



10

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Desarrollo de corrientes secundarias en confluencias

TESIS

para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

Gastón Alejandro Priego Hernández

Director:

Dr. José Guadalupe Fabián Rivera Trejo

Cunduacán, Tabasco, México.

Enero de 2018



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO DIR/DAIA/88/2018
FECHA: 23 de Enero 2018
ASUNTO: Autorización de Impresión
Definitiva

C. M.I.H. GASTÓN ALEJANDRO PRIEGO HERNÁNDEZ
PASANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"DESARROLLO DE CORRIENTES SECUNDARIAS EN CONFLUENCIAS"

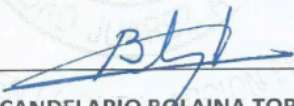
Para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. José Guadalupe Fabián Rivera Trejo ha sido el Director de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA


DR. CANDELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo

Dr.CBT/Dr. JBF/apl.



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 22 de Enero de 2018

MEM/DCI/001/2018

PARA: DR. CANDELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRIA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"DESARROLLO DE CORRIENTES SECUNDARIAS EN CONFLUENCIAS"

Desarrollado por el C. **M.I.H. GASTÓN ALEJANDRO PRIEGO HERNÁNDEZ** del **Doctorado en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
PRESIDENTE

DRA. KARLA MARÍA AGUILAR
CASTRO
SECRETARIO

DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN
RIVERA TREJO
VOCAL 1

DR. GABRIEL SOTO CORTES
VOCAL 2

DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
VOCAL 3

DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ
VOCAL 4

DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ RAMÍREZ
VOCAL 5

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto físicamente como digitalmente la tesis de grado denominada "Desarrollo de corrientes secundarias en confluencias", de la cual soy autor y titular de los derechos de autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada será única y exclusivamente para discusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes mencionado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco, a los 23 días del mes de enero del año 2018.

AUTORIZO



MIH. GASTÓN ALEJANDRO PRIEGO HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su paciencia; por ser mis fieles acompañantes en mi trayectoria académica y profesional.

A mi asesor de tesis, Dr. Fabián Rivera Trejo; por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de esta tesis; por su apoyo y amistad.

A mis profesores y amigos que estuvieron siempre atentos a la realización de este trabajo de investigación.

19

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, la División Académica de Ciencias Básicas y la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, por el apoyo otorgado para estudiar el Doctorado en Ciencias en Ingeniería.

Y en especial, agradezco a Dios por cumplir cada día su propósito en mí.

*Dedicado a mi esposa Sofía y a mis hijos
Alexandra, Daniela y Maximiliano.*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	x
SIMBOLOGÍA	xi
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Confluencia en ríos de planicie	1
1.2. Finalidad del proyecto de investigación	2
1.3. Estructura del informe	3
2. DINÁMICA DE FLUJO Y SEDIMENTO EN CONFLUENCIAS	5
2.1. Momentos de flujos	5
2.2. Zonas hidrodinámicas de una confluencia	8
2.2.1. Zona de estancamiento del flujo	9
2.2.2. Interfaz de mezclado	11
2.2.3. Zona de recuperación del flujo	12
3. CORRIENTES SECUNDARIAS	14
3.1. Generalidades	14
3.2. Enfoque Rozovskii	17
3.3. Velocidades secundarias desarrolladas y no desarrolladas	23
3.4. Velocidades secundarias en confluencias	26

	Pág.
4. MEDICIONES DE CAMPO	31
4.1. Perfiladores acústicos Doppler	31
4.2. Principio de operación	32
4.3. Recolección de datos	38
4.4. Calibración de equipos	39
4.5. Procesamiento de datos	41
4.6. Sonda Multihaz SeaBeam 1000	44
5. MODELACIÓN NUMÉRICA	46
5.1. Generalidades	46
5.2. Modelación numérica con Iber	48
5.3. Ecuaciones hidráulicas en Iber	49
5.4. Entorno de trabajo Iber	51
5.4.1. Preproceso	52
5.4.2. Proceso	58
5.4.3. Posproceso	59
6. CASO DE APLICACIÓN: CONFLUENCIA GRIJALVA – CARRIZAL	62
6.1. Localización	62
6.2. Batimetría de la confluencia Grijalva - Carrizal	65
6.3. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva - Carrizal	69
6.3.1. Velocidad en planta	69
6.3.2. Velocidad secundaria	80
6.4. Determinación de los momentos de flujos	94
6.5. Modelación de la hidrodinámica	99

	Pág.
7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	104
7.1. Conclusiones	104
7.2. Recomendaciones	106
7.3. Investigaciones futuras	107
REFERENCIAS	108
ANEXOS	115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Esquema de convergencia de dos canales tributarios T_1 y T_2 para formar un solo canal continuo, donde M_1 y M_2 son los momentos correspondientes a los canales tributarios.	6
Figura 2.2. Relación del momento de flujo (M_r) como función de la descarga (Q_r) en confluencias (tomado de Leite, 2011).	7
Figura 2.3. Zonas hidrodinámicas en confluencias.	9
Figura 2.4. Confluencia con ángulo de unión mayor a 90° .	10
Figura 2.5. Vórtices generados para: a) Momento de flujo mayor que la unidad y b) Momento de flujo menor que la unidad.	12
Figura 2.6. Zona de recuperación del flujo aguas abajo de la confluencia de los dos afluentes.	13
12 Figura 3.1. Velocidad transversal para una curva de un río (adaptado de: Seo <i>et al.</i> , 2008).	16
Figura 3.2. Distribución vertical de la velocidad transversal (Song <i>et al.</i> , 2012). a) Datos obtenidos en laboratorio por Rozovskii; b) datos obtenidos en laboratorio por Guymer.	22
Figura 3.3. Corriente secundaria para un canal curvo.	23
Figura 3.4. Distribución de la velocidad transversal u . Velocidades secundarias no desarrolladas (vista en planta).	24
Figura 3.5. Distribución de la velocidad transversal u . Velocidades secundarias desarrolladas.	25
Figura 3.6. Dirección del flujo, corrientes secundarias, celdas helicoidales y la capa de cizalladura para una confluencia.	27
Figura 3.7. Componentes del vector velocidad. a) En una columna de agua (adaptación de Winterwerp <i>et al.</i> , 2006). b) Velocidad secundaria perpendicular a la velocidad primaria que va en dirección aguas abajo (adaptado de Lane <i>et al.</i> , 2000).	29
Figura 4.1. Pulso acústico emitido por el transductor del ADCP. a) El haz es reflejado por los sedimentos en suspensión; b) El cambio de frecuencia generada por los sedimentos es medido por el transductor.	32

