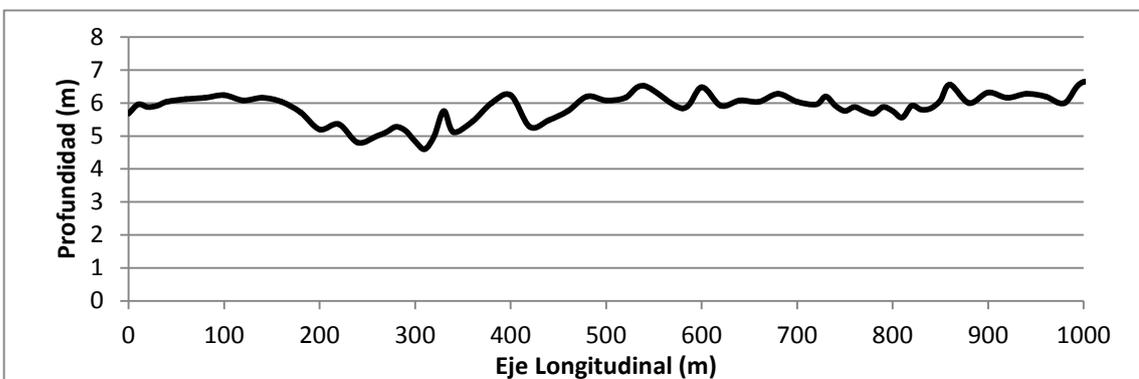


Figura 3.15 Profundidad de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 25 años de período de retorno.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

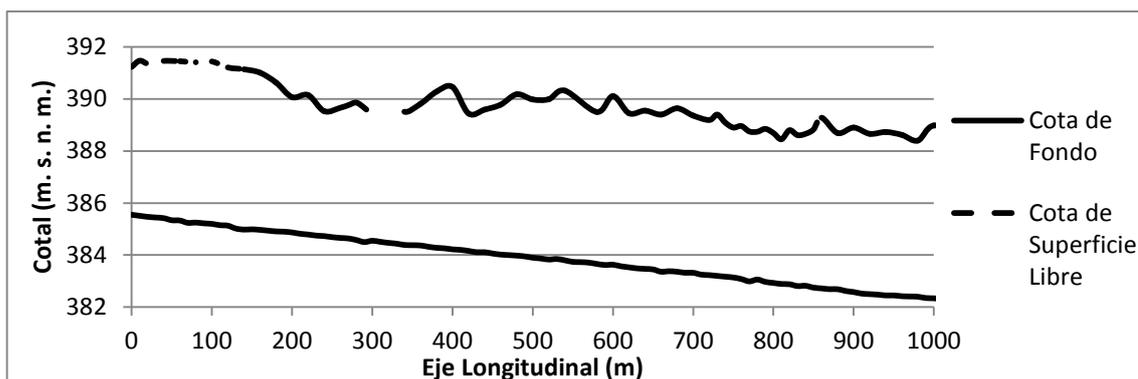


Figura 3.16 Cota de Fondo y de Superficie de Agua a lo largo del eje del río Suquía medido en un ensayo de 25 años de período de retorno.

La profundidad máxima medida en el modelo físico en el escenario de un periodo de retorno de 10 años corresponde a 5.85 metros en prototipo, la mínima de 3.29 metros y la profundidad media a lo largo del eje del río Suquía es de 4.65 metros. Para el escenario de 25 años la máxima profundidad medida fue de 6.84 metros en prototipo, una mínima de 4.6 metros y la profundidad media a lo largo del eje de 5.87 metros.

A continuación en la Figura 3.17 se presenta los valores de velocidades medidas con la técnica del Tubo de Pitot, fueron medidos 5 puntos en cada sección transversal considerada; incluyendo siempre un punto en el eje del río Suquía. En la Figura 3.18 se presentan las velocidades medidas con ADV a lo largo del eje del río Suquía, también para un periodo de retorno de 10 años; con Tubo Pitot y ADV los puntos relevados se localizaron en la vertical a aproximadamente 5 cm del fondo del canal.

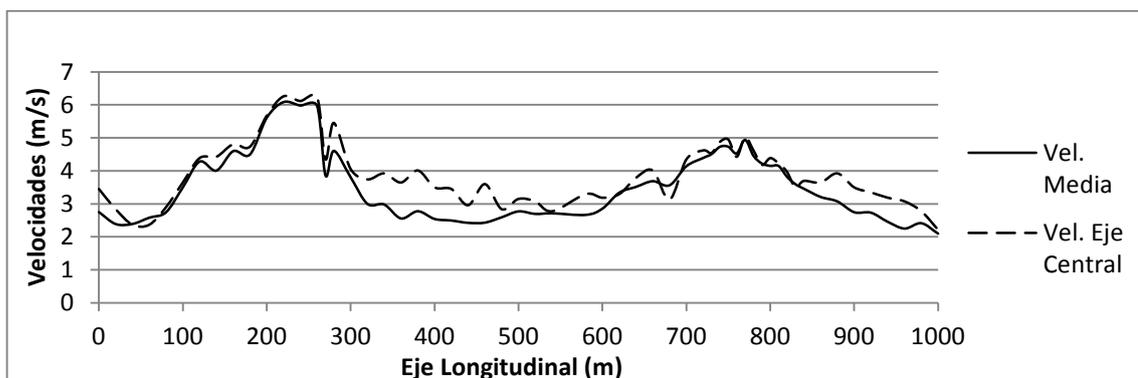


Figura 3.17 Velocidades medidas en el tramo del río Suquía con la técnica del Tubo de Pitot considerando un periodo de retorno de 10 años.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

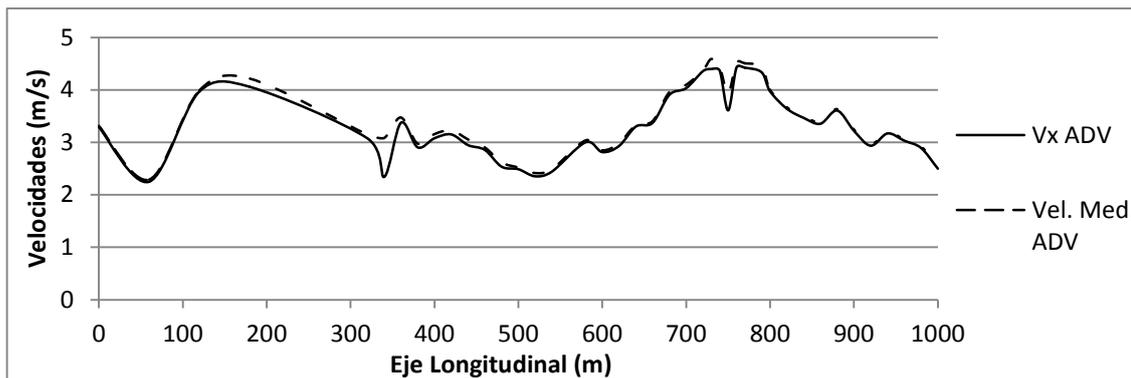


Figura 3.18 Velocidades medidas en el tramo del río Suquía con la técnica del ADV considerando un periodo de retorno de 10 años.

En la Figura 3.17 se puede ver el promedio de los 5 puntos de velocidad medida en cada sección con Tubo Pitot y la velocidad puntual unidireccional medida en el eje del río Suquía; la máxima velocidad registrada por este método fue de 6.26 m/seg, la mínima de 2.1 m/seg y el promedio de velocidades registradas de 3.72 m/seg. En la Figura 3.18 se presentó la velocidad en la componente “x” (velocidad longitudinal) y el promedio de las tres componentes de velocidad; con ADV se registró una velocidad máxima de 4.59 m/seg, una mínima de 2.25 m/seg y la media de 3.36 m/seg a lo largo del eje del río Suquía.

A continuación, en la Figura 3.19 se presentan las velocidades medidas con la técnica de PTV para un periodo de retorno de 25 años, se presentan la velocidad media superficial en la sección considerada y la velocidad superficial a lo largo del eje del río Suquía. La velocidad máxima registrada en este escenario es de 5.7 m/seg, la mínima de 2.24 m/seg y un valor medio de 3.82 m/seg. Es importante señalar que las velocidades máximas en el modelo físico en los dos escenarios considerados se producen alrededor de la sección 200.

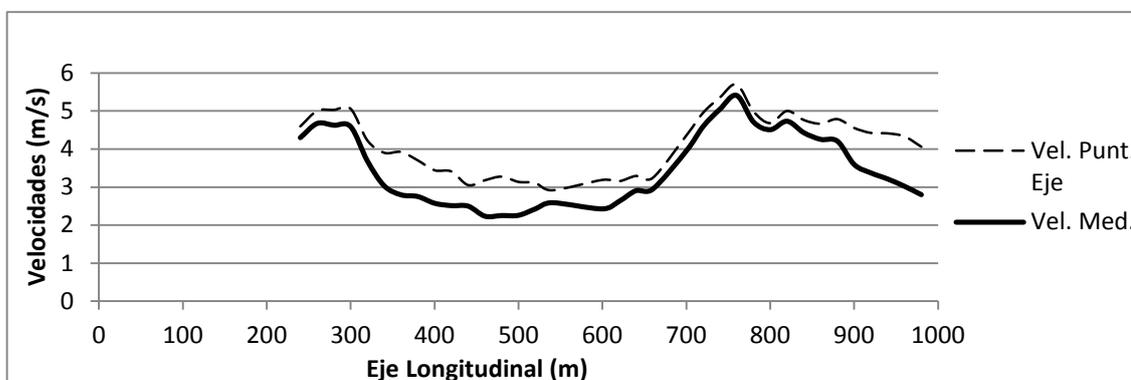


Figura 3.19 Velocidades superficiales medidas en el tramo del río Suquía con la técnica del PTV considerando un periodo de retorno de 25 años.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Finalmente, en las Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22 y Figura 3.23 se presenta los números adimensionales de Froude y Reynolds a lo largo del modelo físico para los escenarios de 10 y 25 años; claramente el flujo en los dos escenarios se encuentra en un régimen subcrítico ($Fr < 1$) y turbulento ($Re \gg 10000$).

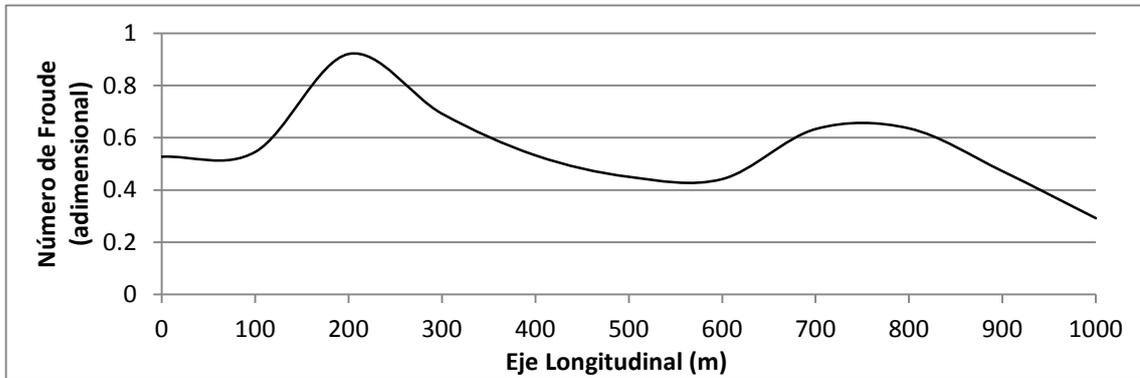


Figura 3.20 Número de Froude en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 10 años de periodo de retorno.

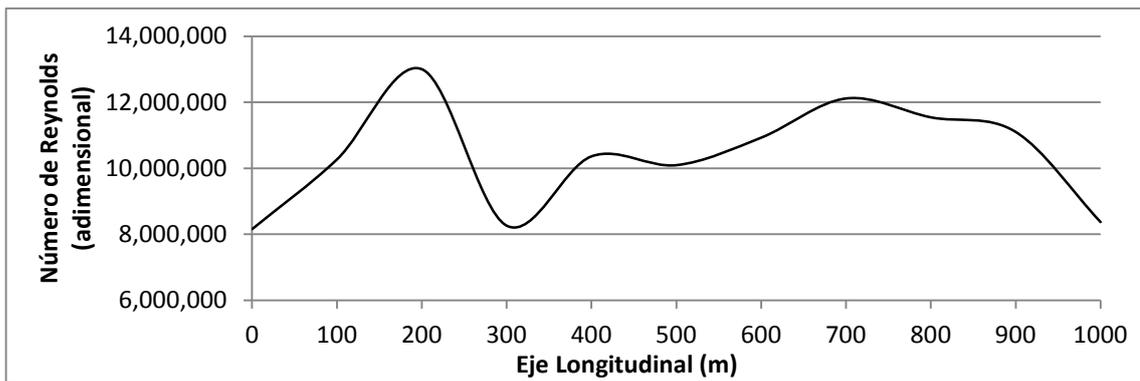


Figura 3.21 Número de Reynolds en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 10 años de periodo de retorno.

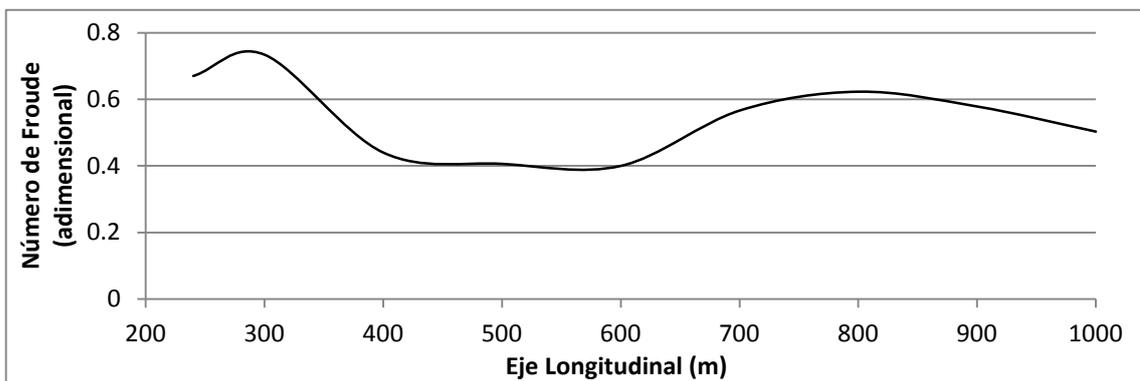


Figura 3.22 Número de Froude en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 25 años de periodo de retorno.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

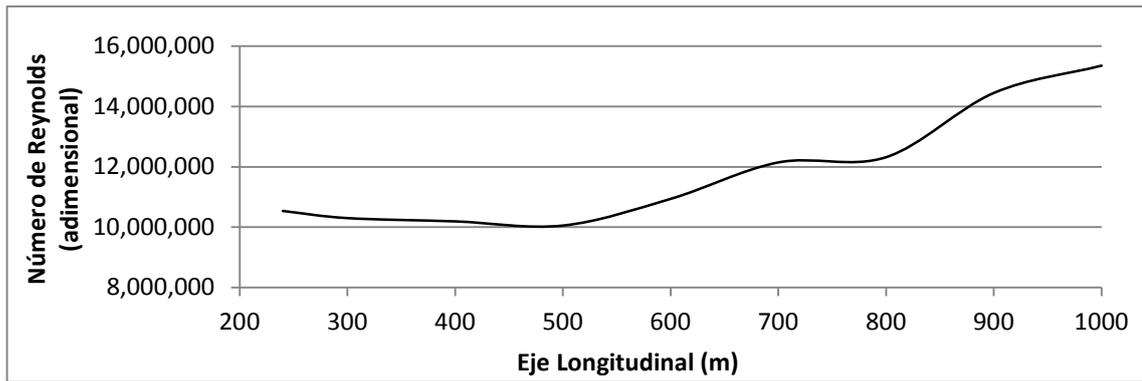


Figura 3.23 Número de Reynolds en el tramo del río Suquía considerando el escenario de 25 años de periodo de retorno.

CAPÍTULO 4
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN
DE LOS MODELOS
NUMÉRICOS HEC-RAS (1D),
IBER (2D) Y DELFT (3D)

4. Calibración y Validación de los Modelos Numéricos HECRAS (1D), IBER (2D) y DELFT (3D)

Los eventos simulados en los modelos numéricos fueron los mismos que en el modelo físico de la confluencia; los periodos de retorno de 10 y 25 años con caudales en el río Suquía $Q_{10}=454 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=675 \text{ m}^3/\text{seg}$, el caudal para el tramo del arroyo La Cañada $Q_{10}=210 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=328 \text{ m}^3/\text{seg}$, respectivamente. El caudal total en la confluencia para los escenarios considerados fue de $Q_{10}=664 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=1003 \text{ m}^3/\text{seg}$ (Reyna, 1999).

A continuación se presentará un análisis de sensibilidad de las variables utilizadas por los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT para la solución del problema de flujo en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.

4.1. Análisis de Sensibilidad

Las principales variables a ser tomadas en cuenta en la solución del problema de un flujo a superficie libre son las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo de la corriente, el valor de la fuerza gravitatoria, las constantes relacionadas al estado del fluido como lo son la densidad y la viscosidad. Finalmente otro parámetro de gran importancia es la rugosidad del cauce y de las riberas de inundación. En la Tabla 4.1 se presenta las variables que han sido usadas en la aplicación de los tres modelos matemáticos:

Variable Hidráulica	Ubicación de la Variable	Valor Asignado
Caudal (m^3/seg)	Aguas Arriba del río Suquía (10 años)	454
	Aguas Arriba del río Suquía (25 años)	675
	Aguas Arriba del arroyo La Cañada (10 años)	210
	Aguas Arriba del arroyo La Cañada (25 años)	328
	Zona de Confluencia (10 años)	664
	Zona de Confluencia (25 años)	1003
Condiciones de Contorno Aguas Arriba (m/m)	Pendiente Normal al Cauce del Suquía	0.002
	Pendiente Normal al Cauce de La Cañada	0.002
Condiciones de Contorno Aguas Abajo (m.s.n.m)	Cota de Pelo de Agua (10 años)	387.34
	Cota de Pelo de Agua (25 años)	388.53
Aceleración de la Gravedad (m/s^2)	Todo el Dominio	9.81
Densidad del Agua (kg/m^3)	Propiedad del Fluido (Agua)	1000
Viscosidad Dinámica del Agua ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{seg}^{-1}$)	Propiedad del Fluido (Agua)	0.001518
Viscosidad Cinemática del Agua (m^2/seg)	Propiedad del Fluido (Agua)	0.00001519
Rugosidad de Manning ($\text{m}^{1/6}$)	Encausamiento del río	0.02
	Riberas de inundación	0.04

Tabla 4.1 Variables principales en la solución de flujos a superficie libre.

En la Tabla 4.1, los valores de caudales fueron obtenidos de la recopilación de estudios hidrológicos previos (Reyna, 1999); la aceleración de la gravedad es una

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

constante, que como se explicó previamente, representa el campo de fuerzas externas que intervienen en el flujo (otros campos de fuerzas como los efectos magnéticos o efectos de Coriolis no son representativos en la solución de este fenómeno); la densidad y viscosidades son propiedades de estado del fluido, el cual se supone incompresible, a condiciones atmosféricas normalizadas y a 4 grados centígrados de temperatura. Las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo han sido calibradas según datos observados y las condiciones de contorno respecto a la resistencia de las paredes que se ejerce en las fronteras del flujo (la resistencia del aire se desprecia) se representa por la rugosidad de Manning, valor que ha sido calibrado con datos experimentales; en la Figura 4.1 se muestra la distribución de la rugosidad en el dominio estudiado:

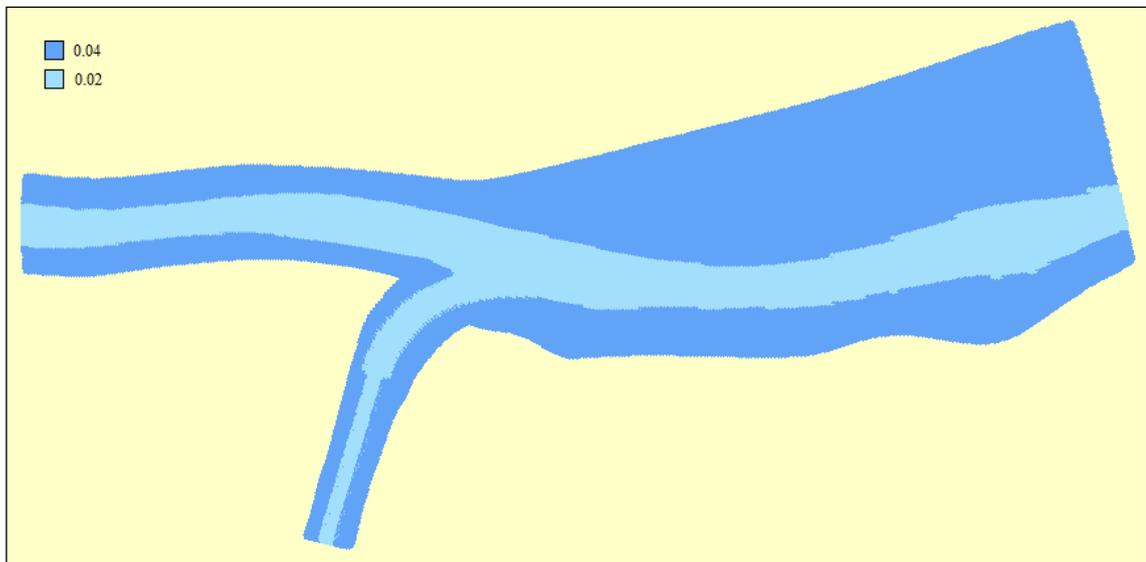


Figura 4.1 Distribución de la Rugosidad.

Además de las variables principales antes expuestas, cada modelo matemático utiliza otros parámetros para la solución del esquema que plantea, a continuación en la Tabla 4.2, Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se presentan las variables, donde se analiza su sensibilidad (Alta, Media y Baja) según incidan en la modificación de los resultados en los modelos matemáticos unidimensional HEC-RAS, bidimensional IBER y tridimensional DELFT:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Variable	Sensibilidad en los Resultados	Valor Asignado
Coefficiente de Expansión para Flujo Estacionario	Alta	0.3
Coefficiente de Contracción para Flujo Estacionario	Alta	0.1
Tolerancia de Cálculo de Superficie de Agua (m)	Media	0.003
Tolerancia de Cálculo de Profundidad Crítica (m)	Media	0.003
Número Máximo de Iteraciones	Media	20
Tolerancia Diferencial Máxima (m)	Baja	0.1
Factor de Tolerancia de Flujo	Baja	0.001
Iteraciones Máximas en la División del Flujo	Baja	30
Máxima Diferencia de la División del Flujo en Confluencias (m)	Baja	0.006

Tabla 4.2 Análisis de Sensibilidad Modelo HEC-RAS.

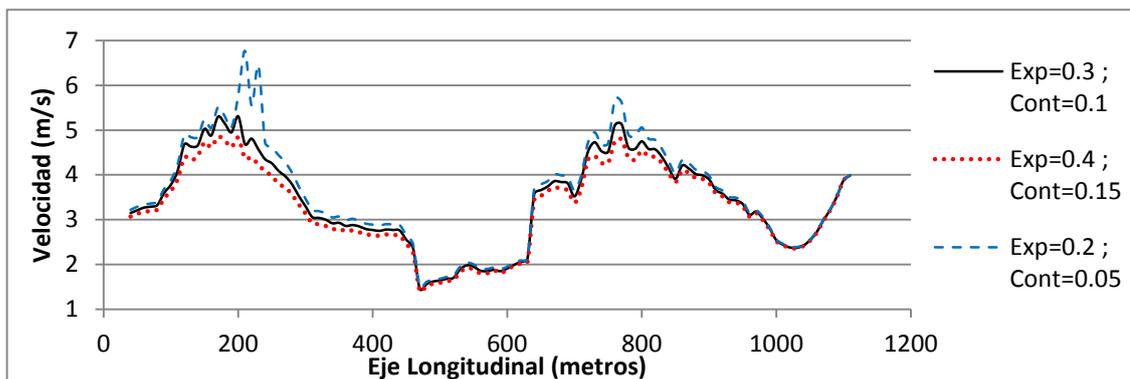


Figura 4.2 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando los coeficientes de expansión y contracción para flujo estacionario (T=25 años).

Variable	Sensibilidad en los Resultados	Valor Asignado
Incremento de Tiempo Máximo (seg)	Alta	1
Tiempo de Simulación (seg)	Alta	2100
Calado Inicial (m)	Alta	0
Condición de Courant-Friedrichs-Levy (CFL)	Alta	0.45
Límite Seco Mojado (m)	Media	0.01
Calado Limite en el Modelo de Turbulencia K-ε (m)	Media	0.01
Intervalo de Resultados (seg)	Baja	25
Ancho de Vía de Intenso Desague (m)	Baja	200

Tabla 4.3 Análisis de Sensibilidad Modelo IBER.

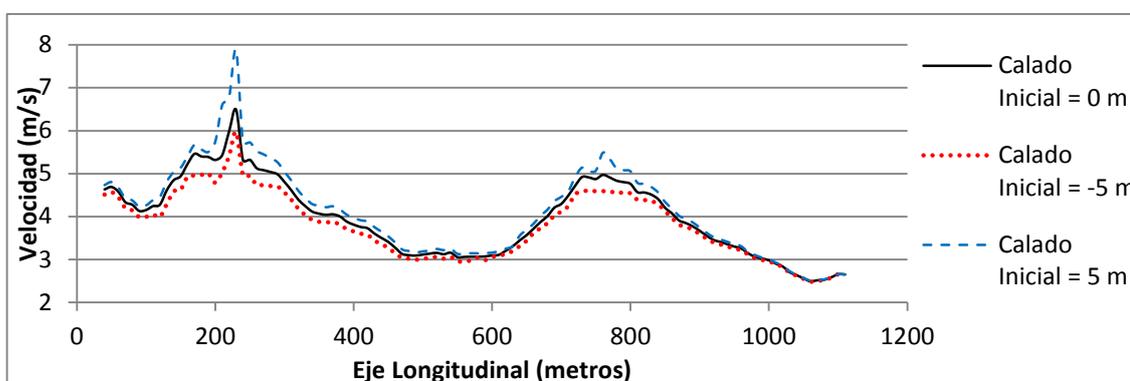


Figura 4.3 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la condición de contorno del calado de agua inicial (T=25 años).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Variable	Sensibilidad en los Resultados	Valor Asignado
Tiempo de Simulación (horas)	Alta	12
Paso de tiempo (minutos)	Alta	0.001
Nivel de Agua Inicial (m)	Alta	430
Condición de Courant-Friedrichs-Levy (CFL)	Alta	0.45
Umbral de Profundidad (m)	Media	0.06
Tiempo de Suavizado (minutos)	Baja	120
Profundidad Marginal	Baja	-999
Parametro de Reflexión en los Contornos	Baja	0
Tiempo local de la Zona (GTM= LT - LTZ)	Baja	-3

Tabla 4.4 Análisis de Sensibilidad Modelo DELFT.

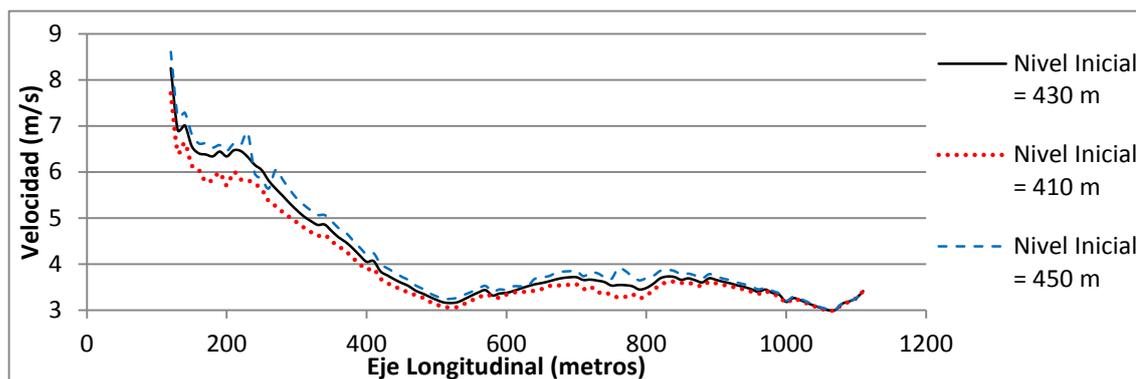


Figura 4.4 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la condición de contorno del nivel inicial de la cota de agua (T=25 años).

En las Tabla 4.2, Tabla 4.3 y Tabla 4.4, un parámetro que con cualquier cambio de magnitud represente una modificación substancial en los resultados se representa como un parámetro de “Alta” sensibilidad; un cambio en el valor de las variables con sensibilidad “Media” incide en los resultados de manera parcial y las variables con sensibilidad “Baja” implican una insignificante o nula influencia en los resultados. Para visualizar los resultados con distintas condiciones de entrada, en las Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4 se presenta la velocidad media longitudinal en cada uno de los modelos cuando varía una de las variables analizadas.

En la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 pueden observarse las variables de la profundidad inicial del pelo de agua en los modelos IBER y DELFT con valores asignados de 0 y 430, respectivamente; en este punto es importante observar que IBER es un modelo que se va a inundar en el paso de tiempo establecido hasta encontrar la condición de equilibrio, lo que significa que los cálculos arrancarán con una condición inicial de 0 metros sobre el nivel del mar; y de manera diferente, DELFT verterá el exceso de agua hasta encontrar el equilibrio por lo que la condición inicial del nivel de agua para el cálculo deberá tener un valor que exceda a los resultados esperados de la cota de agua media (430 metros sobre el nivel del mar

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

para este caso); de esto se puede concluir que las condiciones iniciales de profundidad del agua será la inversa la una de la otra.

Para la representación geométrica, el modelo HEC-RAS interpola las secciones transversales en la longitud del cauce, en los modelos IBER y DELFT es necesario construir una malla para el cálculo de un Modelo Digital del Terreno que represente la topografía de la zona de flujo y riberas de inundación.

Respecto a la malla del modelo, que representará la distribución y cálculo del Modelo Digital del Terreno a partir de puntos relevados y curvas de nivel; en IBER para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos, es necesario previamente realizar una discretización espacial del dominio a estudiar. Para ello se divide el dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). IBER trabaja con mallas no estructuradas formadas por elementos que pueden tener 3 o 4 lados. Se pueden combinar elementos irregulares de 3 y 4 lados dentro de la misma malla. La principal ventaja de trabajar con mallas no estructuradas es la facilidad con que se adaptan a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna. Esta característica de mallado es especialmente indicado para la utilización en la hidráulica fluvial.

El software de modelado DELFT3D contiene el programa generador de mallas DELFT3D-RGFGRID que permite generar una malla curvilínea (en coordenadas cartesianas o esféricas) con las propiedades de resolución apropiadas. En este caso la construcción real de una malla se realiza en un procedimiento iterativo que permite una generación paso a paso de la malla del modelo, trabajando desde una versión gruesa de la cuadrícula, hacia versiones más finas hasta que se consigue la resolución requerida. DELFT3D-RGFGRID también proporciona características para inspeccionar la calidad de la malla. La calidad de una cuadrícula (malla rectangular) es en gran medida determinada por su ortogonalidad y la tasa con la que ciertas propiedades cambian sobre el área a ser modelada (suavidad).

Finalmente, un parámetro importante para la estabilidad de la solución de los modelos IBER y DELFT es el número de Courant-Friedrichs-Levy (*CFL*), que se define en función del paso de tiempo de cálculo y tamaño de las celdas de la grilla,

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

que para el caso en estudio se ha definido como mínimo de 0.45 y se recomienda no mayor a 10; este parámetro de estabilidad se presenta a continuación en la ecuación 4.1:

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{g \cdot H}}{\Delta x} \quad (4.1)$$

Donde Δt (asignado 1 segundo en IBER y 0.06 segundos en DELFT) representa el paso de tiempo, g el valor de la aceleración de la gravedad de la tierra, H un valor representativo de la altura de flujo (aproximadamente 4 metros) y Δx el valor de la arista de la celda más pequeña de la grilla (aproximadamente de 1 metro en la malla de IBER y 0.39 metros en la malla de DELFT). Por lo tanto, en este caso se tiene:

$$CFL_{IBER} = 6.26$$

$$CFL_{DELFT} = 0.96$$

4.2. Análisis Estadístico

Es muy importante tener en consideración, que en la actualidad cualquier trabajo de investigación para que tenga validez y pueda ser publicado en revistas serias indexadas, debe tener un respaldo de métodos estadísticos adecuados para que los resultados puedan ser divulgados y tengan un grado de confiabilidad. Cada uno de los estadísticos mide información distinta de las propiedades de las diferencias o residuos entre las observaciones y las predicciones de los modelos. Por lo tanto, es necesario considerar un grupo de estadísticos, matemáticamente independientes entre sí y que de forma complementaria, permitan una evaluación integral de la bondad de simulación de un modelo en particular (Vázquez, 2003). A continuación se describen los métodos estadísticos utilizados en esta investigación:

Error Medio Absoluto (MAE): Se define como el valor medio aritmético de los errores absolutos de cada medida. El error medio absoluto siempre será positivo y representa el mejor ajuste según su valor se aproxime a 0.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (4.2)$$

Donde “ O_i ” son los datos observados, “ P_i ” los datos calculados y “ n ” el número de datos.

$$\text{Valor Óptimo} = 0$$

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

$$0 \leq MAE$$

Error Medio Relativo Cuadrado (RRMSE).- Permite comparar el ajuste entre los datos observados y los extraídos del modelo. Valores de *RRMSE* iguales a 0 son óptimos ya que los errores no existirían y la relación sería perfecta, pueden darse cualquier valor positivo.

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} * \frac{1}{\bar{O}} \quad (4.3)$$

Donde “ O_i ” son los datos observados, “ P_i ” los datos calculados, “ \bar{O} ” la media aritmética de los datos observados y “ n ” el número de datos.

$$\text{Valor Óptimo} = 0$$

$$0 \leq RRMSE$$

Coefficiente de Eficiencia (EF₂).- Permite verificar el grado de relación 1:1 de los datos en análisis (Nash y Sutcliffe, 1970). Se pueden obtener valores menores o iguales a 1, valores de 1 indican un ajuste perfecto. Un valor mayor de 0.7 se puede considerar como estadísticamente muy adecuado, sin embargo, la precisión óptima de un modelo depende de la aplicación requerida.

$$EF_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4.4)$$

Donde “ O_i ” son los datos observados, “ P_i ” los datos calculados, “ \bar{O} ” la media aritmética de los datos observados y “ n ” el número de datos.

$$\text{Valor Óptimo} = 1$$

$$-\infty < EF_2 \leq 1$$

Coefficiente de determinación (CD).- El coeficiente de determinación mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión. El coeficiente de determinación siempre será positivo y el valor óptimo de los datos calculados será con $CD = 1$.

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (4.5)$$

Donde “ O_i ” son los datos observados, “ P_i ” los datos calculados, “ \bar{O} ” la media aritmética de los datos observados y “ n ” el número de datos.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

$$\text{Valor Óptimo} = 1$$

$$0 < CD \leq +\infty$$

Desviación Media (BIAS).- El sesgo *BIAS* nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, nos cuantifica el error sistemático del modelo y tiene como valor óptimo límite cero. En general es usado para medir el error medio sistemático entre las predicciones y las observaciones. Sus unidades son las mismas de la variable.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \quad (4.6)$$

Donde “ O_i ” son los datos observados, “ P_i ” los datos calculados y “ n ” el número de datos.

$$\text{Valor Óptimo} = 0$$

$$-\infty < MAE < +\infty$$

Coefficiente de Determinación Múltiple o Coeficiente de Correlación (R^2).- Es una medida relativa que indica el grado de ajuste a una línea recta entre los datos observados y simulados. Un valor de R^2 igual a 1 nos indica una tendencia lineal perfecta entre los datos pero no significa necesariamente que ésta sea de 1:1. Es adimensional y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{Cov(O_i, P_i)^2}{\sigma_O^2 \sigma_P^2} \quad (4.7)$$

Donde $Cov(O_i, P_i)^2$ es la covarianza entre los datos observados y los calculados, “ σ_O^2 ” es la varianza de los datos observados y “ σ_P^2 ” es la varianza de los datos calculados.

$$\text{Valor Óptimo} = 1$$

$$0 < R^2 \leq +\infty$$

A continuación en la Figura 4.5 se presenta un resumen de los estadísticos descriptos:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Error Medio Absoluto	Error Medio (Relativo) Cuadrado	Coefficiente de Eficiencia
$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i }{n}$	$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \cdot \frac{1}{\bar{O}}$	$EF_2 = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$
Valor óptimo = 0.0 $0.0 \leq MAE$	Valor óptimo = 0.0 $0.0 \leq RRMSE$	Valor óptimo = 1.0 $-\infty < EF_2 \leq 1.0$
Coefficiente de Determinación	Desviación Media	Coefficiente de Correlación
$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n}$	$R^2 = \frac{Cov(O_i, P_i)^2}{\sigma_O^2 \sigma_P^2}$
Valor óptimo = 1.0 $0.0 < CD < +\infty$	Valor óptimo = 0.0 $-\infty < BIAS < +\infty$	Valor óptimo = 1.0 $0.0 < R^2 < +\infty$

Figura 4.5 Criterio estadístico usado en la evaluación de variables calculadas (Vázquez, 2003).

4.3. Calibración y Validación

En la etapa de calibración de los modelos numéricos, en este caso, se busca lograr un set de parámetros hidráulicos (mostrados previamente en el apartado de análisis de sensibilidad de las variables) y operaciones que permitan obtener una representación de niveles y campos de velocidad que se asemejen a los datos medidos en el modelo físico Suquía-Cañada de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de las variables en puntos específicos del río y con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas.

El parámetro que reflejó mayor importancia en la calibración de los modelos numéricos de este flujo a superficie libre es el valor de la rugosidad; en general, para la selección de este coeficiente se deben conocer los factores que ejercen mayor influencia y las relaciones entre ellos. Los factores más importantes tanto para canales artificiales y naturales que afecta el valor propuesto de la rugosidad son: la rugosidad superficial o de la pared del revestimiento, la presencia de vegetación, la irregularidad de la sección, la alineación del canal en planta, la sedimentación o socavación, obstrucciones, el tamaño y forma del canal, el tirante y caudal, el material en suspensión y la carga de fondo (Chow, 1994). A continuación en las Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 se presenta la variación de los resultados de velocidad media longitudinal en el río

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Suquía cuando se define distintos valores de la rugosidad “n” de Manning; se debe comentar que en la calibración manual de modelos numéricos se realizan una gran cantidad de corridas con diferentes datos de entrada, en las figuras a continuación se pretende mostrar la influencia que los valores de “n” de Manning ejercen en la tendencia de los resultados a lo largo del escenario del río Suquía considerado:

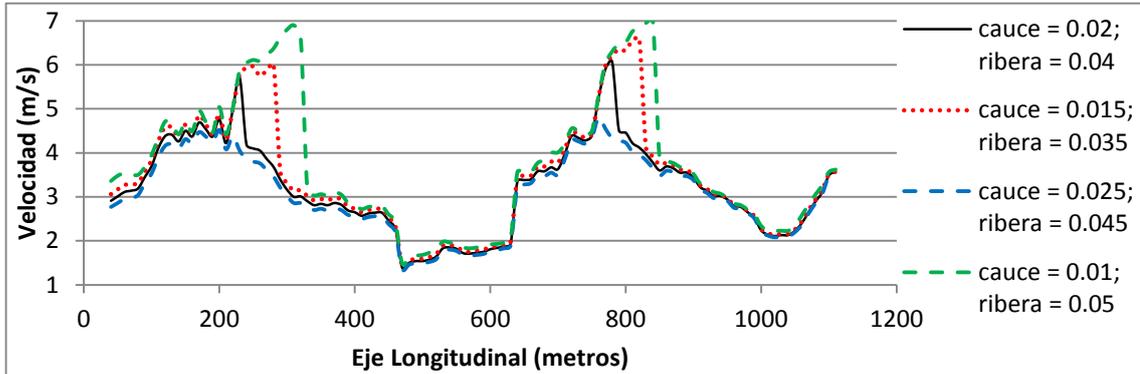


Figura 4.6 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=10 años).