	Pág.
Figura 4.2. Configuración de los haces acústicos de ADCP utilizados.	33
Figura 4.3. Componente vertical (V_V) y componente horizontal (V_H) del vector velocidad medida en paralelo en la dirección de la trayectoria acústica (adaptado de Muller <i>et al.</i> , 2009).	34
Figura 4.4. Área de medición por equipos acústicos. a) Zona ciega del ADCP; b) áreas estimadas por métodos de interpolación.	35
Figura 4.5. Vector velocidad del agua y el barco en un punto medido por el ADCP (adaptado de Simpson, 1993).	37
Figura 4.6. Trayectoria arbitraria de la margen izquierda a la margen derecha en la medición del flujo de un río.	39
Figura 4.7. Equipos acústicos utilizados: a) Perfilador StreamPro de la Teledyne; b) Perfilador RiverCat de la SonTek; c) Perfilador RiverRay de la Teledyne.	40
Figura 4.8. Multihaz SeaBeam 1000.	44
Figura 5.1. Interfaz de mezclado (líneas punteadas color naranja) formada por la unión entre los ríos Grijalva y Carrizal.	47
Figura 5.2. Módulo de cálculo en Iber.	49
Figura 5.3. Resumen de las etapas del modelo numérico.	52
Figura 5.4. Formatos de diseño de geometría generadas, prediseñadas y de los modelos digitales de elevación.	53
Figura 5.5. Coeficiente de rugosidad de Manning o uso de suelo predeterminados en el entorno Iber.	56
Figura 5.6. Representación comparativa de mallas estructuradas y no estructuradas respecto al error cordal.	57
Figura 5.7. Datos del problema en el entorno Iber.	58
Figura 5.8. Ventana del software Iber que muestra la evolución del cálculo del modelo numérico.	59
Figura 5.9. Ventana de resultados del modelo numérico Iber.	60
Figura 6.1. Localización de la confluencia en estudio.	62
Figura 6.2. Secciones transversales en la confluencia Grijalva - Carrizal donde se aforó con el ADCP RiverCat para los años 2013 - 2015.	63

	Pág.
Figura 6.3. Secciones transversales en la confluencia Grijalva - Carrizal donde se aforó con el ADCP RiverRay para el año 2016.	64
Figura 6.4. Modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva – Carrizal, para los años del 2013 al 2015.	66
Figura 6.5. Modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva - Carrizal. a) Obtenida con el equipo Multihaz SeaBeam 1000; b) Se muestra un área del cauce del río Grijalva (cuadro azul).	67
Figura 6.6. Modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva - Carrizal. a) Obtenida con el equipo ADCP RiverRay, correspondiente al año 2016; b) Se muestra un área del cauce del río Grijalva (cuadro azul).	68
Figura 6.7. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Los vectores indican la velocidad en planta y la gama de colores representa la magnitud del vector de velocidad en planta de las mediciones realizadas en el 2013; b) Se muestran las líneas de tendencia generadas por software TecPlot.	71
Figura 6.8. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Los vectores indican la velocidad en planta y la gama de colores representa la magnitud del vector de velocidad en planta de las mediciones realizadas en el 2014; b) Se muestran las líneas de tendencia generadas por software TecPlot (líneas negras).	72
Figura 6.9. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Los vectores indican la velocidad en planta y la gama de colores representa la magnitud del vector de velocidad en planta de las mediciones realizadas en el 201; b) Se muestran las líneas de tendencia generadas por software TecPlot (línea café) y la línea negra punteada señala la posición de la interfaz de mezclado medida.	73
Figura 6.10. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para el año 2016 en la confluencia Grijalva - Carrizal. Las líneas de color azul, blanco y rojo representan la tendencia del flujo para el río Carrizal, Grijalva y la confluencia Grijalva – Carrizal respectivamente.	74
Figura 6.11. Secciones transversales correspondiente al río Carrizal donde se aforó con el ADCP RiverRay.	75

	Pág.
Figura 6.12. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para condiciones de caudal bajo en el río Carrizal. La línea azul representa la tendencia del flujo	76
Figura 6.13. Secciones transversales correspondientes al río Grijalva donde se aforó con el ADCP RiverRay.	77
Figura 6.14. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para condiciones de caudal bajo en el río Grijalva. La línea blanca representa la tendencia del flujo.	77
Figura 6.15. Secciones transversales correspondientes al río Grijalva donde se aforó con el ADCP RiverRay.	79
Figura 6.16. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para condiciones de caudal bajo en la confluencia Grijalva - Carrizal. Las líneas roja y azul representan la tendencia del flujo para la confluencia y para el río Carrizal, respectivamente.	79
Figura 6.17. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 16; b) Sección 15; c) Sección 14.	81
Figura 6.18. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 13; b) Sección 12; c) Sección 11.	83
Figura 6.19. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 10; b) Sección 9.	84
Figura 6.20. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 8; b) Sección 7; c) Sección 6; d) Sección 5.	85
Figura 6.21. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 4; b) Sección 3; c) Sección 2; d) Sección 1.	86
Figura 6.22. Velocidades secundarias en el río Grijalva. a) Sección 9; b) Sección 8; c) Sección 7.	88
Figura 6.23. Velocidades secundarias en el río Grijalva. a) Sección 6; b) Sección 5; c) Sección 3.	89
Figura 6.24. Velocidades secundarias en el río Grijalva, a) Sección 2; b) Sección 1.	90
Figura 6.25. Velocidades secundarias para: a) confluencia Grijalva - Carrizal Sección 2; b) río Carrizal sección 1; c) río Grijalva Sección 1.	92