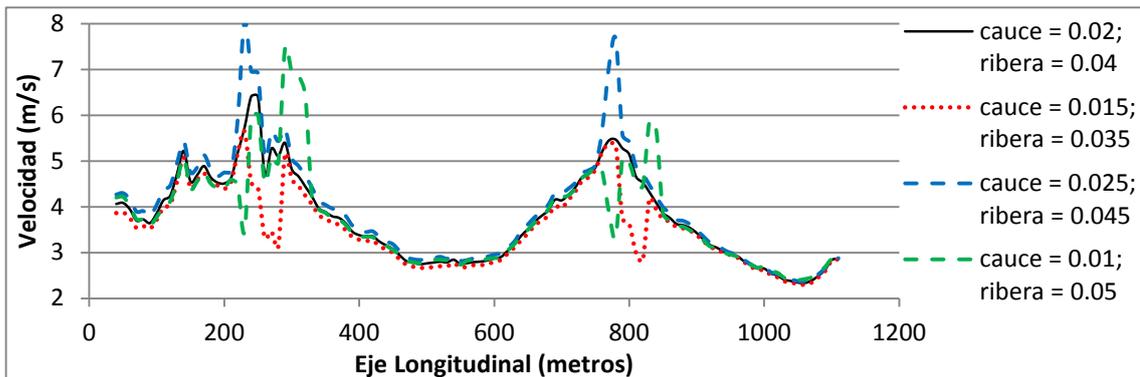


Figura 4.7 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=10 años).

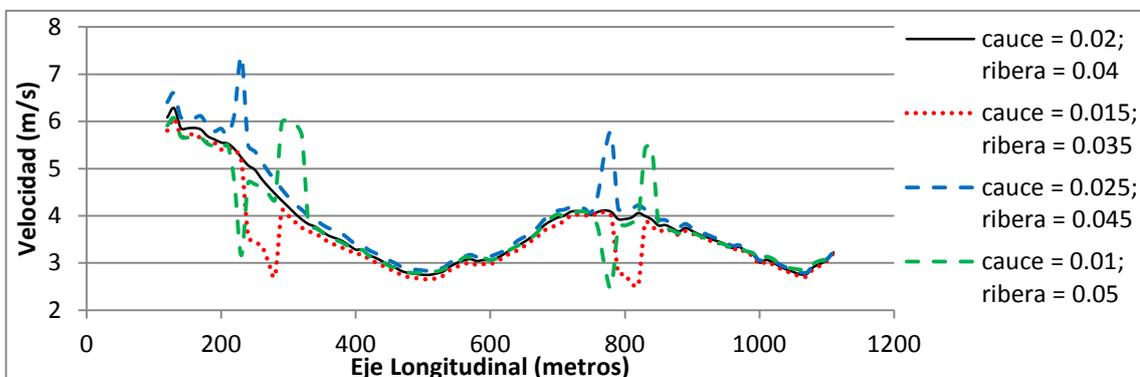


Figura 4.8 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en DELFT3D a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=10 años).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

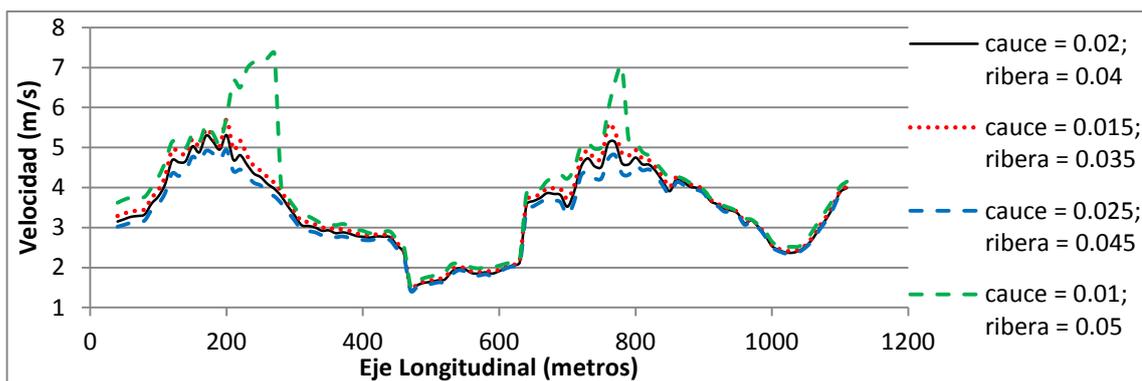


Figura 4.9 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=25 años).

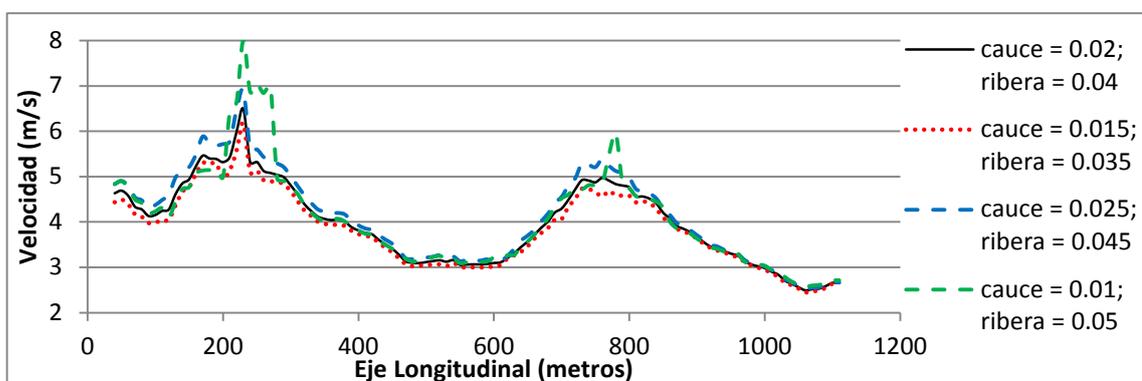


Figura 4.10 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=25 años).

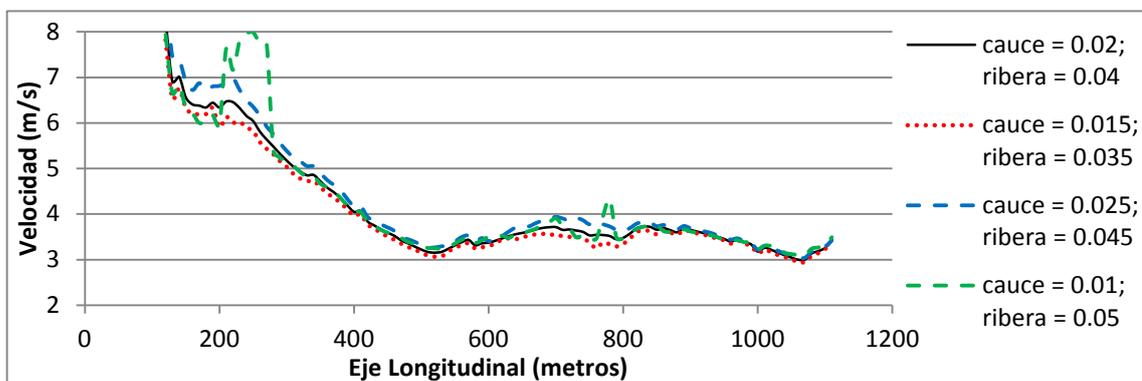


Figura 4.11 Resultados de velocidad media longitudinal calculada en DELFT3D a lo largo del eje longitudinal del río Suquía variando la rugosidad “n” de Manning distribuida en el tramo del cauce y en las riberas de inundación del río (T=25 años).

Del análisis realizado, el valor de la rugosidad de Manning con el que se obtuvo un mejor ajuste de los datos calculados versus los observados en este fenómeno, es el distribuir la resistencia del suelo en dos zonas bien definidas (0.02 en el cauce y 0.04 en las riberas de inundación); a continuación en la Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.17 se presentan los resultados de la profundidad de flujo (medido en el modelo hidráulico y calculado en HEC-RAS,

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

IBER y DELFT; respectivamente), así también, en la Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22 y Figura 4.23 la velocidad media puntual longitudinal en el eje del río Suquía, para los periodos de retorno de 10 y 25 años:

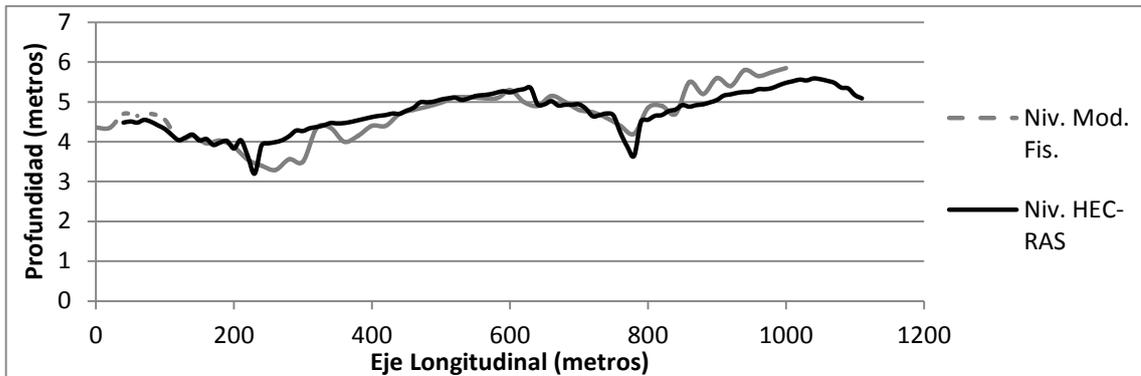


Figura 4.12 Altura de la superficie de agua calculado en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).

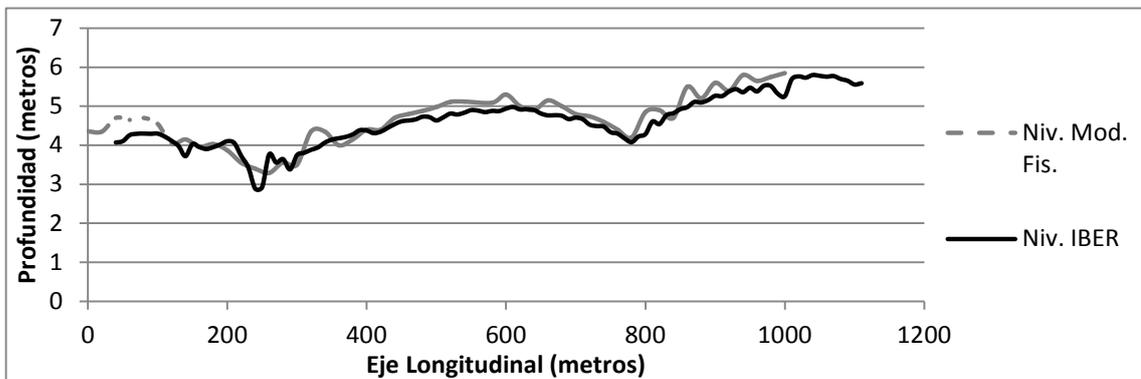


Figura 4.13 Altura de la superficie de agua calculado en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).

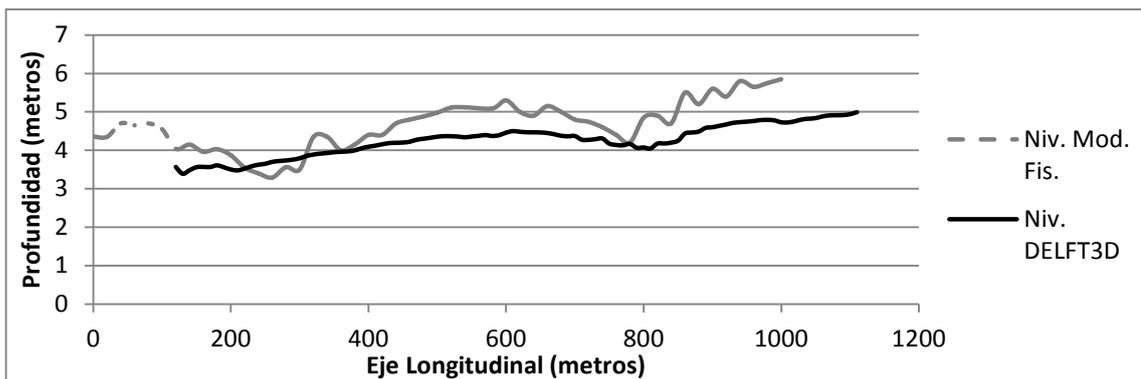


Figura 4.14 Altura de la superficie de agua calculado en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

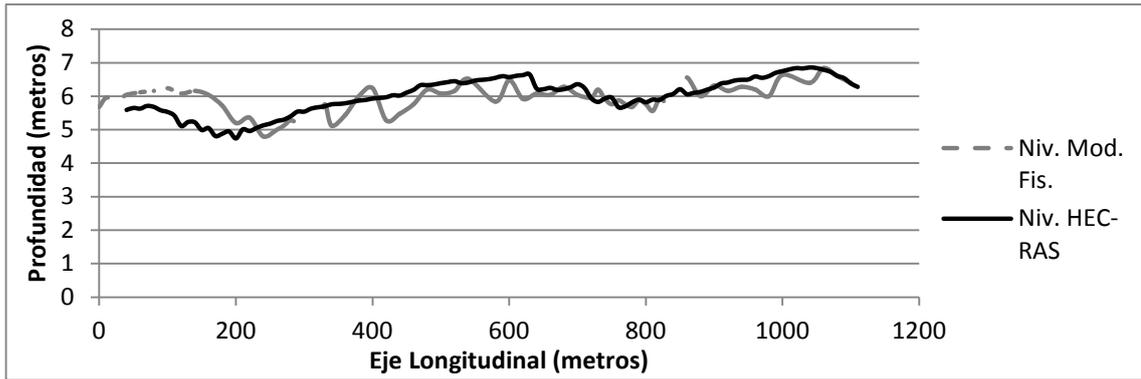


Figura 4.15 Altura de la superficie de agua calculado en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquia (T=25 años).

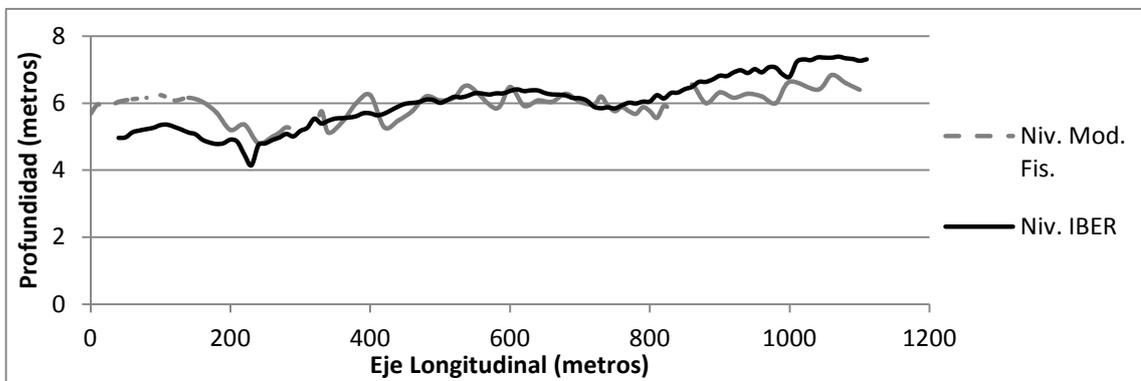


Figura 4.16 Altura de la superficie de agua calculado en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquia (T=25 años).

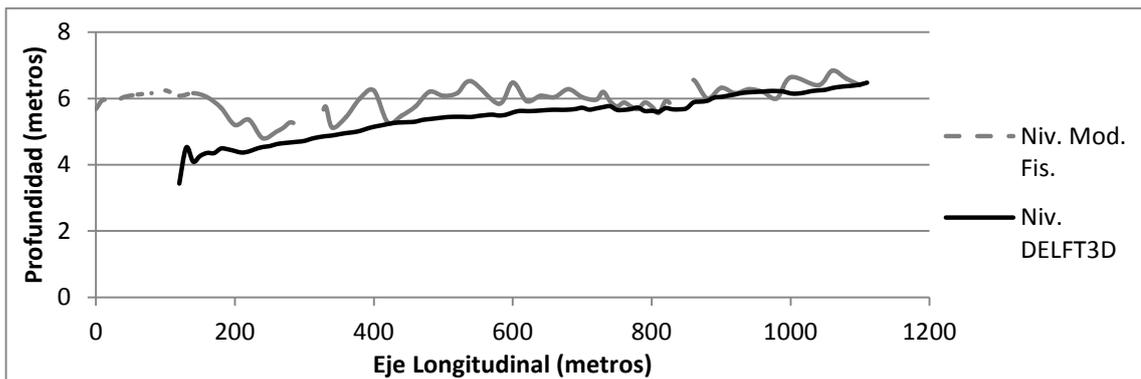


Figura 4.17 Altura de la superficie de agua calculado en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquia (T=25 años).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

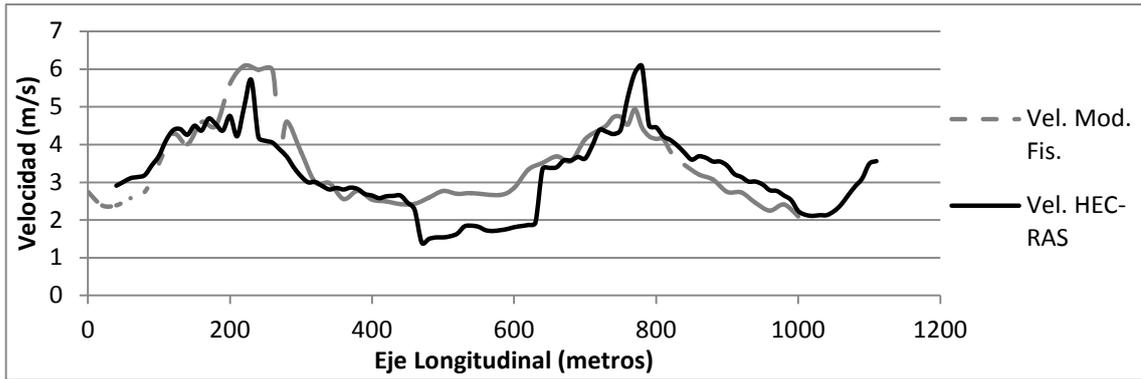


Figura 4.18 Velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).

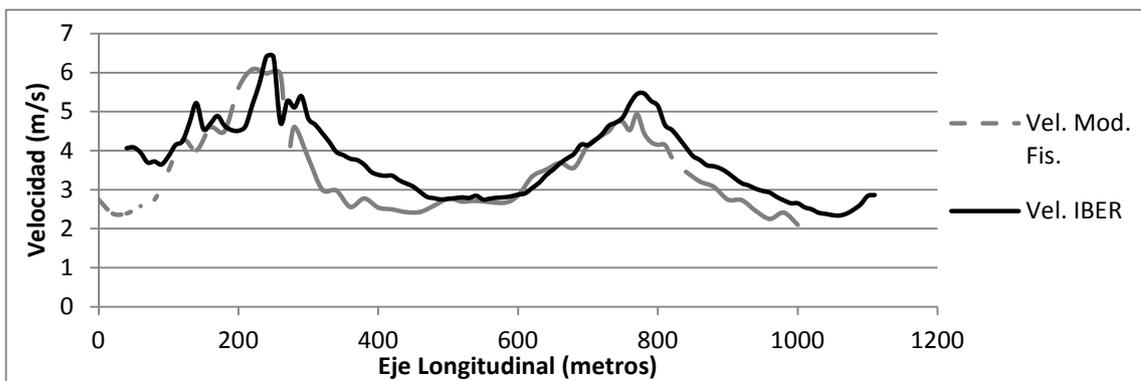


Figura 4.19 Velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).