	Pág.
Figura 6.26. Velocidades secundarias para la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Sección 3; b) Sección 4; c) Sección 6.	93
Figura 6.27. Velocidades secundarias para la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Sección 7; b) Sección 8.	94
Figura 6.28. Confluencia Grijalva – Carrizal. a) ángulo de unión de la confluencia; b) sinuosidad de los ríos Grijalva y Carrizal.	96
Figura 6.29. Gastos diarios del 2004 al 2014 de los ríos Grijalva, Carrizal y la confluencia.	97
Figura 6.30. Batimetría de la confluencia Grijalva – Carrizal en diferentes escenarios de caudales en relación con los momentos de flujos.	98
Figura 6.31. Mallado no estructurado (triangulación de volúmenes finitos) generado por programa Iber 2.4 de la confluencia Grijalva - Carrizal.	101
Figura 6.32. Modelación numérica para condiciones de caudal, medido en el año 2015.	102
Figura 6.33. Modelación numérica para condiciones de caudal, medido en el año 2014.	102
Figura 6.34. Modelación numérica para condiciones de caudal, medido en el año 2013.	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1. Desarrollo de velocidades secundarias en una confluencia según su geometría.	26
Tabla 4.1. Características y configuración de los equipos acústicos utilizados (ADCP).	41
Tabla 4.2. Datos procesados en hojas de trabajo de software Excel®.	42
Tabla 4.3. Datos procesados: velocidades secundarias.	42
Tabla 4.4. Datos procesados: velocidad en planta.	43
Tabla 4.5. Datos procesados: sección transversal y batimetría.	43
Tabla 4.6. Características del multihaz SeaBeam 1000.	44
Tabla 5.1. Características principales de softwares de simulación de flujo de ríos.	48
Tabla 5.2. Condiciones de contorno implementadas en los contornos abiertos.	54
Tabla 6.1. Relación de momentos de flujos para la confluencia Grijalva – Carrizal.	95
Tabla 6.2. Rol que toman los ríos en la confluencia Grijalva – Carrizal en diferentes condiciones de gasto.	96
Tabla 6.3. Escenarios modelados.	100

SIMBOLOGÍA

Capítulo 2

Variables

F	Fuerza	$[N]$
M	Momento	$[N\ m]$
M_r	Relación de momento de flujo	$[-]$
ΔM	Cambio de momentos	$[N\ m]$
Q	Gasto	$[m^3\ s^{-1}]$
Q_r	Relación de descarga	$[-]$
T	Tributario	$[-]$
U_t	Velocidad media río tributario	$[m\ s^{-1}]$
U_m	Velocidad media principal	$[m\ s^{-1}]$

Símbolos griegos

β	Coefficientes del momento	$[-]$
ρ	Densidad del agua	$[kg\ m^{-3}]$
θ	Ángulo	$[^\circ]$
α	Ángulo de unión	$[^\circ]$

Capítulo 3

Variables

C	Coeficiente de Chezy	$[-]$
C_r	Factor de correlación	$[-]$
F	Fuerza	$[N]$
g	Gravedad	$[m\ s^{-2}]$
H	Profundidad del agua	$[m]$
p	Presión	$[N\ m^{-2}]$
r	Radio	$[m]$
s	Pendiente	$[-]$
t	Tiempo	$[s]$

u	Componente radial o velocidad secundaria	$[m\ s^{-1}]$
$\bar{U}_1$	Velocidad promedio longitudinal	$[m\ s^{-1}]$
$\mathbf{V}$	Vector velocidad	$[m\ s^{-1}]$
v	Velocidad primaria	$[m\ s^{-1}]$
$\bar{v}$	Velocidad promedio	$[m\ s^{-1}]$
w	Velocidad vertical	$[m\ s^{-1}]$

Símbolos griegos

ε	Viscosidad turbulenta	$[-]$
η	Deformación por esfuerzo cortante	$[-]$
θ	Ángulo de curvatura	$[\circ]$
κ	Constante de Karman	$[-]$
ρ	Densidad del agua	$[kg\ m^{-3}]$
τ	Esfuerzo cortante	$[N\ m^{-2}]$
$\emptyset$	Ángulo entre las componentes del vector velocidad promediadas.	$[\circ]$
φ	Ángulo entre las componentes del vector velocidad	$[\circ]$

Subíndices

b	Valle	$[-]$
c	<i>Thalweg</i>	$[-]$
p	Primaria	$[-]$
r	Dirección transversal	$[-]$
s	Dirección longitudinal	$[-]$
s	Secundaria	$[-]$
x	Eje x	$[-]$
y	Eje y	$[-]$

Capítulo 4

Variables

a_1	Componente transversal del vector de velocidad media del agua	$[m\ s^{-1}]$
a_2	Componente del vector velocidad media de Agua en dirección aguas abajo	$[m\ s^{-1}]$
B_1	Velocidad radial medida por el haz 1	$[m\ s^{-1}]$
B_2	Velocidad radial medida por el haz 2	$[m\ s^{-1}]$
B_3	Velocidad radial medida por el haz 3	$[m\ s^{-1}]$
b_1	Componente transversal del vector velocidad media del barco	$[m\ s^{-1}]$
b_2	Componente del vector velocidad media del barco en dirección aguas abajo	$[m\ s^{-1}]$
d	Profundidad total	$[m]$
f_i	Magnitud del producto cruz en la profundidad	$[-]$
N_s	Números de subsecciones	$[-]$
Q_m	Gasto medido sobre el canal	$[m^3\ s^{-1}]$
Q_t	Descarga total	$[m^3\ s^{-1}]$
T	Tiempo de recorrido	$[s]$
t_i	Tiempo en la trayectoria entre los extremos de las subsecciones	$[s]$
V_f	Vector de velocidad	$[m\ s^{-1}]$
v_H	Componente horizontal del vector velocidad	$[m\ s^{-1}]$
v_p	Velocidad primaria	$[m\ s^{-1}]$
v_s	Velocidad secundaria	$[m\ s^{-1}]$
v_v	Componente vertical del vector velocidad	$[m\ s^{-1}]$
v_x	Velocidad en la sección transversal	$[m\ s^{-1}]$
$\hat{v}_x$	Magnitud de la velocidad promedio en dirección en x	$[m\ s^{-1}]$
v_y	Velocidad en dirección aguas abajo	$[m\ s^{-1}]$

$\hat{v}_y$	Magnitud de la velocidad promedio en dirección en y	$[m\ s^{-1}]$
v_z	Velocidad en la vertical	$[m\ s^{-1}]$
y	Elevación del fondo	$[m]$
x	Distancia	$[m]$
z	Elevación del fondo del río	$[msnm]$
UTM x	Posición geográfica en el eje x	$[m]$
UTM y	Posición geográfica en el eje y	$[m]$

Símbolos griegos

θ	Ángulo de inclinación del haz	$[^\circ]$
----------	-------------------------------	------------

Capítulo 5

Variables

g	Gravedad	$[m\ s^{-2}]$
h	Tirante	$[m]$
v_x	Componente de velocidad en dirección x	$[m\ s^{-1}]$
v_y	Componente de velocidad en dirección y	$[m\ s^{-1}]$
z_b	Cota del fondo	$[m]$
z_s	Elevación de la superficie libre del agua	$[m]$

Símbolos griegos

λ	Latitud del punto considerado	$[-]$
ρ	Densidad del agua	$[kg\ m^{-3}]$
τ_b	Esfuerzo cortante del fondo	$[N\ m^{-2}]$
τ_s	Esfuerzo cortante producido por el viento	$[N\ m^{-2}]$
Ω	Velocidad angular	$[rads^{-1}]$

Capítulo 6

Variables

M_r	Relación de momento de flujo	$[-]$
Q	Gasto	$[m^3 s^{-1}]$
U_m	Velocidad media río principal	$[m s^{-1}]$
U_t	Velocidad media río tributario	$[m s^{-1}]$
$\bar{v}$	Velocidad promedio	$[m s^{-1}]$

Símbolos griegos

ρ	Densidad del agua	$[kg m^{-3}]$
--------	-------------------	---------------

RESUMEN

Las confluencias son zonas donde convergen dos o más flujos provenientes de canales separados; esta unión, produce campos hidrodinámicos y una morfodinámica compleja. En este trabajo se aplicó la teoría desarrollada por Rozovski, para analizar las corrientes secundarias y los momentos de flujos en confluencias. El objetivo fue investigar el efecto de las corrientes secundarias sobre la morfodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal, ubicada en el estado de Tabasco. A partir de mediciones hidrodinámicas en campo, se caracterizaron las corrientes secundarias. Esto se desarrolló en un periodo de cuatro años, para distintas condiciones de flujo. Se comprobó que las corrientes secundarias son las responsables de la forma que adquiere el cauce; además, se demostró que cuando uno de los brazos confluentes es el principal, la formación de la socavación queda determinada por su caudal. Es decir, la relación del momento de flujo está condicionada por el rol de los ríos que conforman la confluencia y sus gastos dominantes. Por último, se reprodujo por medio de un modelo numérico la interfaz de mezclado y la zona de recuperación del flujo; encontrándose que la interfaz de mezclado para las diferentes condiciones de flujo, tenía un ajuste cercano al 90% contra la medida en campo; y que la predicción de la zona de recuperación del flujo, coincidió solamente en un 60%. Los resultados sugieren que la migración de la interfaz de mezclado también es función de los momentos de flujo de la confluencia y a su vez modifica la morfología, las velocidades de transporte de sedimentos y la distribución espacial de las zonas de deposición y erosión en el lecho del cauce.

ABSTRACT

Confluences are areas where two or more flows from separate channels converge; this union, produces hydrodynamic fields and a complex morphodynamics. In this work was used the theory developed by Rozovskii to relate the secondary currents and the moments of flows of the confluent rivers. The objective was to investigate the influence of secondary currents over the morphodynamics of the Grijalva - Carrizal confluence, located in Tabasco State. From hydrodynamics field measurements the secondary currents were characterized. This work was developed during four years and for different flow conditions. It was found that the secondary currents are responsible for the geometry that the bed channel acquired; also, it was shown that when one of the branch at a confluence is the main one, the formation of the erosion is determined by its flow, then the relation of the moment of flow is conditioned by the role of the rivers and its dominant discharge. Finally, the mixing interface and the flow recovery zone were simulated by a numerical model; finding that the mixing interface for the different flow conditions had an adjustment close to 90% against the field measurement; and for the recovery zone it had coincided only in 60%. The results suggest that the migration of the mixed zone, the modification of the morphology, the sediment transport velocities and the spatial distribution of the deposition and erosion zones, were also function of the flow moments.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Confluencias en ríos de planicie

Los sistemas fluviales involucran una serie de procesos complejos que se encuentran ligados entre sí. En todos los cauces se encuentran presentes procesos hidrodinámicos, sedimentológicos, morfológicos y geométricos.

Los ríos se caracterizan por tener una gran diversidad morfológica, que va desde los que tienen sus lechos rocosos (ríos de montaña), hasta ríos aluviales (ríos de planicie), como los ríos trenzados o serpenteantes (Brierley y Fryirs, 2005). En su trayectoria, los ríos disipan energía contenida en el agua; esta pérdida de energía a su vez modifica la morfología a lo largo de su curso. Las características físicas de los cauces fluviales como la relación ancho/profundidad, la sinuosidad y los tipos de patrones (anastomosados, meandrosos o rectos) son afectadas significativamente por las variaciones en los caudales, así como por la carga y tipo de sedimentos (Vide, 2003).