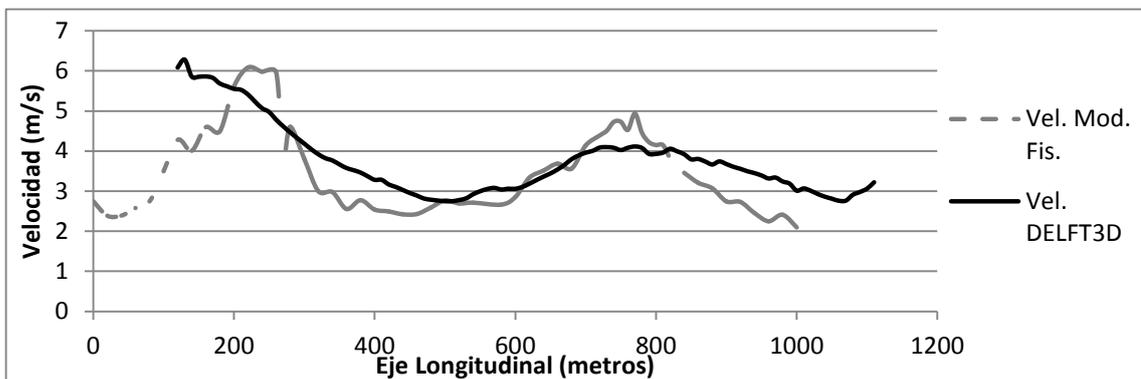


Figura 4.20 Velocidad media longitudinal calculada en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=10 años).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

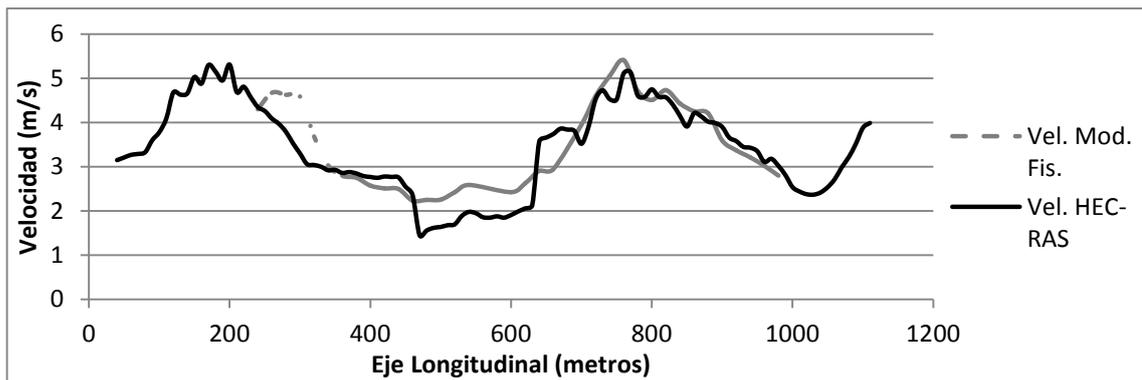


Figura 4.21 Velocidad media longitudinal calculada en HEC-RAS a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).

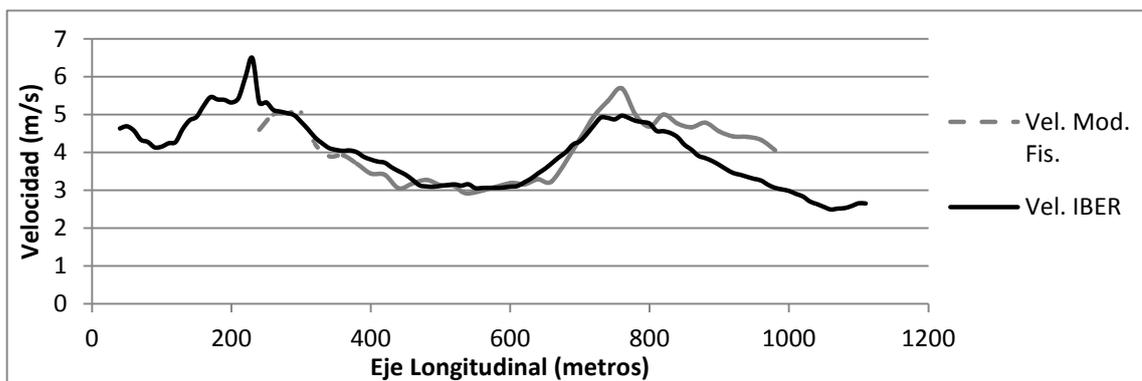


Figura 4.22 Velocidad media longitudinal calculada en IBER a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).

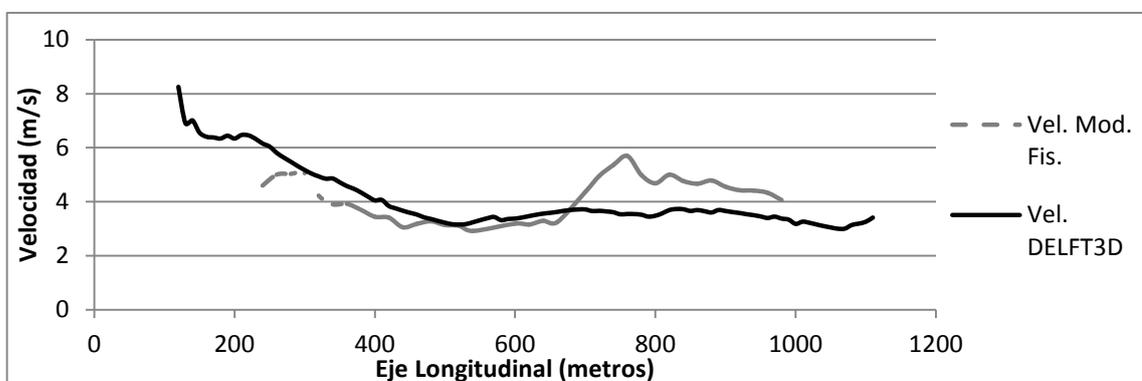


Figura 4.23 Velocidad media longitudinal calculada en DELFT a lo largo del eje longitudinal del río Suquía (T=25 años).

Realizando un análisis visual en los resultados mostrados, se puede inferir que los resultados calculados en el modelo matemático IBER son representativos de los datos observados en el modelo físico de profundidad del nivel de agua y velocidad longitudinal en el eje del río Suquía para los periodos de retorno correspondientes (10 y 25 años); de la misma manera, el modelo matemático HEC-RAS representa adecuadamente los niveles de agua, no así las velocidades las cuales son subestimadas con la solución unidimensional. El modelo DELFT tiene una buena

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

respuesta en la tendencia de los resultados de las velocidades, pero se puede observar que, subestima los niveles y no representa adecuadamente las pendientes y picos en los resultados obtenidos respecto a los medidos. A continuación en la Tabla 4.5 se presentan los resultados del análisis estadístico para cada variable y periodo de retorno respectivo:

	Niveles HEC-RAS 10 años	Niveles IBER 10 años	Niveles DELFT3D 10 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	5.1288	5.7355	12.6638	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.2337	0.2502	0.5399	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0664	0.0645	0.1306	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF₂)	0.7690	0.7822	0.1794	$-\infty < \text{EF}_2 \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	1.8316	1.2632	1.1955	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.0096	0.1783	0.4898	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Multiple (R²)	0.7921	0.8662	0.8461	$0 < R_2 < +\infty$	1.0000
	Niveles HEC-RAS 25 años	Niveles IBER 25 años	Niveles DELFT3D 25 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	5.9477	7.5590	9.9991	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3408	0.4384	0.4832	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0744	0.0925	0.1183	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF₂)	0.1833	-0.2621	-0.9678	$-\infty < \text{EF}_2 \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9251	0.4540	0.3954	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	-0.0637	-0.0544	0.4655	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Multiple (R²)	0.3757	0.4298	0.3714	$0 < R_2 < +\infty$	1.0000
	Velocidad HEC- RAS 10 años	Velocidad IBER 10 años	Velocidad DELFT3D 10 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	18.1760	14.6599	14.8295	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.5234	0.5970	0.5949	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.1953	0.2072	0.1993	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF₂)	0.5378	0.4800	0.5106	$-\infty < \text{EF}_2 \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9366	1.0255	1.3659	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.1081	-0.4608	-0.2804	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Multiple (R²)	0.6098	0.6836	0.5859	$0 < R_2 < +\infty$	1.0000
	Velocidad HEC- RAS 25 años	Velocidad IBER 25 años	Velocidad DELFT3D 25 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	13.5210	10.0868	19.9284	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3741	0.3833	0.7678	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.1344	0.1220	0.2211	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF₂)	0.7583	0.5858	-0.3600	$-\infty < \text{EF}_2 \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9631	1.2050	1.0013	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.1568	0.1575	0.2204	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Multiple (R²)	0.7978	0.6345	0.1109	$0 < R_2 < +\infty$	1.0000

Tabla 4.5 Análisis estadístico de los resultados de nivel y velocidad calculados por los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT comparados con los medidos en el modelo físico Suquía-Cañada para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años.

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados de 7 índices estadísticos que muestran resultados aceptables en los tres modelos numéricos y de lo que se puede concluir que el modelo numérico bidimensional IBER es el que representa de la mejor manera los resultados calculados respecto a los observados, tanto cualitativa como cuantitativamente; el motivo de esta mejor representación, se explica por la

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

característica de la confluencia estudiada que presenta propiedades de aguas poco profundas o flujos de superficie libre en aguas someras, con la relación de ancho-profundidad pequeña donde dominan los procesos bidimensionales y por lo tanto se obtienen buenos resultados al promediar las variables verticales respecto a la profundidad del flujo (Cea y otros, 2009). De la Tabla 4.5 también se puede remarcar que según los valores de los estadísticos de los resultados del modelo unidimensional HEC-RAS, lo calculado en este modelo representa un aceptable estado de forma respecto a los datos medidos, aunque subestima las velocidades en los sectores de máximos y mínimos. Otra observación importante es que, en el modelo tridimensional DELFT se estiman adecuadamente los valores máximos y mínimos de las variables de velocidad, aunque se subestiman las profundidades en el flujo y también se presenta una deficiencia en la tendencia de forma respecto a los datos medidos a lo largo del río Suquía. En las Figura 4.24, Figura 4.25, Figura 4.26 y Figura 4.27 se presentan los resultados de los tres modelos numéricos y el modelo físico, para cada variable analizada en el proceso de calibración y en los periodos de retorno antes citados:

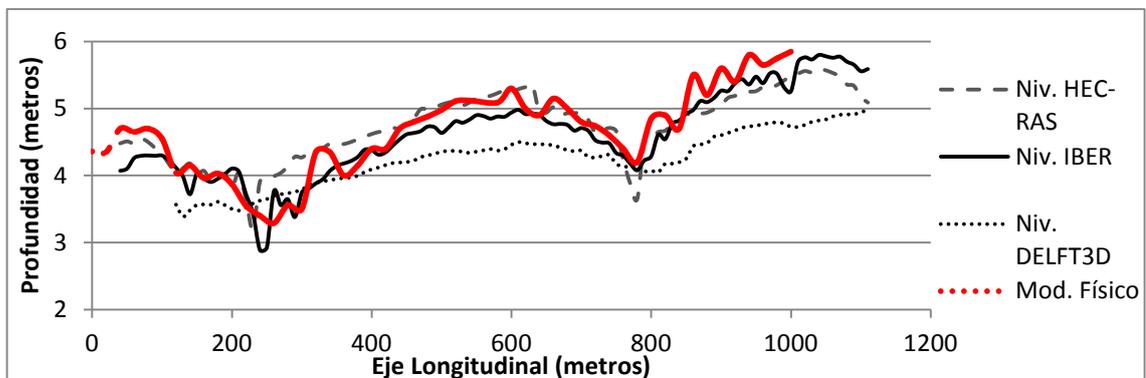


Figura 4.24 Resultados de la altura de superficie de agua del río Suquía para el periodo de retorno de 10 años.

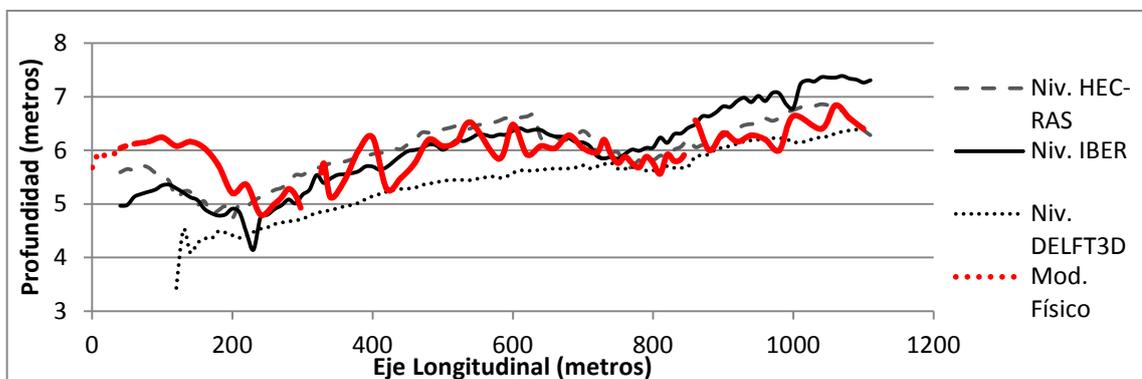


Figura 4.25 Resultados de la altura de superficie de agua del río Suquía para el periodo de retorno de 25 años.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

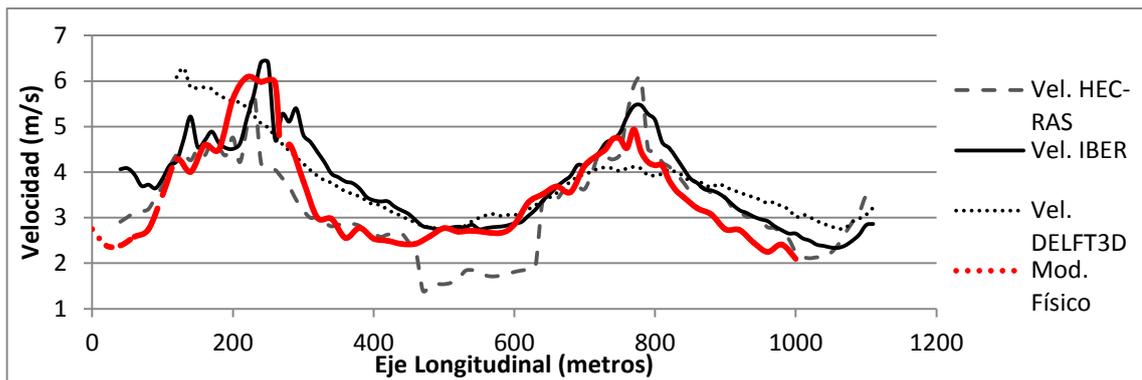


Figura 4.26 Resultados de la velocidad media longitudinal del río Suquía para el periodo de retorno de 10 años.

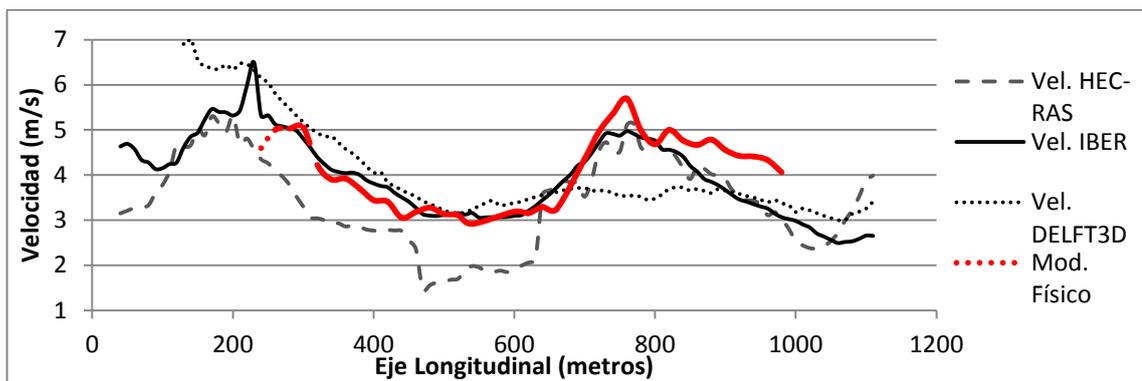


Figura 4.27 Resultados de la velocidad media longitudinal del río Suquía para el periodo de retorno de 25 años.

CAPÍTULO 5
ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. Análisis de Resultados

En la sección anterior se realizó el análisis de sensibilidad de los modelos matemáticos para la calibración de cada esquema de solución considerado, en donde a través de métodos gráficos y estadísticos se pudo concluir que el modelo matemático bidimensional IBER tuvo menor incertidumbre en los resultados respecto a las mediciones realizadas en el modelo físico Suquía-Cañada. A continuación se analizarán varios resultados de importancia en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía. En la Figura 5.1 y Figura 5.2 se presenta la profundidad de flujo para periodos de retorno de 10 y 25 años:

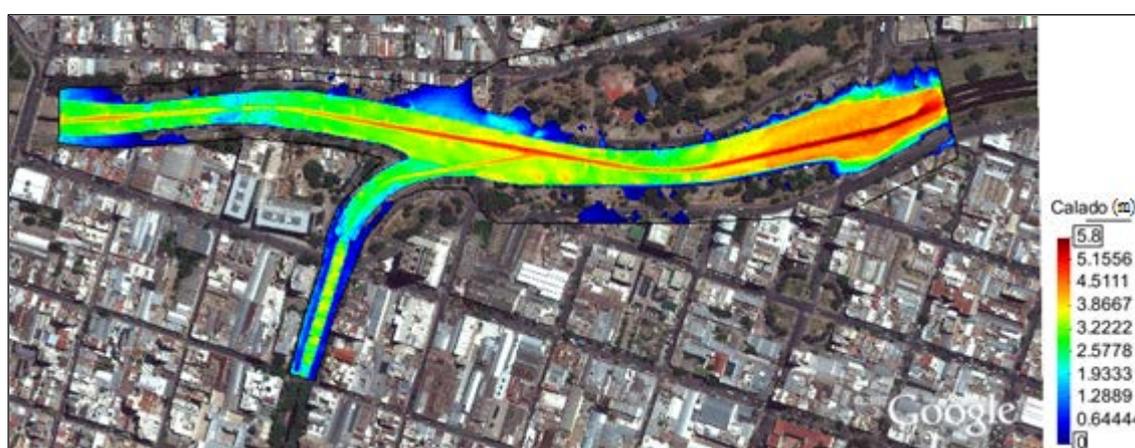


Figura 5.1 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.

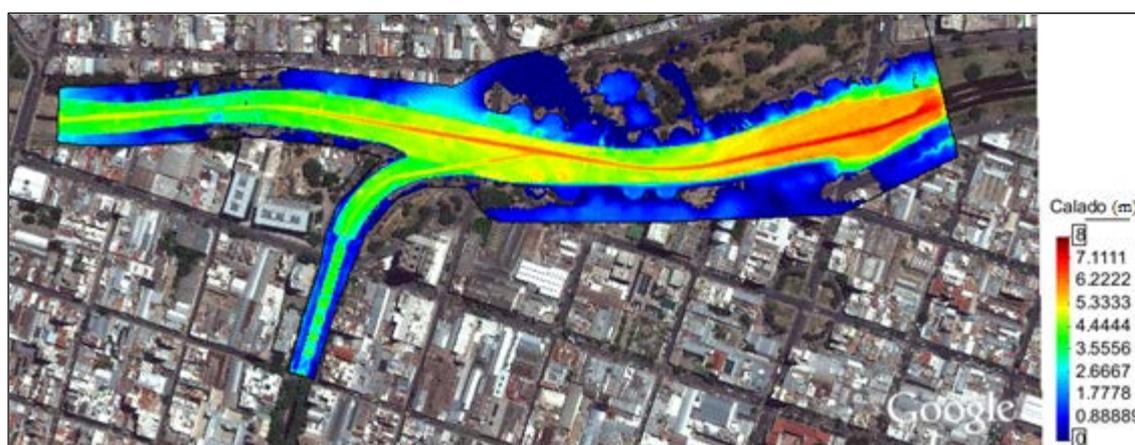


Figura 5.2 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.