Los ríos, durante su recorrido y en función de sus características fisiográficas, hidrológicas y sedimentológicas van formando distintas estructuras geométricas; entre estas se encuentran las confluencias y las bifurcaciones. Las confluencias son sitios en los que dos o más corrientes naturales se combinan y dan lugar a una sola, mientras que las bifurcaciones son una división del cauce del río en dos o más canales. Ambas estructuras son un fenómeno común en los sistemas fluviales (Slingerland y Smith, 2004).

En el caso particular de las confluencias entre dos o más afluentes, estas producen cambios significativos en el flujo, el transporte de sedimentos y la morfología en la nueva corriente que se forma. Su importancia radica en la conectividad ecológica, el control de inundaciones y la calidad del agua. A menudo los afluentes que las conforman, se cruzan asimétricamente donde el canal principal aguas abajo de la confluencia es una extensión del canal principal aguas arriba o simétricamente, los dos ríos se unen y forman uno nuevo en ángulos no mayores a 90° . De acuerdo a su ubicación, las confluencias pueden considerarse como de montaña o de planicie. Las confluencias de montaña se caracterizan por tener velocidades altas (mayores a 2 m s^{-1}), pendientes muy pronunciada, lechos de grava y porque pueden transportar grandes cargas de sedimentos. A menudo se conectan asimétricamente con el río principal en el fondo del valle formando un ángulo mayor de 80° . Las confluencias en zonas de planicie se caracterizan por tener bajas velocidades, lecho de arena o arcilla, una pendiente baja y son grandes aportadores de sedimentos. Las confluencias de planicie tienen una morfología, una estructura de flujo y una dinámica distintas a los ríos de montaña y lecho de grava (Ashmore, 1993; Ferguson *et al.*, 1992; Ashmore y Gardner, 2008).

En este trabajo de investigación, se acotó el estudio a confluencias de planicie simétricas. Esto debido a que la estructura hidrodinámica que presentan es de interés para la comprensión de los fenómenos de transporte de sedimentos, formas del fondo y geometría del cauce.

1.2 Finalidad del proyecto de investigación

El objetivo general fue caracterizar la estructura del flujo y su efecto en la morfología en una confluencia de planicie. Los resultados se obtuvieron por medio de mediciones de campo y análisis numérico.

Los objetivos específicos fueron:

- Estudiar el desarrollo de las corrientes secundarias de los ríos tributarios hasta la zona de recuperación del flujo y analizar cómo influyen en los procesos morfológicos.
- Caracterizar el desarrollo de las corrientes secundarias en una confluencia.
- Caracterizar la longitud de mezclado de la zona de medición de una confluencia con base en las condiciones hidrodinámicas de cada uno de sus afluentes.
- Describir la hidrodinámica y obtener el campo de velocidades en una confluencia.
- Estimar las velocidades secundarias desarrolladas y no desarrolladas.
- Realizar la suma de las velocidades secundarias de los afluentes que conforman una confluencia y compararla contra las resultantes aguas abajo hasta la zona de recuperación del flujo.
- Analizar el comportamiento obtenido y discutir los resultados generados.

1.3 Estructura del informe

El documento se divide en 7 ²⁴capítulos. En el Capítulo 1 se presentan las generalidades de las confluencias. En el Capítulo 2 se describen las características hidráulicas de una confluencia, como son los momentos de flujos, la hidrodinámica, las zonas de estancamiento, los esfuerzos cortantes (shear layer) y la zona de recuperación del flujo. En el Capítulo 3 se dan a conocer las ecuaciones matemáticas empleadas; se clasifican las velocidades secundarias según la geometría de los ríos tributarios en una confluencia y es un extenso del artículo *Secondary currents: measurement and analysis* (Priego-Hernández y Rivera-Trejo, 2016). En el Capítulo 4 se informa la metodología empleada en el

trabajo de campo, los equipos utilizados y el procesamiento al que fueron sometidos los datos medidos; además, es un extenso del artículo sometido aceptado: *Hidrodinámica y medición de corrientes naturales en un río de planicie utilizando equipos acústicos Doppler* (Priego et al., 2017). En el Capítulo 5 se describe un caso de aplicación complementado con simulación numérica en 2D y es un extenso del artículo publicado: *Análisis Hidrodinámico en un canal de Derivación: Caso El Censo, Municipio de Centro, Tabasco* (García-Reyes et al., 2017). El Capítulo 6 es el estudio sobre una confluencia ubicada en el estado de Tabasco. Muestra la relación que existe entre el momento de flujo y la batimetría. En el Capítulo 7 se formulan las conclusiones generales del proyecto, así como las sugerencias y las directrices para futuras investigaciones.

Finalmente, en la sección de anexos se muestran los productos obtenidos de esta investigación.

Capítulo 2. Dinámica del flujo y sedimento en confluencias

2.1 Momentos de flujos

26

Uno de los problemas de mayor interés en la mecánica de fluidos aplicada, es la representación adecuada del movimiento del agua en cauces naturales (ríos y arroyos). Estos cuerpos de agua se caracterizan generalmente por no tener un desarrollo rectilíneo, sino que presentan curvas (también llamados meandros). Las ecuaciones básicas aplicadas en la mecánica de fluidos son tres: 1) continuidad, 2) energía y 3) momento lineal. Se utilizan para resolver un gran número de problemas que involucran el análisis de los flujos. En particular, la ecuación de cantidad de movimiento se usa para describir las uniones de los ríos, donde se conserva el momento; contrario a lo que sucede con la energía, que se disipa en las uniones debido a la interacción de los flujos.