Se puede ver claramente que el área afectada en el evento de 25 años incluye una gran inundación de las vías de la costanera (aproximadamente de un metro de profundidad), así como se afecta a construcciones aledañas a las riberas de inundación; mientras que, para el periodo de retorno de 10 años, se observa que el

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

agua transitará en su mayoría por las riberas de inundación del mismo río sin que se afecte con gravedad las estructuras y vías aledañas. A continuación en la Figura 5.3 se presenta la magnitud de las velocidades medias en el plano con un esquema de áreas coloreadas para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años, en el tramo ubicado aguas arriba de la confluencia en el río Suquía:

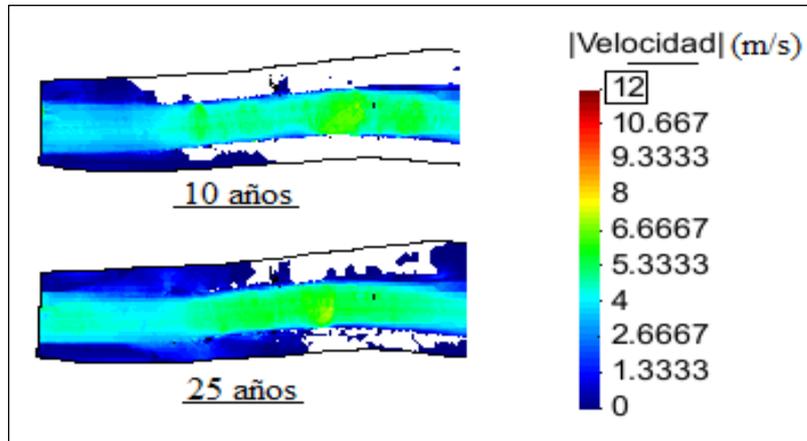


Figura 5.3 Esquema de la magnitud de las velocidades medias en el plano para el tramo correspondiente al río Suquía en el sector de aguas arriba de la confluencia, resultados obtenidos en IBER.

En la Figura 5.3 se puede observar claramente la zona con un cambio acelerado en la magnitud de velocidades y por lo tanto se puede referir como una zona de alta turbulencia, esto es debido a las estructuras con las que se encuentra el flujo en este tramo del río. En la Figura 5.4 se presenta la magnitud de las velocidades medias en el plano con un esquema de áreas coloreadas para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años, en la confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía:

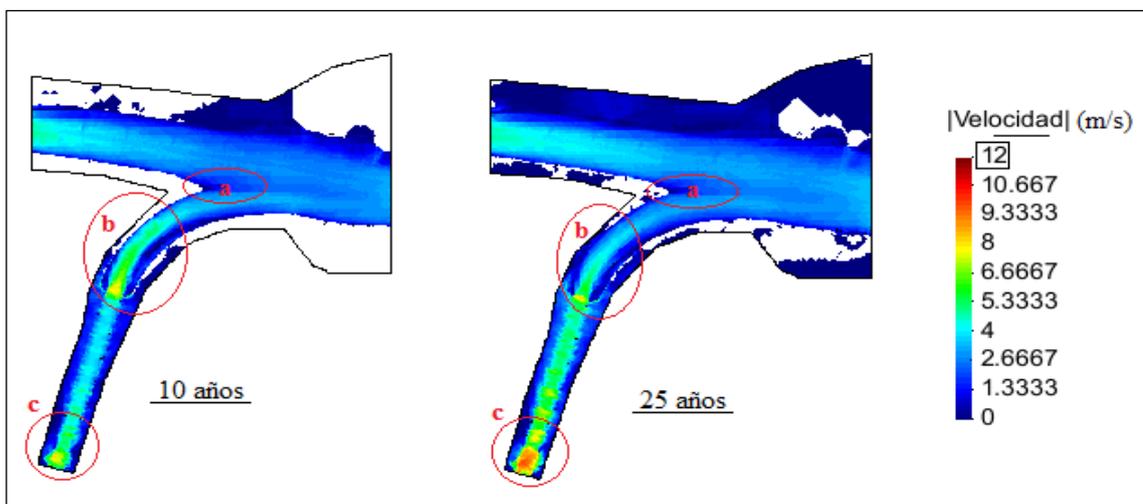


Figura 5.4 Esquema de la magnitud de las velocidades medias en el plano para el tramo correspondiente a la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía, resultados obtenidos en IBER.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

En la Figura 5.4 se marcaron tres sectores de importancia en el análisis de la confluencia: la zona “a” es donde ocurre el estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia, en la zona “b” se observa aceleración del flujo producido por un pequeño vertedero localizado en el arroyo La Cañada justo antes de que el flujo sea vertido en el río Suquía y se observan zonas de separación del flujo en las paredes del canal del arroyo La Cañada inmediatamente antes de la confluencia, y finalmente, la zona “c” en donde se produce aceleración del flujo y turbulencia debido a la interferencia de estructuras en el flujo y por la cercanía con las fronteras del dominio modelado. De la misma forma, en la Figura 5.5 se presenta la magnitud de las velocidades medias en el plano con un esquema de áreas coloreadas para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años, aguas abajo de la confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía:

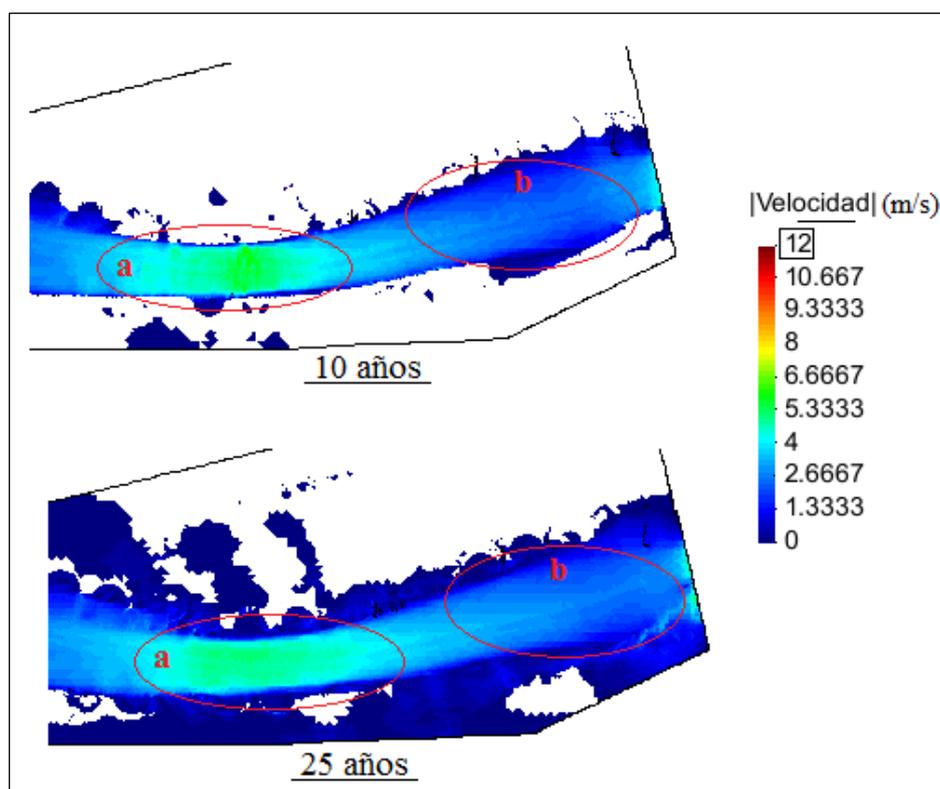


Figura 5.5 Esquema de la magnitud de las velocidades medias en el plano para el tramo correspondiente al río Suquía en el sector de aguas abajo de la confluencia, resultados obtenidos en IBER.

Se puede observar en la Figura 5.5 la zona “a” en donde el río alcanza su máxima velocidad cuando se unen los dos tributarios y por lo tanto se trata de un sector de alta turbulencia y por lo tanto de gran capacidad de mezcla, también se puede observar la separación del flujo y capas de corte en las paredes del canal. En la zona

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

señalada “b” ocurre la recuperación del flujo; y al final del dominio, se puede observar una zona de turbulencia debido a la interferencia de estructuras y de las fronteras del modelo. A continuación, mediante un análisis de la magnitud de las velocidades en el plano en la dirección longitudinal del río, en las Figura 5.6 y Figura 5.7 se observa con claridad las zonas de estancamiento, desborde y recirculación para los periodos de retorno modelados, de 10 y 25 años, respectivamente:

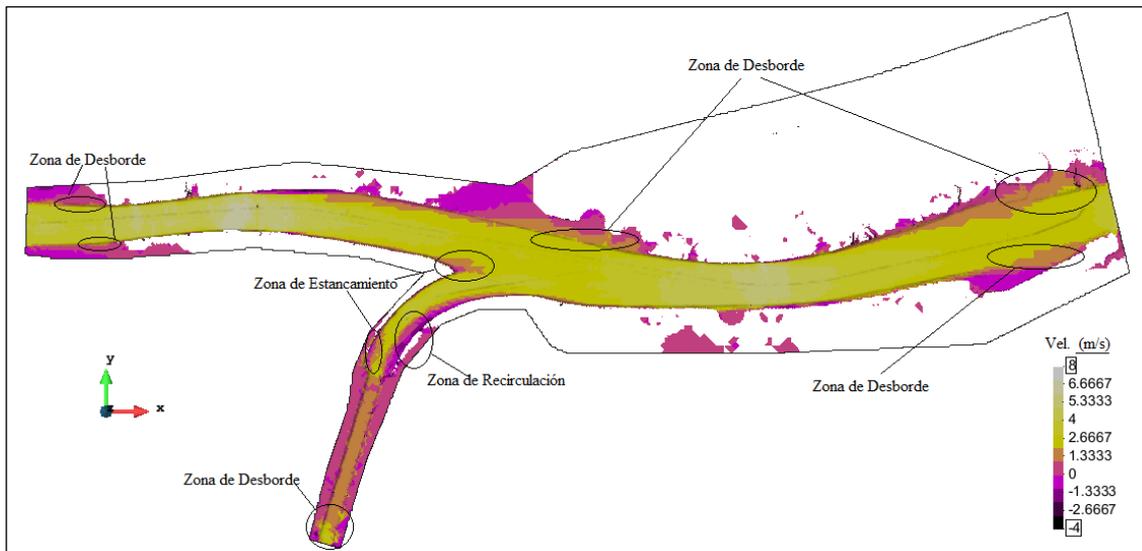


Figura 5.6 Esquema de las zonas de estancamiento, desborde y recirculación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.

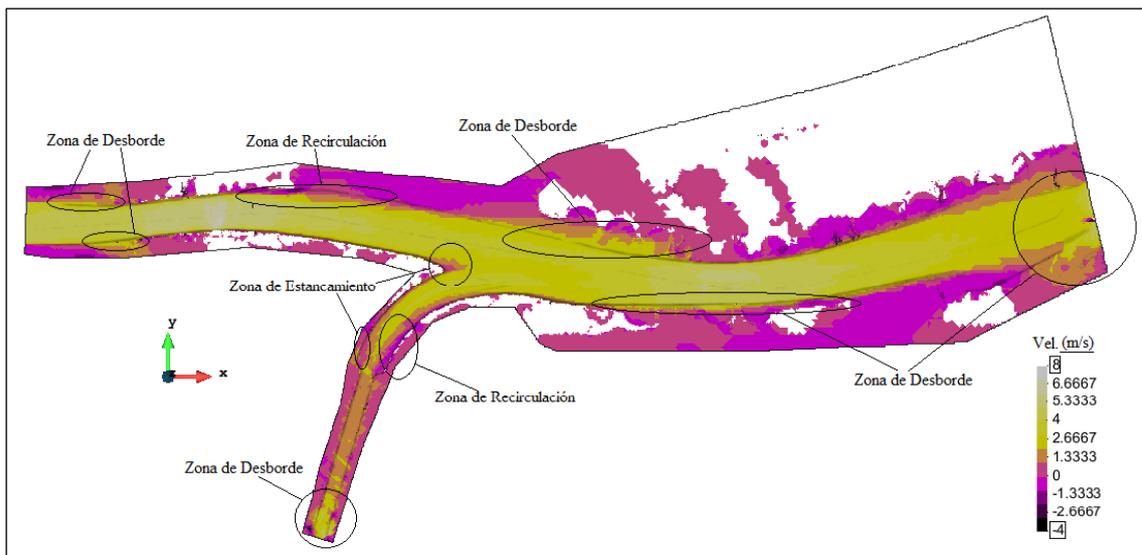


Figura 5.7 Esquema de las zonas de estancamiento, desborde y recirculación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

En las Figura 5.8 y Figura 5.9 se presenta el número de Froude en el flujo para los periodos de recurrencia considerados, en las figuras se señalan las zonas con cambio de régimen de subcrítico a supercrítico y viceversa; estos cambios en el régimen y por lo tanto en la velocidad son los que generan perturbaciones en el flujo y fenómenos locales de erosión; estos fenómenos por lo general son consecuencia de un cambio brusco de pendiente, de la curvatura o de la sección transversal del canal. En la región de transición de la caída, suele aparecer una curva invertida que conecta las superficies del agua antes y después de dicha caída. El punto de inflexión de la curva, indica la posición aproximada de la profundidad crítica para la cual la energía es mínima y el flujo pasa de ser subcrítico a supercrítico; luego otro fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico, esto involucra una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro de un resalto hidráulico. En consecuencia, el contenido de energía en el flujo después del resalto es apreciablemente menor que el de antes del mismo (Giles y otros, 1994).

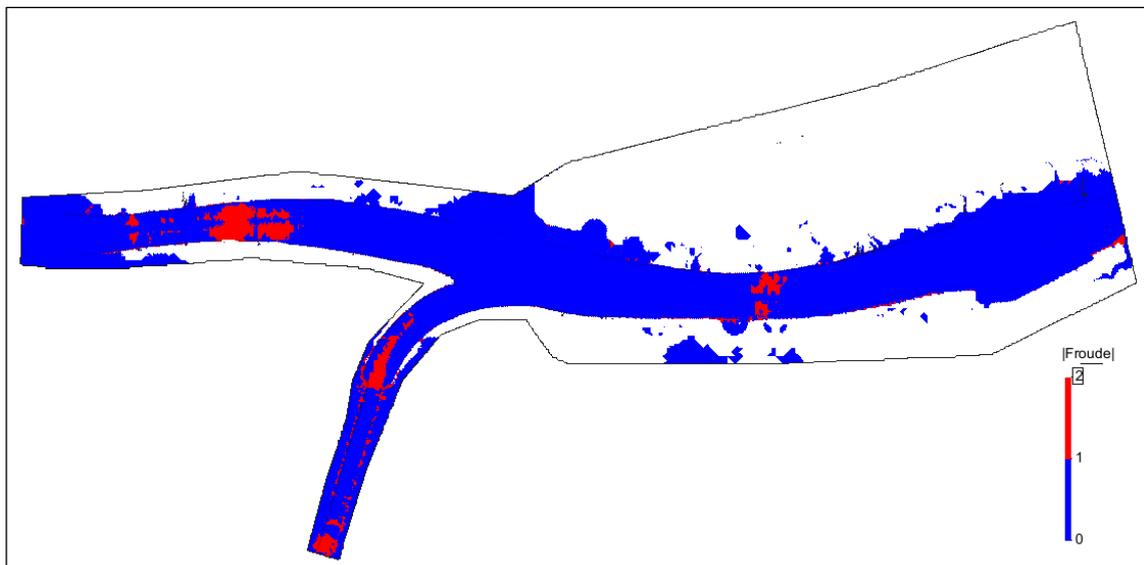


Figura 5.8 Número de Froude en el flujo de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

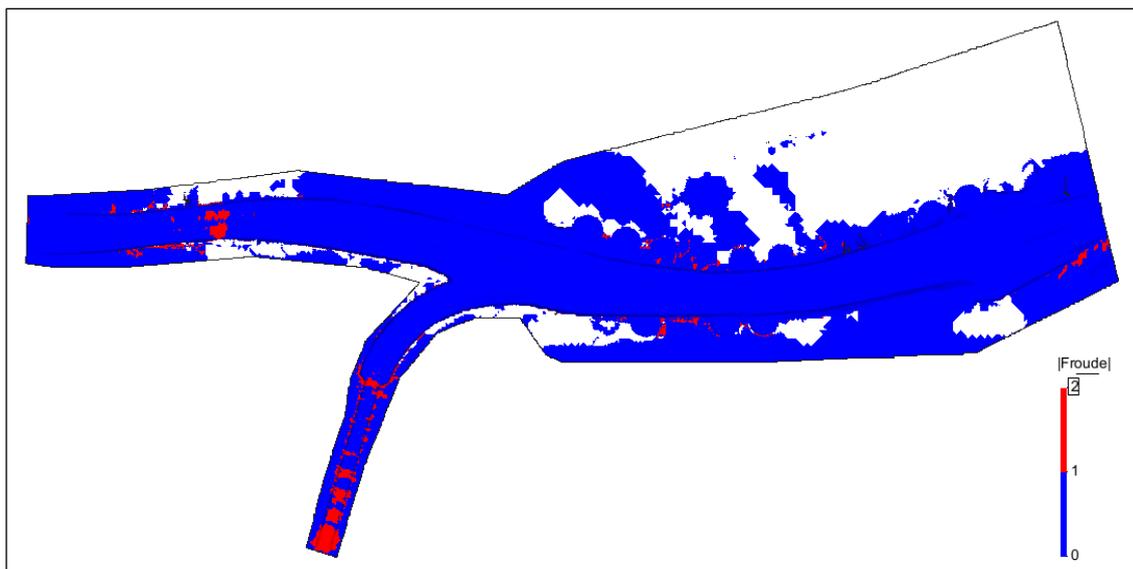


Figura 5.9 Número de Froude en el flujo de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para el periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.

Como puede observarse en las Figura 5.8 y Figura 5.9, los cambios de régimen del flujo son más representativos en el periodo de retorno de 10 años y especialmente en el canal del arroyo de La Cañada; en este canal se observa antes de la confluencia cambios bruscos de pendiente como lo es el pequeño vertedero donde también cambia bruscamente la sección transversal y la marcada curvatura hacia la derecha que realiza el canal antes de verter sus aguas en el río Suquía. Finalmente, se presenta en las Figura 5.10 y Figura 5.11 los caudales específicos (caudal por unidad de ancho) representados en un esquema de áreas coloreadas y que ocurren en los periodos de recurrencia considerados, en las Figura 5.10 y Figura 5.11 se puede observar que el volumen de agua escurrido es mucho mayor en el escenario de periodo de retorno de 25 años respecto al de 10 años, así como, en los dos escenarios se observa que el flujo de agua se concentra en la tolva del canal del Arroyo La Cañada y en el río Suquía, lo que demuestra que las mayores velocidades se darán en el centro de los cauces analizados. Los resultados para el periodo de retorno de 25 años hacen notar que por el nivel de inundación que se produce en este evento, gran cantidad de volumen de agua circulará por fuera del cauce y de las riberas de inundación.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

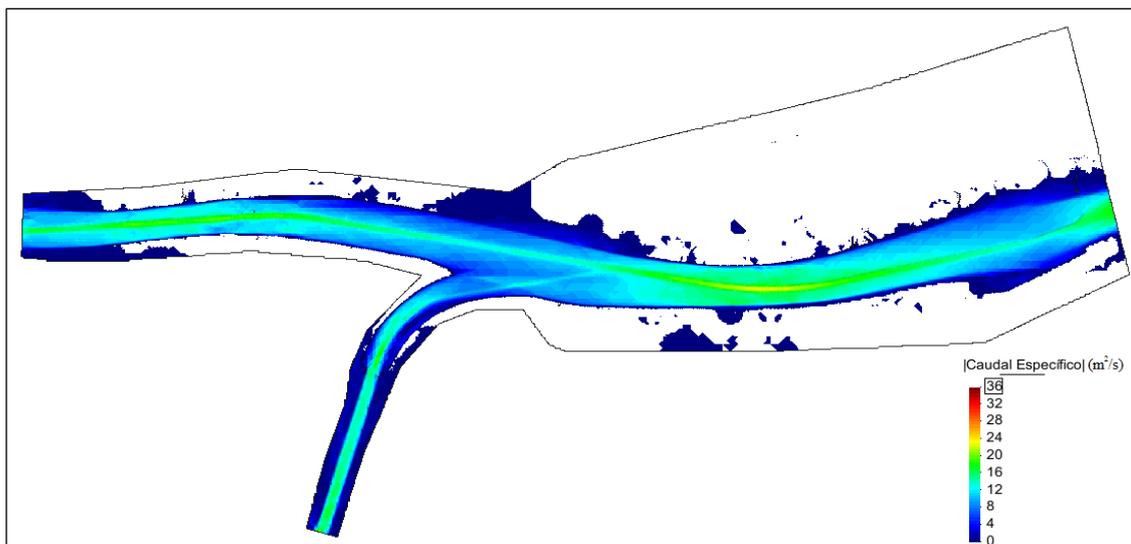


Figura 5.10 Representación del caudal específico por medio de áreas coloreadas en el tramo del río Suquía que incluye la confluencia del arroyo La Cañada correspondiente a un periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.

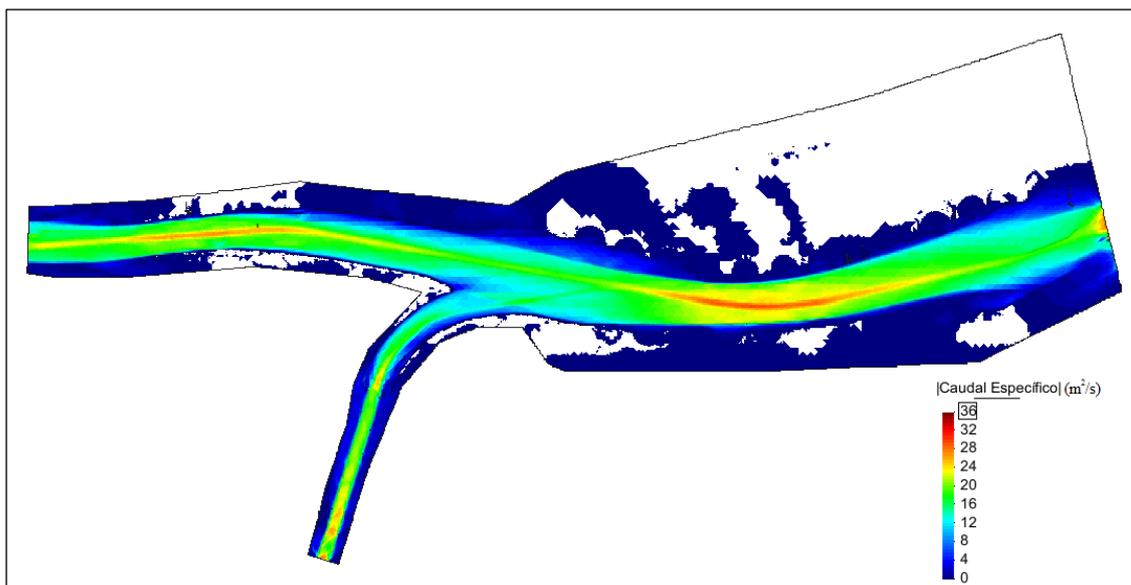


Figura 5.11 Representación del caudal específico por medio de áreas coloreadas en el tramo del río Suquía que incluye la confluencia del arroyo La Cañada correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.

CAPÍTULO 6
**CÁLCULO DE EFECTOS DE
ESCALA EN EL MODELO
HIDRÁULICO
SUQUÍA-CAÑADA**

6. Cálculo de Efectos de Escala en el Modelo Hidráulico Suquía-Cañada

Los modelos hidráulicos representan un prototipo, es decir, un escenario del mundo real y se utilizan como herramientas para encontrar soluciones técnicas y económicas en problemas de la ingeniería. Diferencias considerables entre modelo y prototipo son principalmente debido a los efectos de escala, condiciones de contorno y alteración de los parámetros en el proceso de medición. Otros efectos en la modelación proceden de la modificación de las características del prototipo como lo son la geometría (modelado 2D o reflexiones), el flujo o técnicas de generación de ondas (nivel de intensidad de la turbulencia en el enfoque del flujo o la aproximación de la onda lineal) y las propiedades del fluido (densidad, salinidad, material en suspensión, etc.). Los efectos de escala se presentan debido a la incapacidad de mantener cada relación de fuerzas constante, según corresponda pertinentemente, entre el modelo y prototipo. Los efectos de medición son debido a que las técnicas de medición utilizadas no son idénticas en el muestreo de datos en el modelo y en el prototipo (sistemas de medición intrusivos y no intrusivos o diferentes tamaños de los equipos de prueba). La estimación de los efectos de escala y de medición que afectan tanto cualitativamente como cuantitativamente los resultados del modelo respecto a la realidad, y el estimar si estos efectos pueden o no despreciarse; es un desafío en la investigación de cada escenario hidráulico estudiado. Las simulaciones numéricas pueden ser capaces de tener en cuenta los efectos de escala del modelo, mientras que los efectos de medición no pueden normalmente ser incluidos. Efectos de escala también pueden ser responsables de las discrepancias entre los resultados de los modelos físicos y numéricos, si por ejemplo, algunos términos tales como la viscosidad cinemática se descuidan en el enfoque de cálculo (Heller, 2011).

En términos generales, se sabe que, mientras la relación de escala aumenta los cambios en los resultados son más evidentes; en este caso de estudio de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía, la relación de escala de longitudes es no distorsionada con valor de 1:40. Por lo tanto, la selección apropiada de la escala de longitudes es una optimización económica y técnica para el estudio del proyecto, y esta decisión será hecha de tal manera que intencionadamente, habrá un intervalo en el que los efectos de escala no pueden

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

pasarse por alto completamente, es decir, tener en cuenta una tolerancia en los errores de los resultados del modelo respecto a la realidad.

Los efectos de escala, que como se dijo antes, son debidos a los elementos geométricos, cinemáticos y dinámicos del prototipo que no se escalan de manera exacta en el modelo, y por lo tanto, de estas diferencias resultan las desviaciones en los resultados respecto a los datos observados. Según Heller (2011), las siguientes consideraciones son de importancia en la definición y explicación de las causas de los efectos de escala, independientemente del fenómeno investigado:

- 1) Las investigaciones en modelos hidráulicos siempre tendrán efectos de escala si los modelos hidráulicos tienen algún factor de escala; esto se debe a que es imposible satisfacer las relaciones de similitud de Reynolds, Froude, Mach, Weber y Euler (definidas en la sección 2.2.2 del Análisis Dimensional) de forma simultánea en los modelos desarrollados. La cuestión relevante en la construcción y desarrollo de los modelos hidráulicos es si estos efectos se pueden despreciar teniendo en cuenta una tolerancia de la diferencia de los resultados respecto a la realidad.
- 2) Si mayor es la relación de escala entonces más grande será la diferencia en las relaciones de similitud entre prototipo y modelo, y por lo tanto, se espera mayor magnitud en los efectos de escala del modelo hidráulico. Sin embargo, a pesar de que la diferencia en los resultados aumentan con la relación de escala en un estudio específico, un valor bien definido del tamaño del modelo no significa que estos efectos se puedan descuidar; al contrario de esto, en una investigación tendrá gran importancia el cuantificar como afecta la escala en los resultados del modelo desarrollado.
- 3) La magnitud de los efectos de escala también depende del fenómeno investigado o parámetro en estudio para el que se desarrolló el modelo hidráulico, esto es debido a que las relaciones de similitud implicadas pueden diferir en cada caso. Si uno de los parámetros, tal como la descarga, no se ve afectado considerablemente por efectos de escala, esto no significa necesariamente que otros parámetros, tal como la concentración de aire en el chorro de un vertedero, no estará afectado. Cada parámetro involucrado requiere su propio juicio con respecto a los efectos de escala.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

- 4) Dado que las fuerzas del fluido en el modelo influyen con mayor preponderancia que en el prototipo, los efectos de escala normalmente tienen un efecto de 'amortiguación'. Los parámetros como la altura de ola, la descarga o el volumen relativo de la arena transportada son normalmente más pequeños en el modelo que en su prototipo; es así que, un juicio si la predicción basada en el modelo sub o sobre-estima los resultados puede ser investigado.

Las técnicas de análisis dimensional sugieren (Streeter y Wylie, 1988) que la similitud dinámica se garantiza logrando igual número de Froude tanto en modelo y prototipo. En esta clase de modelos en la que se asegura igual número de Froude (modelos Froudianos), no se puede garantizar igual relación entre los otros procesos intervinientes en el modelo y en el prototipo, y esto genera efectos de escala en la modelación del flujo en los casos de que la gravedad no sea el principal proceso que caracteriza el flujo. Por lo tanto, se desea modelar con similitud de Froude y verificar que los efectos de escala por la falta de similitud dinámica de las otras fuerzas (presión, viscosidad, etc.) en la modelación hidráulica sean despreciables. Para garantizar esta suposición, se necesita garantizar que el estado de flujo (en cuanto a su efecto viscoso) en modelo y prototipo sean similares; y si el modelo es geoméricamente semejante, igualmente que las condiciones de contorno, entonces la semejanza está asegurada no sólo entre las fuerzas debidas a la gravedad sino también, en un amplio rango, en las resistencias debidas a la fricción. El estado de flujo en esta clase de problemas es turbulento, por lo que es necesario que el flujo en el modelo también sea turbulento, y justamente es el rango del número de Reynolds el que define en qué estado se halla el flujo (si es flujo laminar o turbulento) (Herrero y otros, 2009).

Se busca cuantificar parte de los efectos de escala producidos al disminuir, mediante el patrón de escala determinado, el tamaño del dominio estudiado en la modelización matemática de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; en la Tabla 3.1 se pueden revisar las escalas de las variables principales, según lo visto en los capítulos 2 y 3, así mismo, los parámetros considerados se definieron para un flujo a superficie libre, con fondo fijo y sin transporte de sólidos o contaminantes. A través de la calibración y validación de tres modelos numéricos hidrodinámicos: HEC-RAS (1D), IBER (2D) y DELFT (3D) se llegó a la

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

caracterización de las variables del flujo en la confluencia para eventos de retorno de 10 y 25 años, y así se concluyó, que el modelo matemático que representó el problema con mayor aproximación de los resultados respecto a los datos observados fue el modelo hidrodinámico bidimensional IBER. Es así como, el modelo hidrodinámico bidimensional IBER será el considerado en esta parte del trabajo para calcular parte de los efectos por reducir el tamaño del escenario hidrodinámico, de manera que tanto cualitativa como cuantitativamente se analizarán los resultados calculados para tamaño real y reducido.

Las condiciones ensayadas serán las mismas que fueron descritas en las secciones previas de esta tesis; en la Tabla 6.1 se presentan las variables de entrada y condiciones de contorno para los periodos de retorno de 10 y 25 años en tamaño del prototipo y a escala, respectivamente, según los factores mostrados en la Tabla 3.1, las variables y la malla que representa el modelo digital del terreno son los parámetros de entrada utilizados en IBER que fueron ingresados en tamaño del prototipo y a escala para la resolución del problema, al final todos los resultados, incluidos los del modelo físico; fueron graficados en tamaño real:

Variable	Prototipo	Modelo	Escala
$Q_{\text{Suquia}10}$ (m ³ /seg)	454	0.04486	10119.289
$Q_{\text{Cañada}10}$ (m ³ /seg)	210	0.02075	10119.289
$Q_{\text{Suquia}25}$ (m ³ /seg)	675	0.06670	10119.289
$Q_{\text{Cañada}25}$ (m ³ /seg)	328	0.03241	10119.289
$H_{\text{AguasAbajo}10}$ (m)	387.34	9.6835	40
$H_{\text{AguasAbajo}25}$ (m)	388.53	9.71325	40
Δt (seg)	1	0.15	6.324
t_{inicial} (seg)	0	0	6.324
$t_{\text{max.}}$ (seg)	2100	332	6.324
$n_{\text{Manningrío}}$	0.02	0.010817	1.849
$n_{\text{Manningriveras}}$	0.04	0.021633	1.849

Tabla 6.1 Principales variables de entrada y condiciones de contorno para estimar los efectos de escala en el modelo Suquia-Cañada.

Por lo tanto, el caudal a escala para el río Suquia en los eventos con periodos de retorno de 10 y 25 años es respectivamente de $Q_{10}=44.86$ litros/seg y $Q_{25}=66.70$ litros/seg; y para el tramo del arroyo La Cañada el caudal corresponde a $Q_{10}=20.75$ litros/seg y $Q_{25}=32.41$ litros/seg, respectivamente. Otro parámetro de importancia,

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

como lo es el valor de la rugosidad de Manning, también se ha modificado a 0.01 y 0.02 (en el lecho y planicie de inundación, respectivamente) en la escala reducida. En la Figura 6.1 y Figura 6.2 se presentan los resultados calculados en tamaño real y reducido de la profundidad de agua en dirección del eje longitudinal del río Suquía, así como también los medidos en el modelo físico, para los periodos de retorno considerados:

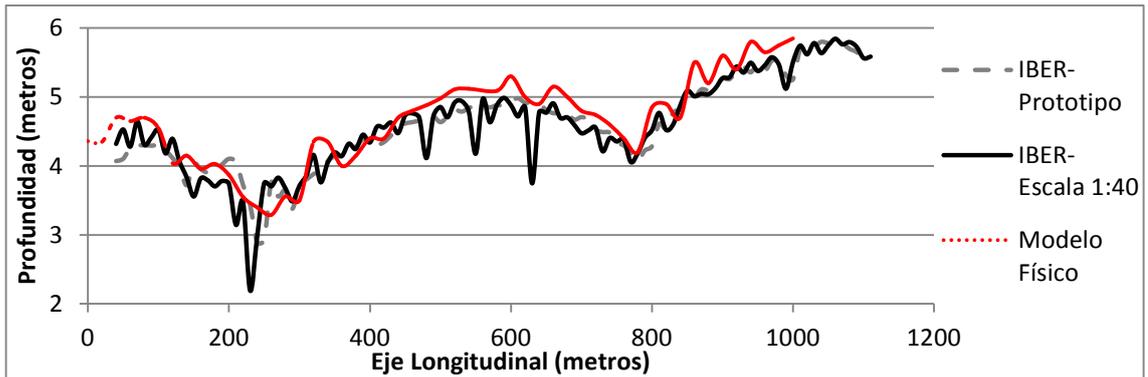


Figura 6.1 Comparación de resultados de la altura de superficie de agua para el periodo de retorno de 10 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.

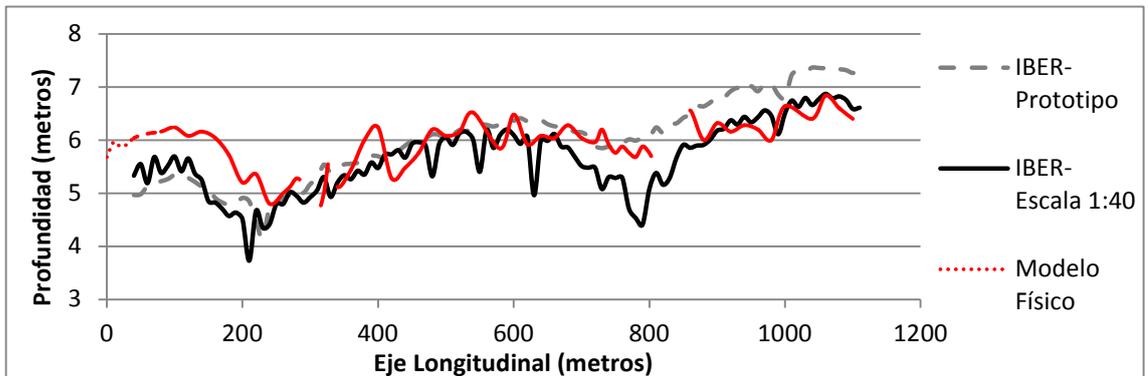


Figura 6.2 Comparación de resultados de la altura de superficie de agua para el periodo de retorno de 25 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.

Los resultados de la profundidad del flujo de las Figura 6.1 y Figura 6.2 representan las mismas tendencias, pero se puede observar mayores fluctuaciones en los valores modelados a escala reducida respecto a los modelados en escala real; también para el periodo de 25 años se puede observar que de la profundidad del flujo modelada en escala reducida es menor que la modelada en escala real, esto al aproximarse a la condición aguas abajo; los resultados en escala reducida parecieran tener menor diferencias respecto a los resultados observados en el modelo físico. A continuación, en la Figura 6.3 y Figura 6.4 se presentan los resultados calculados en

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

tamaño real y reducido de la velocidad media del flujo en dirección del eje longitudinal del río Suquía, así como también las velocidades longitudinales medidas en el modelo físico, para los periodos de retorno de 10 y 25 años:

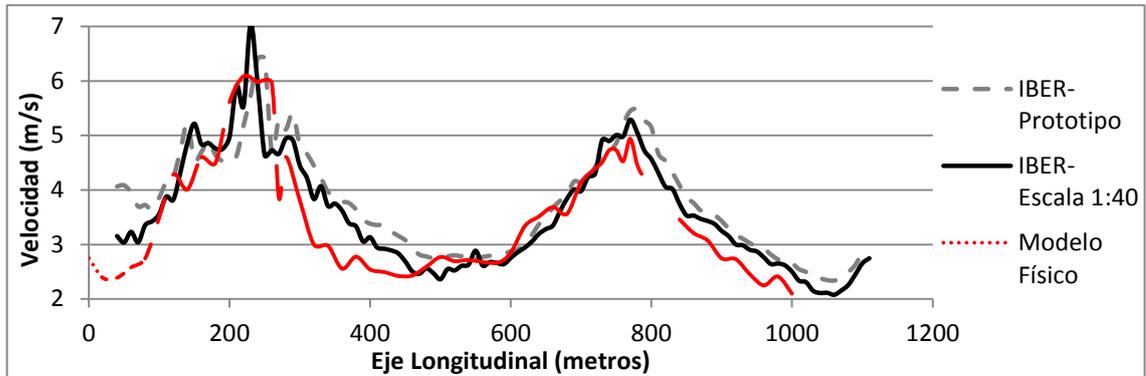


Figura 6.3 Comparación de resultados de la velocidad media longitudinal para el periodo de retorno de 10 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.

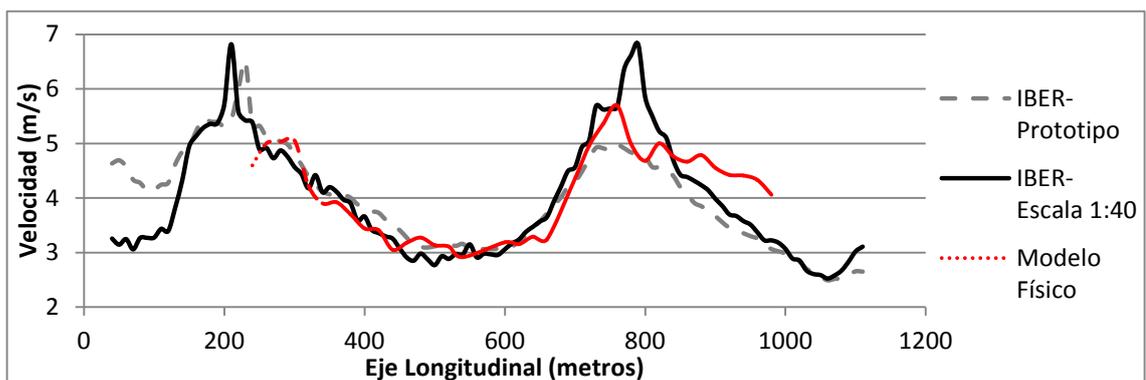


Figura 6.4 Comparación de resultados de la velocidad media longitudinal para el periodo de retorno de 25 años utilizando distintas escalas para la resolución del problema.