23

En la Figura 2.1 se muestra el esquema de una confluencia, donde los canales tributarios T_1 y T_2 convergen formando un canal continuo. La ecuación de la conservación del momento para el sistema se escribe como:

$$\begin{aligned}\sum F &= \Delta M = M_3 - (M_1 + M_2) \\ &= \rho[\beta_3 Q_3 V_3 - (\beta_1 Q_1 V_1 + \beta_2 Q_2 V_2)]\end{aligned}\quad (2.1)$$

Donde $\sum F$ es la suma de fuerzas que actúan sobre un volumen de control en la confluencia; ΔM es el cambio en el momento, de aguas arriba hasta aguas

abajo de los extremos del volumen de control; ρ es la densidad del agua [$kg\ m^{-3}$]; Q , es el gasto [$m^3\ s^{-1}$] y V es la velocidad media del flujo [$m\ s^{-1}$]. Por conveniencia se supondrá que los coeficientes del momento β son iguales a la unidad. Dado que por continuidad $Q_3 = Q_1 + Q_2$; y, suponiendo que el plano de referencia es paralelo a la superficie del agua y el canal T_3 paralelo en la dirección del eje x , la $\sum F$ queda en términos de las componentes de x y y , se expresa como:

$$\sum F_x = \Delta M_x = \rho[(Q_1 + Q_2)V_3 - (Q_1V_1 \cos(\theta_1) + Q_2V_2 \cos(\theta_2))] \quad (2.2)$$

$$\sum F_y = \Delta M_y = 0 \quad (2.3)$$

Donde θ_1 y θ_2 son variables, que controlan en parte el cambio de momento a través de la confluencia. No tiene sentido físico reorganizar las ecuaciones para predecir θ_1 y θ_2 en términos de $\sum F$ o ΔM ; es decir, la conservación del momento es válido para la unión de dos canales dados el gasto y la velocidad, y no cuando se bifurcan ya que se tendría una condición en la que ΔM tendría un cierto valor y que por lo tanto, se requeriría un ajuste en los ángulos de la confluencia.

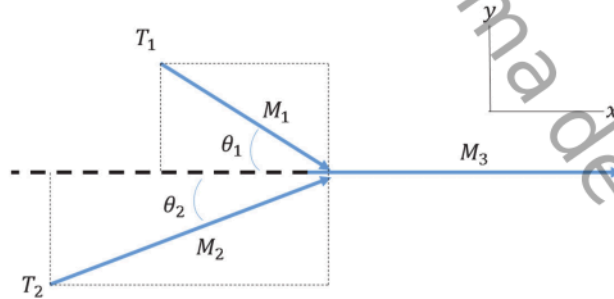


Figura 2.1. Esquema de convergencia de dos canales tributarios T_1 y T_2 para formar un solo canal continuo, donde M_1 y M_2 son los momentos correspondientes a los canales tributarios.

Los ángulos de confluencia y la relación de descarga entre los tributarios ($Q_r = Q_1/Q_2$), definieron por primera vez los parámetros que controlan el

comportamiento morfodinámico de las confluencias de ríos (Mosley, 1976; Best y Reid, 1984, Best, 1987). Sin embargo, la relación de momento de flujos ($M_r = M_1/M_2$) entre los afluentes principal y tributario, también se ha identificado como un parámetro importante debido a su influencia en la morfología de los lechos en confluencias (Biron *et al.*, 2002; Boyer *et al.*, 2006; Riley y Rhoads, 2011).

La relación de momento de flujo (M_r) se define como (Mosley, 1976):

$$M_r = \rho_1 Q_1 U_t / \rho_2 Q_2 U_m \quad (2.4)$$

Donde ρ es la densidad del agua [$kg\ m^{-3}$], Q es el caudal [$m^3\ s^{-1}$], U es la velocidad media en una sección transversal [$m\ s^{-1}$], y los subíndices t y m se refieren a la corriente principal y tributario del afluente, respectivamente.

Leite (2011) comprobó (Figura 2.2), las relaciones de momento de flujo (M_r) como una función de las relaciones de descarga (Q_r). Lo aplicó a estudios morfodinámicos en confluencias de ríos para obtener una clasificación de las confluencias; donde, con excepción del trabajo de Best (1988), los estudios fueron de campo.

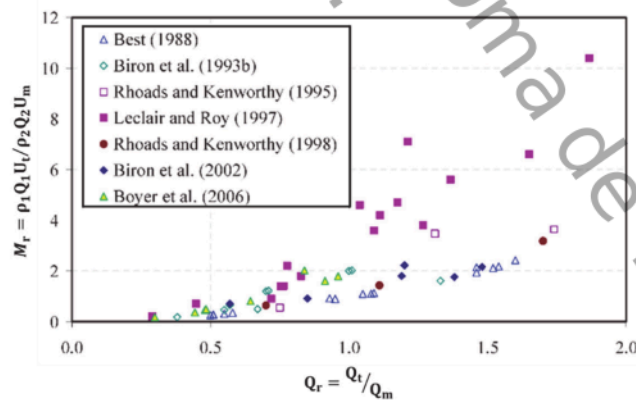


Figura 2.2. Relación del momento de flujo (M_r) como función de la descarga (Q_r) en confluencias (tomado de Leite, 2011).

La relación de momento de flujo, se aplica a confluencias con lecho concordante (condiciones de laboratorio) o con lecho discordante (condiciones naturales). Mediciones en campo realizadas por Leclair y Roy (1997) mostraron las diferentes geometrías de lechos de una confluencia discordante, para condiciones de gasto bajo y relación de momentos de flujo alto ($M_r \geq 1$). Además, distinguieron entre una fase de erosión del lecho de la confluencia para $M_r \sim 1$, y una fase de sedimentación en lecho de la confluencia para $M_r \gg 1$. El estudio más completo sobre confluencias pequeñas (21 m de ancho en la confluencia aproximadamente) en condiciones naturales, fue presentado por Boyer *et al.* (2006). Describieron a detalle la estructura del flujo, su interacción con el transporte de sedimentos y la morfología del lecho de la confluencia.