En la Figura 6.3 se puede ver que los resultados de velocidad media longitudinal obtenidos del modelo numérico bidimensional IBER a partir de la entrada de variables en tamaño real y escala reducida son bastante similares para el periodo de retorno de 10 años, mientras que, en la Figura 6.4 para el periodo de retorno de 25 años se nota que al modelar en escala reducida se sobreestiman los máximos de las velocidades, respecto a las resultantes al modelar en tamaño real. También, en los dos casos de estudio, se nota que cerca de la condición de frontera aguas arriba parece que se subestiman los resultados de velocidad media longitudinal en escala reducida. En este punto se desea cuantificar la diferencia numérica de los resultados cuando los eventos son modelados en tamaño real y escala reducida, por lo que, en la Tabla 6.2 se presenta la solución de siete valores estadísticos al comparar los resultados de profundidad y velocidad, modelados en tamaño real y en escala reducida para los periodos de recurrencia investigados:

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

	Profundidad 10 años	Profundidad 25 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	4.1220	7.8353	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.1630	0.4311	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0011	0.0143	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF₂)	0.8248	0.5113	$-\infty < \text{EF}_2 \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.8801	1.0496	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.0226	0.3646	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Múltiple (R²)	0.8471	0.7329	$0 < R_2 < +\infty$	1.0000
	Velocidad 10 años	Velocidad 25 años	Rango de Referencia	Valor Óptimo
Error Porcentual (%)	8.7293	9.2755	0-100 (%)	0.0000
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3078	0.3812	$0 \leq \text{MAE}$	0.0000
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0072	0.0255	$0 \leq \text{RRMSE}$	0.0000
Coefficiente de Eficiencia (EF₂)	0.8204	0.5916	$-\infty < \text{EF}_2 \leq 1$	1.0000
Coefficiente de Determinación (CD)	0.8571	0.6968	$0 < \text{CD} < +\infty$	1.0000
Desviación Media (BIAS)	0.2092	-0.0087	$-\infty < \text{BIAS} < +\infty$	0.0000
Coefficiente de Determinación Múltiple (R²)	0.8821	0.7156	$0 < R_2 < +\infty$	1.0000

Tabla 6.2 Análisis estadístico de los resultados de nivel y velocidad calculados por el modelo bidimensional IBER; se comparan los resultados obtenidos con datos de entrada en tamaño de prototipo respecto a los obtenidos con datos de entrada en escala reducida para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años.

De los estadísticos de la Tabla 6.2 se puede concluir que aunque existen diferencias por los efectos de escala en el modelamiento del sector de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía, los resultados tienen tendencias similares y una diferencia promedio menor al diez por ciento, los resultados expuestos han sido obtenidos en el módulo hidrodinámico bidimensional IBER con datos de entrada en tamaño de prototipo y datos reducidos en una escala de longitudes no distorsionada respecto a la vertical de 1:40. A continuación en las Figura 6.5, Figura 6.6, Figura 6.7 y Figura 6.8 se presentan los resultados en áreas coloreadas de velocidad y profundidad, con datos de entrada en escala real y reducida para los periodos de retorno de 10 y 25 años. Se comenta que en todos los resultados de calado de agua y velocidad media superficial del flujo que a continuación se exponen tienden a comportamientos similares (los obtenidos con datos de entrada en tamaño real respecto a los obtenidos aplicando la escala de longitudes 1:40); aunque si se nota una diferencia en los valores mínimos y máximos en la magnitud de las variables.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

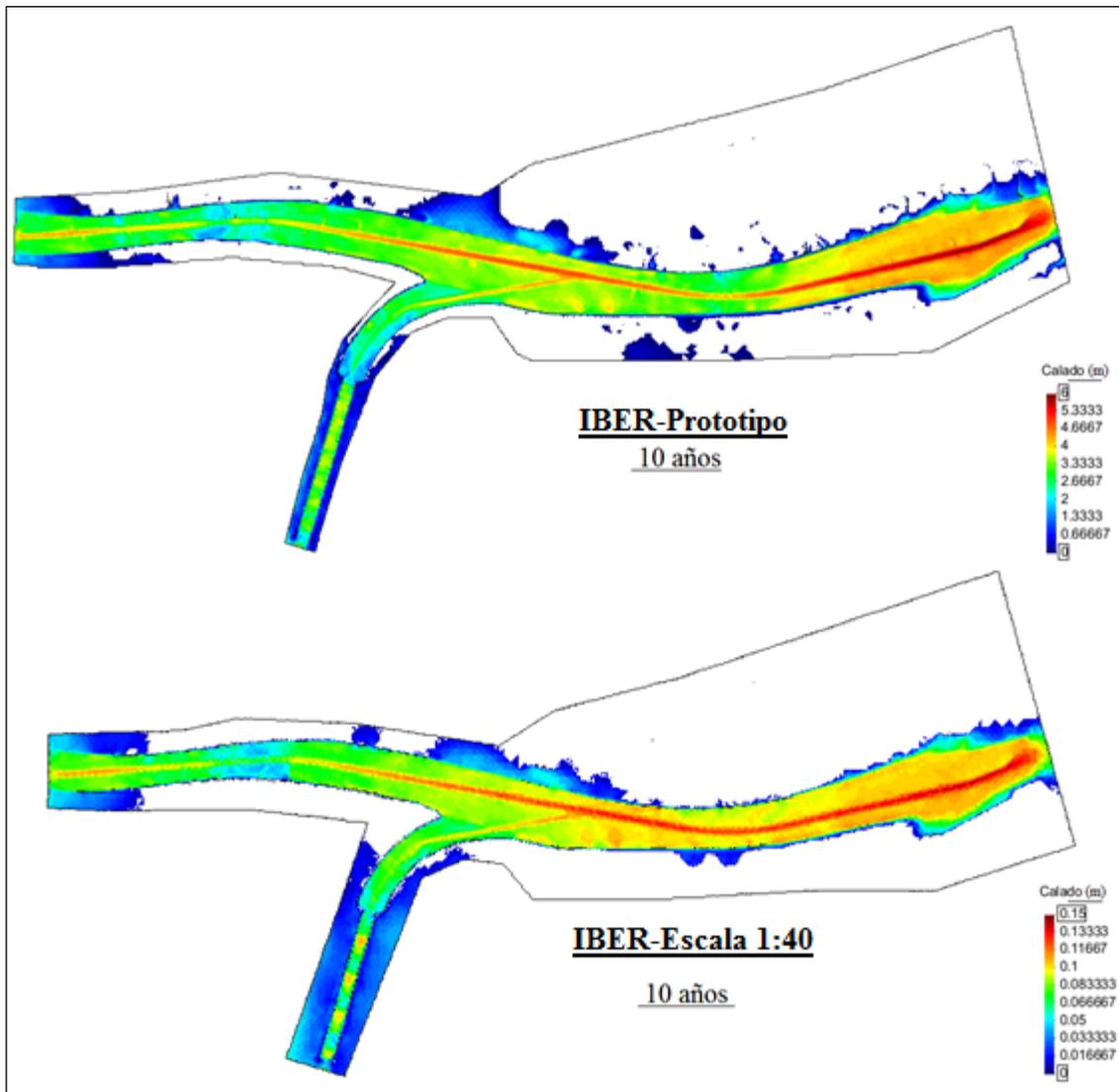


Figura 6.5 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

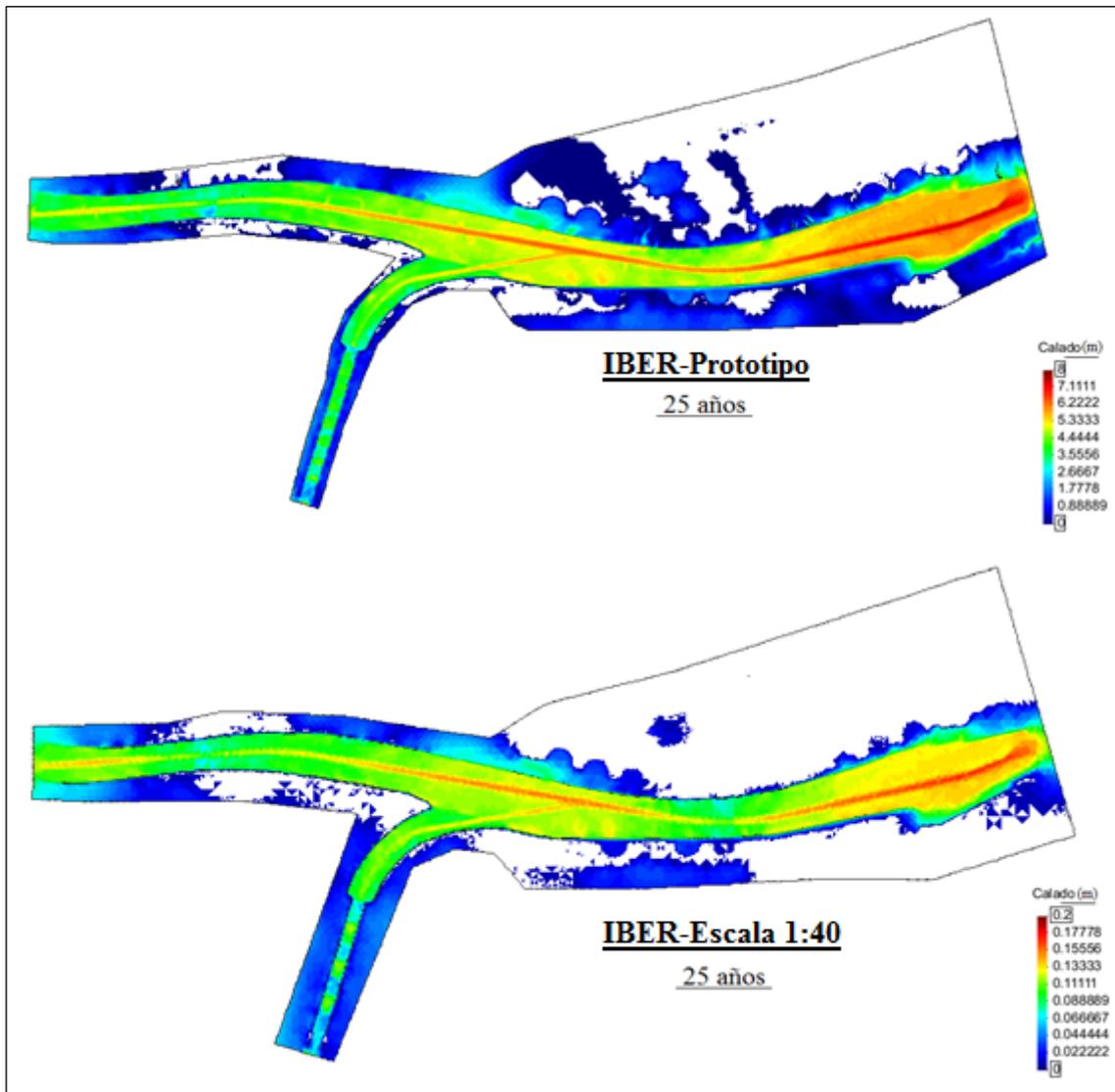


Figura 6.6 Áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 25 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

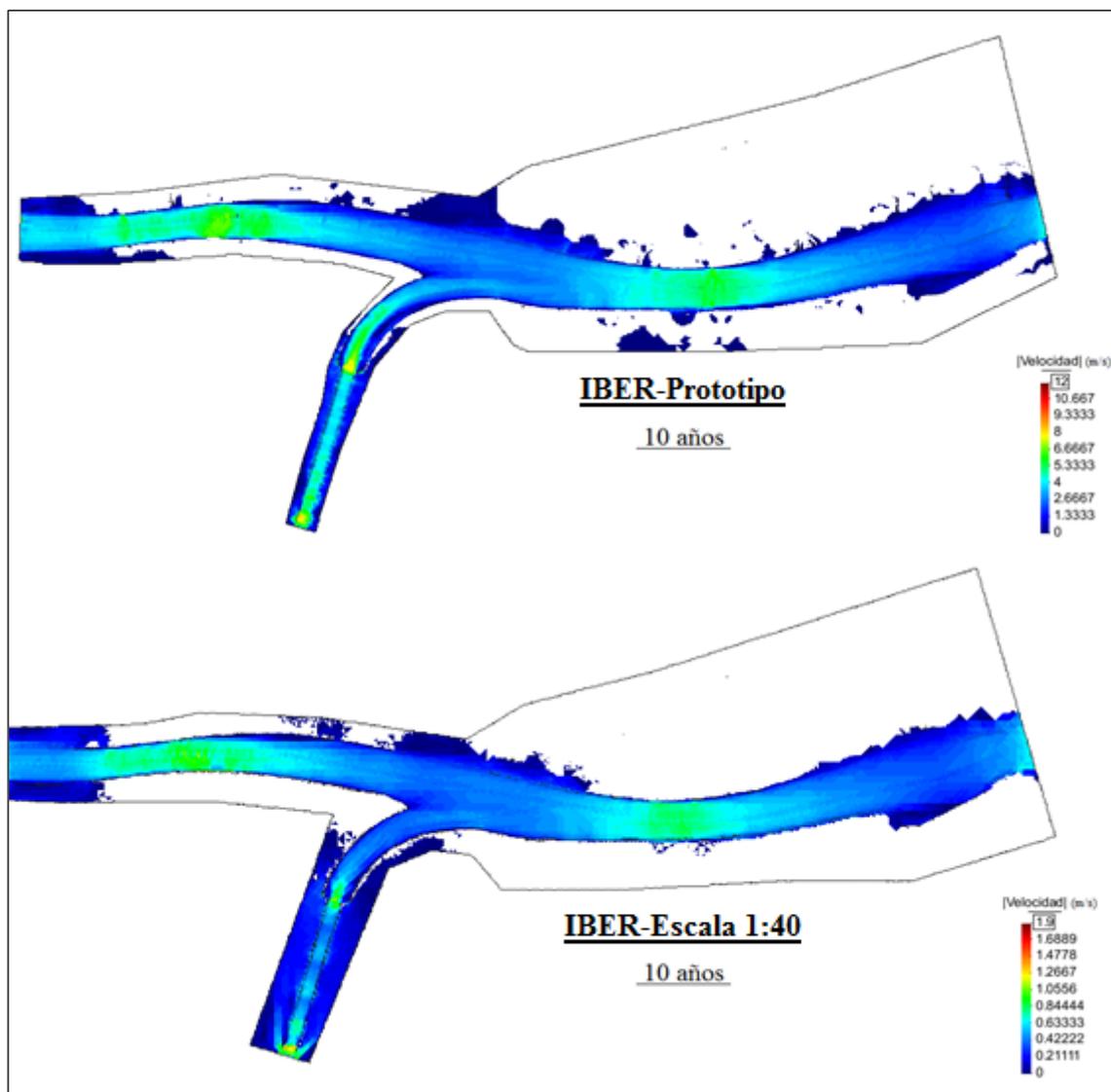


Figura 6.7 Áreas coloreadas que representan la velocidad media bidimensional del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

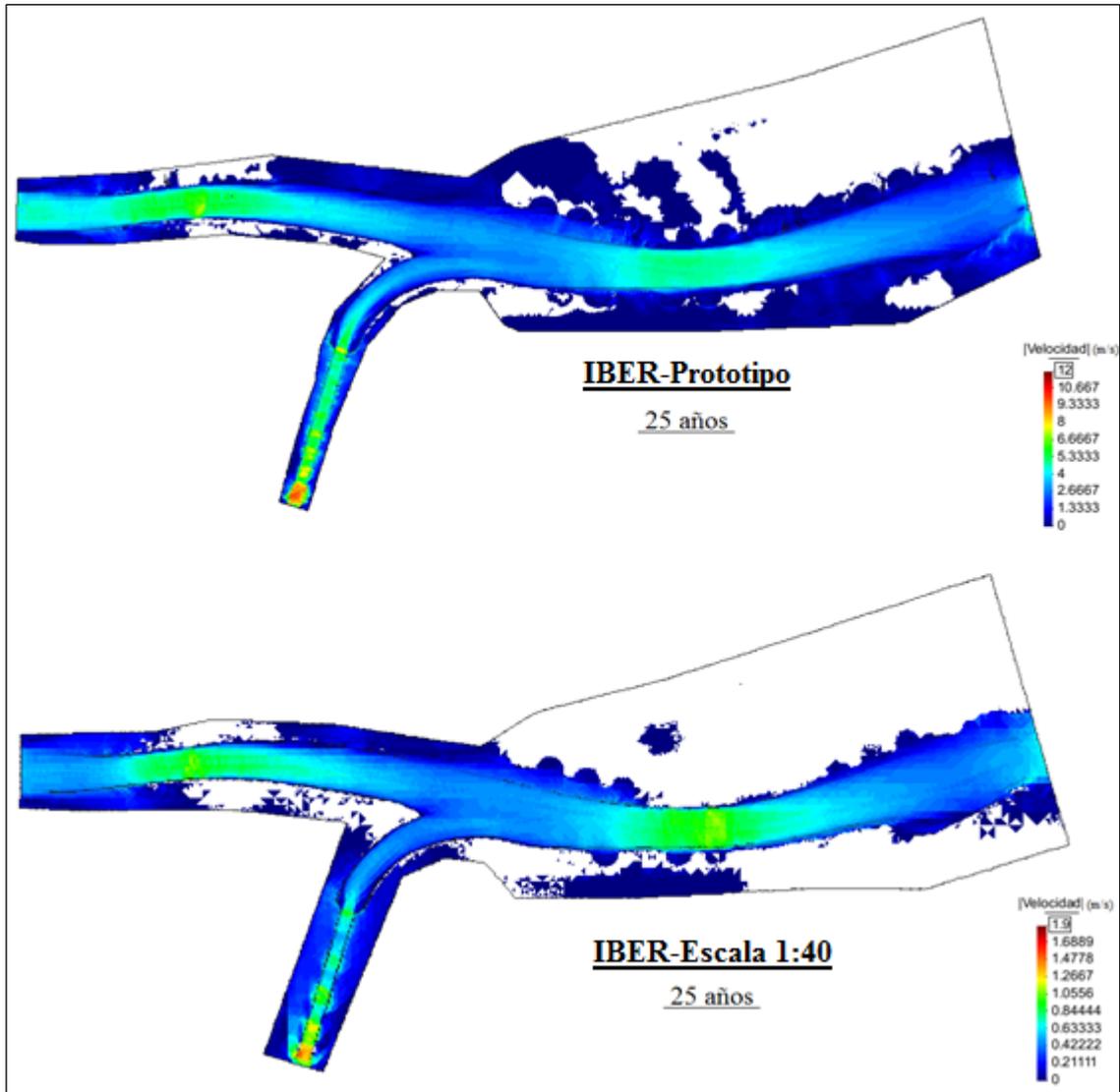


Figura 6.8 Áreas coloreadas que representan la velocidad media bidimensional del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 25 años con datos de entrada en tamaño de prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.

Finalmente, en las Figura 6.9 y Figura 6.10 se presentan los números de Froude para los dos escenarios considerados y escalas determinadas; por medio de estas figuras también se puede concluir que aunque los efectos de escala obviamente existen, las escalas han sido calculadas de manera que el régimen de flujo se mantenga igual en el escenario a escala respecto al prototipo en el sector de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía para los periodos de retorno de 10 y 25 años considerados, y por lo tanto los valores del número de Froude en las figuras a continuación serán similares.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

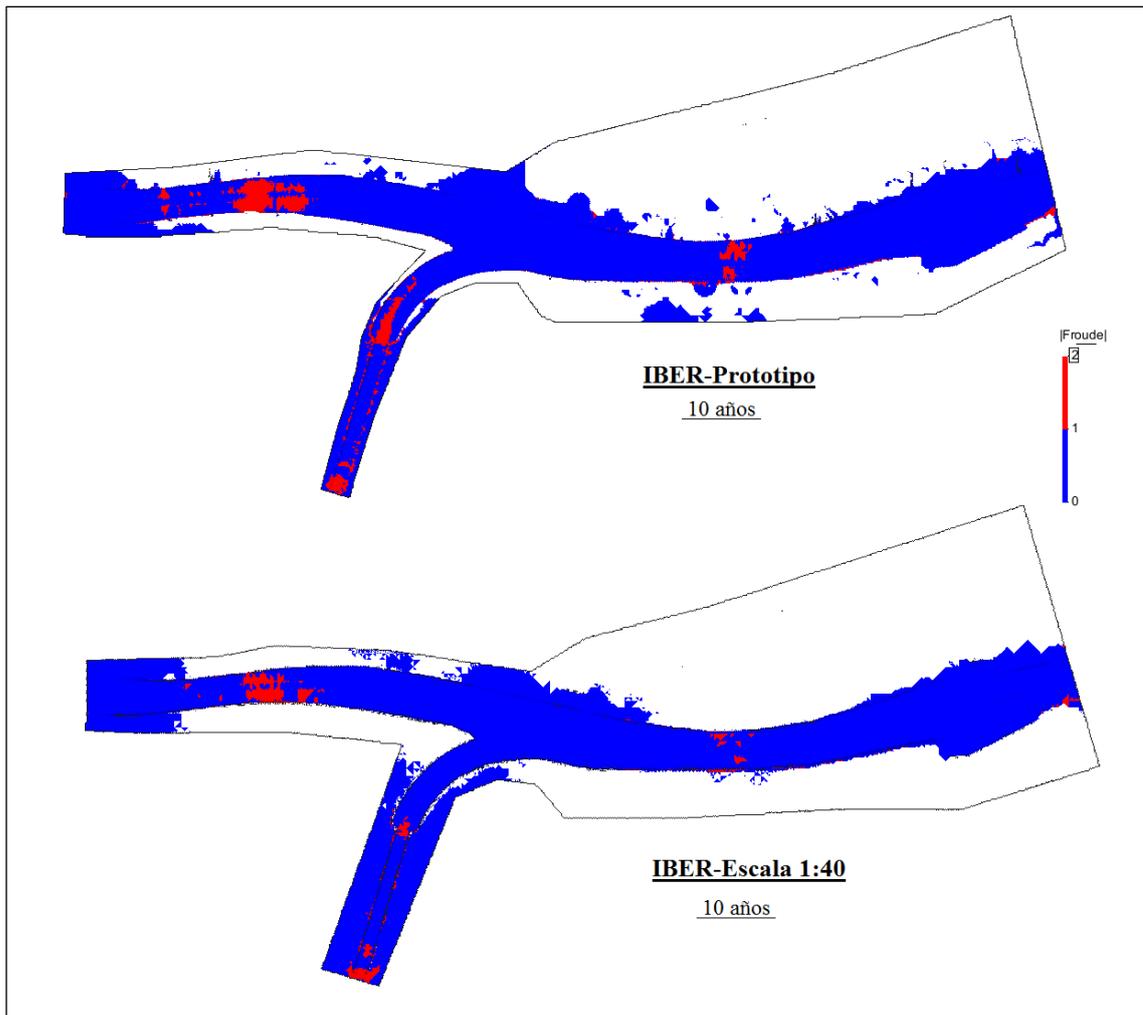


Figura 6.9 Áreas coloreadas que representan el número de Froude del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR
FLUJOS EN CAUCES NATURALES

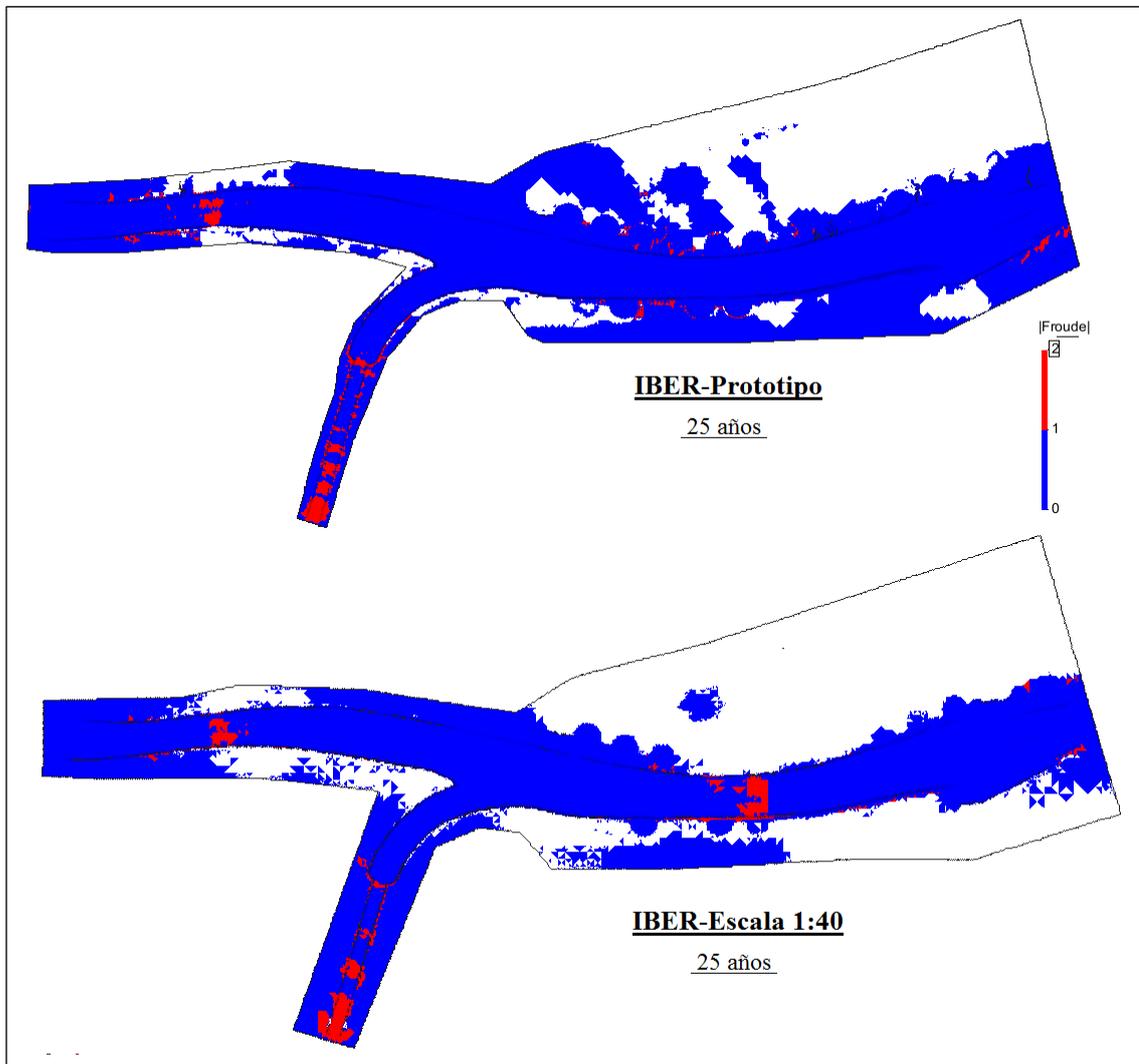


Figura 6.10 Áreas coloreadas que representan el número de Froude del flujo en un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada para un periodo de retorno de 10 años con datos de entrada en tamaño prototipo y a escala reducida de longitudes correspondiente a 1:40.

CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES

7. Conclusiones

En el estudio de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada, a través de modelos hidrodinámicos, se buscaba la caracterización de este flujo a superficie libre para describir y obtener las principales variables físicas de importancia en el fenómeno para los períodos de recurrencia de 10 y 25 años; es así que, con la aplicación de varias técnicas de modelación numérica y física de la hidráulica en canales abiertos se desprendieron las conclusiones que son descritas a continuación.

- Varias técnicas para obtener las magnitudes de las variables de flujo en el modelo físico de fondo fijo de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba) han sido tomadas en cuenta; el modelo hidráulico fue desarrollado con semejanza de Froude ejecutado en escala no distorsionada de longitudes $L=1:40$ y permite analizar el tramo del río Suquía comprendido entre los puentes Centenario y Avellaneda, de aproximadamente 1000 metros de longitud, con un ancho efectivo variable de 70 a 280 metros en prototipo, incluyendo la desembocadura del arroyo La Cañada y el parque Las Heras localizado aguas abajo del mencionado arroyo. Respecto a las técnicas experimentales, en este trabajo se aplicó la técnica de PTV (Velocimetría por Seguimiento de Partículas - Particle Tracking Velocimetry) para el periodo de retorno de 25 años; se midió la velocidad media en el plano superficial del flujo con esta técnica entre las progresivas 240 a 980 metros del tramo correspondiente al río Suquía, se obtuvo velocidades con esta técnica experimental en 35 secciones transversales. También se utilizaron datos de mediciones realizadas en estudios previos con la técnica del ADV y Tubo Pitot correspondientes al período de retorno de 10 años entre la progresiva 0 a 1000 metros el modelo físico del río Suquía. Los datos obtenidos fueron procesados y utilizados en la calibración y validación de los modelos matemáticos desarrollados.
- A través del análisis de sensibilidad de las variables en los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D, se llegó a la conclusión de que la variable de mayor importancia en la calibración de un flujo a superficie libre es la rugosidad o resistencia que ejercen las paredes y el fondo del canal en el flujo. Los factores más importantes tanto para canales artificiales y naturales que

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

afectan el valor propuesto de la rugosidad son: la rugosidad superficial o de la pared del revestimiento, la presencia de vegetación, la irregularidad de la sección, la alineación del canal en planta, la sedimentación o socavación, obstrucciones, el tamaño y forma del canal, el tirante y caudal, el material en suspensión y la carga de fondo. En este caso, el valor propuesto de la rugosidad al calibrar cada uno de los modelos numéricos con los datos experimentales obtenidos en el modelo hidráulico de la confluencia, es el de una rugosidad de Manning de 0.02 en el cauce y de 0.04 en las riberas de inundación. Otros datos de entrada de importancia en los modelos numéricos son las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo de la corriente, el valor de la fuerza gravitatoria, las constantes relacionadas al estado del fluido como lo son la densidad y la viscosidad, los caudales de entrada considerando cierto periodo de recurrencia, los coeficientes de expansión y contracción del flujo estacionario, las variables de tiempo de simulación para que los modelos matemáticos tengan un comportamiento estable, datos de los niveles iniciales del flujo, coeficientes que relacionan la tolerancia del mallado en la geometría del modelo digital del terreno, y finalmente, es de importancia especificar la precisión con la que se desea al obtener los diferentes resultados de las variables del flujo estudiado.

- Del análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados de los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D; y con la ayuda de siete índices estadísticos que relacionan estos resultados respecto a los datos experimentales obtenidos en el modelo físico de la confluencia, índices con valores aceptables en los tres esquemas numéricos antes citados, se llegó a la conclusión de que el modelo numérico bidimensional IBER es el que representa de la mejor manera los resultados respecto a los datos observados; el motivo de esta mejor representación, se explica por la característica de la confluencia estudiada que presenta propiedades de aguas poco profundas o flujos de superficie libre en aguas someras, con la relación de ancho-profundidad pequeña donde dominan los procesos bidimensionales y por lo tanto se obtienen buenos resultados al promediar las variables verticales respecto a la profundidad del flujo. También se puede remarcar que según los valores de los estadísticos de los resultados del modelo unidimensional HEC-RAS, lo calculado en este modelo representa un aceptable estado de forma respecto a los datos medidos, aunque subestima las

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

velocidades en los sectores de máximos y mínimos. Otra observación importante es que, en el modelo tridimensional DELFT se estima adecuadamente los valores máximos y mínimos de las variables de velocidad, aunque se subestiman las profundidades en el flujo y también se presenta una deficiencia en la tendencia de forma respecto a los datos medidos a lo largo del río Suquía.

- Con los resultados de los esquemas de las áreas inundadas obtenidos en el modelo numérico bidimensional IBER, se identificó las áreas que serían afectadas al considerar lluvias en los periodos de recurrencia correspondientes a 10 y 25 años en los alrededores de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; el área afectada en el evento de 25 años incluye una gran inundación de las vías de la costanera (aproximadamente de un metro de profundidad), así como se afecta a construcciones aledañas a las riberas de inundación; mientras que, para el periodo de retorno de 10 años, se observa que el agua transitará en su mayoría por las riberas de inundación del mismo río sin que se afecte con gravedad las estructuras y vías aledañas.
- Analizando los resultados de los campos de velocidad en el plano, se observó que este tramo que se analiza alrededor de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía tiene un comportamiento similar al de confluencias observadas en estudios e investigaciones previas (confluencias con relación de ancho-profundidad pequeña); así se observó bien definida la zona de estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia, las zonas de capa de corte (en las paredes del canal del río Suquía y en la curvatura del arroyo de la Cañada antes de la confluencia) y la interfase de mezcla en la combinación de los dos flujos también fueron ubicadas, se observó separación del flujo aguas abajo de la zona de estancamiento y en las zonas cercanas al pequeño vertedero existente en La Cañada; la aceleración del flujo alcanzando su máxima velocidad después de la confluencia y zonas de recuperación del flujo aguas abajo de esta zona de aceleración también fueron bien definidas.
- Finalmente, del análisis de los resultados del flujo en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; resultados calculados en el modelo bidimensional IBER con datos de entrada en tamaño real y en escala reducida a 1:40 (escala de longitudes no distorsionada respecto a la vertical), se concluyó que los efectos

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

de escala no afectan a los resultados calculados, por lo que se observó que las variables de interés son representativas y tienen las mismas tendencias en todos los escenarios considerados. Del análisis estadístico de las variables calculadas respecto a los datos observados se concluyó que existen mayores diferencias en los efectos de escala de los resultados al considerar un periodo de retorno de 25 años, mientras que uno de 10 años presenta menores diferencias.

CAPÍTULO 8
REFERENCIAS

8. Referencias

Abouali M. 2013. “Developing a Nested Hydrodynamical Model for San Diego Bay, Using DELFT3D and DELFTDASHBOARD”. Tesis de Maestría. San Diego State University.

Barbeito O. L., Quintana S. F. 1998. “Carta Geológica Geomorfológica de la Ciudad de Córdoba y su Entorno. Fotointerpretacion”. Córdoba, Argentina.

Best J. L. 1987. “Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology”. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.

Castelló E. 2009. “Determinación de la Capacidad Hidráulica del Canal Los Molinos – Córdoba”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba.

Castelló E., Miatelo F., Moya G., Orso M. 2001. “Flujo a Superficie Libre Avanzado”. Informe Técnico Final en la Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Córdoba.

Cea L. 2010. “Modelización de la Turbulencia en Aguas Poco Profundas”. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medioambiente. España.

Cea L., Bladé E. 2009. “El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de ingeniería fluvial y costera”. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medioambiente. España.

Cea L., Vázquez-Cendón M. E., Puertas J. 2009. “Evaluación de corrientes litorales y frentes de marea mediante modelización bidimensional en ríos y desembocaduras de ríos”. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medioambiente. España.

Cea L., Vázquez-Cendón M. E., Puertas J. 2009. “Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable”. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medioambiente. España.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

- Cenedese A., Querzoli, G. 1997. "Lagrangian statistics and transilient matrix measurements by PTV in a convective boundary layer". *Measurements Science Technology*, Vol. 8.
- Chaudhry M. H. 2008. "Open-Channel Flow". University of South Carolina. Springer Science+Business Media, LLC. Second Edition.
- Chow V. T. 1994. "Hidráulica de Canales Abiertos". McGraw Hill. University of Illinois.
- Chow V. T. 1994. "Hidrología Aplicada". McGraw Hill. University of Illinois.
- Delgado C., Aberich M. V., López-Vera F. 2005. "Recursos Hídricos: Conceptos básicos y estudios de casos en Iberoamérica". Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Deltares. 2012a. "Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments". DELFT3D-FLOW User Manual.
- Deltares. 2012b. "Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness". DELFT3D-QUICKIN User Manual.
- Deltares. 2012c. "Generation and manipulation of curvilinear grids for DELFT3D-FLOW and DELFT3D-WAVE". DELFT3D- RGFGRID User Manual.
- Ettema R. 2000. "Hydraulic Modeling: Concepts and Practice". American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Ettema R., Mutel F. C. 2004. "Hans Albert Einstein: Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport by Rivers". American Society of Civil Engineers (ASCE).
- García M. H. 2008. "Processes, Measurements, Modeling, and Practice". *Manuals of Practice*. American Society of Civil Engineers (ASCE).

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

García M., Niño Y. 2003. "Flow and Transport Equations in Surface Waters". CEE 498 Environmental Hydrodynamics. Spring Sem.

Gherardelli C. 2007. "Mecánica de Fluidos". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Giles R. V., Evett J. B., Liu C. 1994. "Mecánica de los Fluidos e Hidráulica". McGraw Hill. Tercera Edición.

Gizzi S. L. 2012. "Caracterización experimental del flujo en el modelo físico tridimensional del Río Suquía". Informe Técnico Final de Practicas Supervisadas para el grado de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Córdoba.

González M., Ollero A., Romeo R. 2007. "Estrategia Nacional de Restauración de Ríos. Las Alteraciones Geomorfológicas en los Ríos". Ministerio de Medio Ambiente de España. Universidad Politécnica de Madrid.

Griffies S., Boening C., Bryan F., Chassignet E., Gerdes R., Hasumi H., Hirst A., Treguier A. M., Webb D. 2000. "Development in ocean climate modeling". Ocean Modelling.

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. 2012. "Manual de Referencia Hidráulico". Gobierno de España. IBER.

Hasselaar R. W. 2012. "Development of a Generic Automated Instrument for the Calibration of Morphodynamic DELFT3D Model Applications". Tesis de Maestría. DELFT University of technology. Deltares.

Heller V. 2011. "Scale effects in physical hydraulic engineering models". Journal of Hydraulic Research. School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, Highfield, Southampton, SO17 1BJ, UK.

Herrero H. 2011. "Inestabilidades en Aguas Someras en Confluencias". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Herrero H., Ragessi M., García C. M., Plencovich G., Díaz A., Rodríguez A. 2009. “Efectos de Escala en la Caracterización del Flujo en las Obras de Evacuación de Presas a Partir de Modelos Físicos”. Instituto Superior de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Córdoba.

Hyun B. S., Balachandar R., Yu K., Patel V.C. 2003. “PIV/LDV Measurements of Mean Velocity and Turbulence in a Complex Open Channel Flow”. Hidrosience & Engineering. University of Iowa.

Ishikawa M., Murai Y., Yamamoto F. 2000. “Numerical validation of velocity gradient tensor particle tracking velocimetry for highly deformed flow fields”. Meas. Sci. Technology.

Julien Y. P. 2002. “River Mechanics”. Cambridge University Press.

Lábaque M. 2010. “Propuesta para la Confeción de Planes de Emergencia por Rotura de Presas en la Provincia de Córdoba. Aplicación al Dique San Roque”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Lesser R. G. 2009. “An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling”. Tesis de Doctorado. Delft University of Technology and of the Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Nash J. E., Sutcliffe J. V. 1970. “River flow forecasting through conceptual models part I”. A discussion of principles, Journal of Hydrology.

Ohmi K. Dao H. 1998. “New particle tracking PIV using improved relaxation method”. Proc. 8th Int. Symp.on Flow Visualization, Sorrento, Italia.

Panton L. R. 2005. “Incompressible Flow”. John Wiley y Sons, Inc. Third Edition.

Patalano A., Brevis W., García C. M., Rodríguez A. 2013. “PTVlab, Una Herramienta Gráfica para el Procesamiento Digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas”. Resumen Extendido, III Simposio Sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Pozzi Piacenza C., Herrero H., Furlan P., Ragessi I. M., Damian S. M., López G, Pedocchi F., García C. M. 2013. “Simulación Numérica y Experimental del Flujo en una Confluencia”. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol. XXXII, págs. 3727-3739.

Reyna S. 1999. “Informe Final. Obra: Avenida Costanera Margen Sur. Tramo Puente Sagrada Familia – Puente Turín”. Área de Hidrología e Hidráulica. Universidad Nacional de Córdoba.

Rhoads B. L. y Sukhodolov A. 2008. “Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface”. Water Resources Research. Vol. 44.

Sánchez V. A. M. 1995. “Técnicas de Modelación en Hidráulica”. Alfaomega.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina.
<http://www.hidricosargentina.gov.ar/>

Streeter V. L., Wylie E. B. 1988. “Mecánica de fluidos”. Octava edición. Editorial McGraw-Hill.

UNC-SSRH Cba. 2011. “Convenio para la realización del Modelo Físico de la Confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía”. Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba.

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2010. “River Analysis Sistem Hydraulic Reference Manual”. Version 4.1.0.

Vázquez R. F. 2003. “Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems”. Tesis de Doctorado. Department of Civil Engineering, K. U. Leuven, Lovaina.

White M. F. 1991. “Viscous Fluid Flow”. University of Rhode Island.

Wolfgang R. 1993. “Turbulence Models and Their Application in Hydraulics: A state-of-the-art review”. International Association for Hydraulic Research.

EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES

Publicaciones

PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN, EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA, Córdoba Mayo de 2013.

PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA APTA PARA EL CONSUMO HUMANO, Córdoba Mayo de 2013.