En este trabajo se tomó la relación de momento de flujo para una confluencia con lecho discordante y un ancho en el punto de unión de los afluentes de 150 m aproximadamente. El comportamiento hidrodinámico para estas confluencias se detalla en la siguiente sección.

2.2 Zonas hidrodinámicas de una confluencia

6 Tanto las confluencias como las bifurcaciones marcan cambios significativos en la geometría hidráulica del canal, el flujo y la carga de sedimentos. Se caracterizan por tener un campo de velocidades tridimensional complejo y una geometría variable del cauce. De manera particular, las confluencias según su geometría y los campos de velocidades (hidrodinámica), muestran diferentes comportamientos, tales como zonas de estancamiento del flujo, una interfaz de mezclado o shear layer, una zona de recuperación del flujo y flujos helicoidales (Figura 2.3).

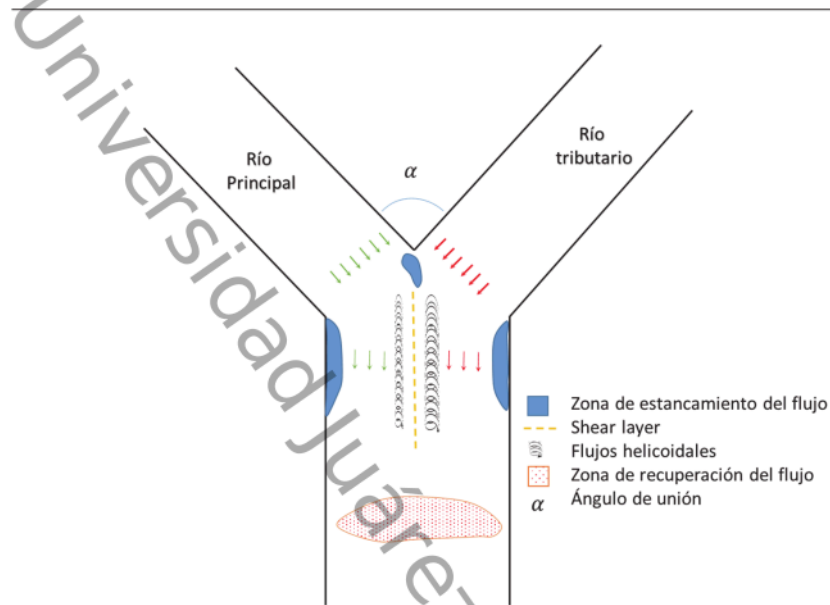


Figura 2.3. Zonas hidrodinámicas en confluencias.

Existen estudios sobre confluencias que se enfocan en la hidrodinámica del punto de unión de la confluencia (Mosley, 1976; Best y Reid, 1984; Best, 1988), el transporte de sedimentos y el ángulo de unión de los ríos tributarios (Biron *et al.*, 1996a; Riley y Rhoads, 2011; Balouchi *et al.*, 2015); así como estudios de la interfaz de mezclado (Rhoads y Sukhodolov, 2004; Riley y Rhoads, 2011; Constantinescu *et al.*, 2012). En el presente trabajo fue de gran interés caracterizar la interfaz de mezclado, ya que esta permite establecer los puntos de desarrollo de las velocidades hasta la zona de recuperación del flujo.

2.2.1. Zona de estancamiento del flujo

Se refiere a zonas de baja velocidad, que se pueden observar en la salida de cada río tributario que conforman una confluencia; e incluso, aguas abajo del punto de unión de dicha la confluencia. Estas zonas se forman por la desviación mutua de los flujos que se alejan de la unión aguas arriba o por la convergencia de los flujos en las paredes laterales del punto de unión de los dos afluentes (Figura 2.4). Best (1987) mostró experimentalmente que para ángulos de 70° , la

deflexión del flujo y la presencia de zonas de estancamiento son como las mostradas en la Figura 2.3. Sin embargo, cuando aumenta este ángulo y para cada condición de gasto mayor, la zona de estancamiento del flujo aumenta, generando recirculaciones en los flujos de los ríos tributarios y deflexiones mayores. Cuando la unión de los dos afluentes forma un ángulo de 105° , las recirculaciones se vuelven tan severas que el flujo que se induce cambia de dirección en la zona de estancamiento en el afluente del canal principal (Figura 2.4).

Otra característica en las zonas de estancamiento del flujo, es la creación del esfuerzo de corte entre los dos flujos convergentes el cual se mantiene a varios metros aguas abajo del punto de unión de la confluencia, generando vórtices verticales. Los vórtices son responsables del aumento de las tensiones de corte en el lecho del punto unión de la confluencia, que junto con el aumento de la velocidad de ambos flujos son responsables del movimiento del fondo.

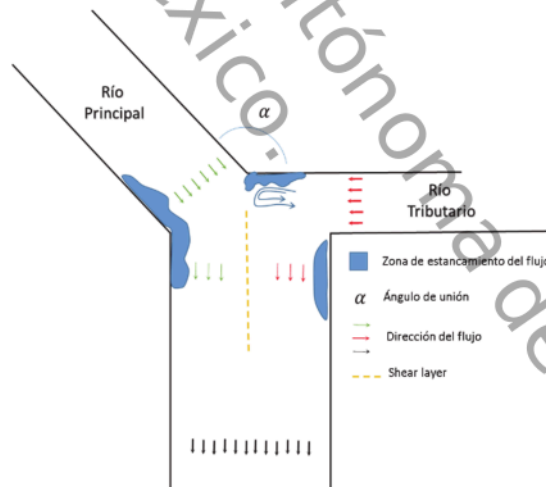


Figura 2.4. Confluencia con ángulo de unión mayor a 90° .

2.2.2 Interfaz de mezclado

La interfaz de mezclado o *shear layer*, es una característica prominente de la hidrodinámica a lo largo de la intersección de dos flujos (Rhoads y Sukhodolov, 2004; Constantinescu *et al.*, 2012) y está relacionada con la morfología de la confluencia (Biron *et al.*, 1996a, 1996b; Boyer *et al.*, 2006). La posición de la shear layer depende del ángulo de incidencia que forman los dos brazos tributarios y de la relación del flujo de momento entre los dos afluentes (Mosley, 1976; Riley y Rhoads, 2011). Cambios abruptos en la batimetría pueden tener un efecto significativo sobre la posición de la interfaz de mezclado.

Se consideran dos tipos de interfaces de mezclado, dependiendo de las características hidrodinámicas presentes. Cuando la relación de momento de flujo y las velocidades entre los dos afluentes es mayor que la unidad, el crecimiento de los remolinos dentro de la shear layer es impulsado por la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz (Constantinescu *et al.*, 2012), la cual es similar a una capa de mezcla poco profunda, desarrollada entre las dos corrientes paralelas a diferentes velocidades (Figura 2.5a). En esta condición, los remolinos o vórtices que se generen en la shear layer serán cuasi- bidimensionales. Por el contrario, cuando el momento de flujo y las velocidades sean menores que la unidad y el ángulo de unión sea grande, la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz disminuirá (Kirkil y Constantinescu, 2009), generando una zona de estancamiento; aun así, la generación de remolinos con alta energía cinética estará presente aguas abajo de la zona de estancamiento, de modo que la capa de mezclado generada entre las dos corrientes paralelas a diferentes velocidades estará poblada por vórtices que giran en direcciones opuestas (Figura 2.5b). En este caso, la formación de los vórtices cuasi-bidimensionales es similar al proceso de calle de vórtice de von Kármán (Kirkil y Constantinescu, 2009).

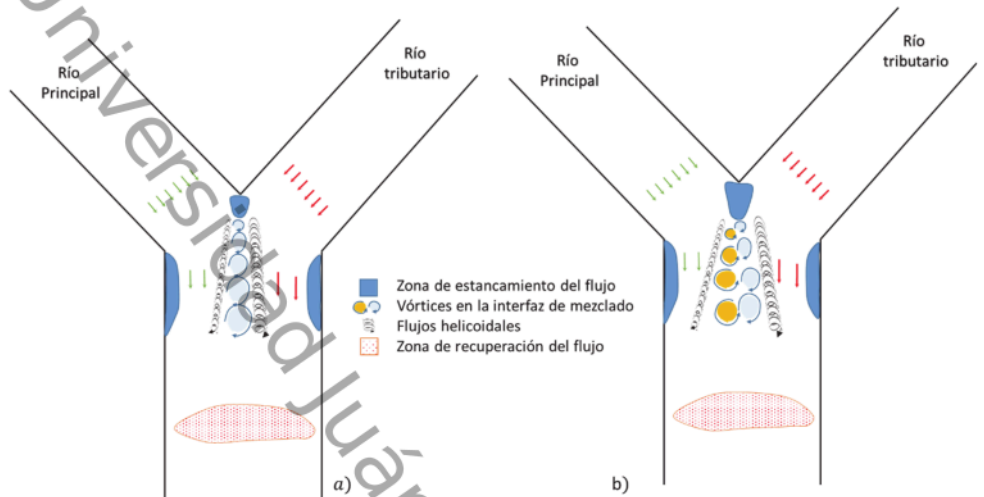


Figura 2.5. Vórtices generados para: a) Momento de flujo mayor que la unidad y b) Momento de flujo menor que la unidad.

No se han encontrado estudios que comprueben que la interfaz de mezclado tiene efectos en la batimetría de una confluencia. Sin embargo, la convergencia de los flujos de los ríos tributarios genera una celda helicoidal a cada lado de la interfaz de mezclado, que se relaciona con las velocidades de los ríos tributarios de la confluencia. De esta manera, a partir de la interfaz de mezclado se puede determinar preliminarmente el desarrollo de las corrientes en una confluencia.

2.2.3. Zona de recuperación del flujo

En la Figura 2.6 se muestra la zona en la que el flujo se recupera de la influencia de la dinámica de la confluencia; los dos flujos se mezclan gradualmente a través de la capa de shear layer y los niveles de turbulencia van disminuyendo. La distribución de velocidad de canal asimétrica producida en el punto de unión de los dos ríos comienza a disminuir para formar una nueva zona hidrodinámica y volver al flujo un patrón más simétrico, paralelo a las paredes del canal. La distancia del punto de unión hasta la zona de recuperación del flujo

dependerá de: el ángulo de unión, las condiciones hidrodinámicas de los dos ríos tributarios y la morfodinámica del sistema.

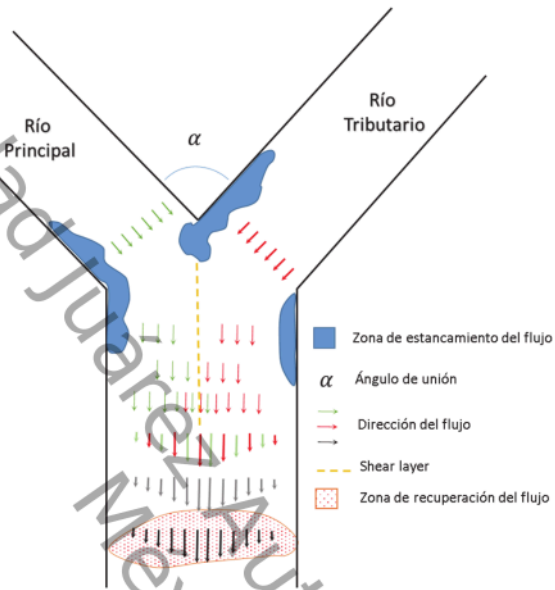


Figura 2.6. Zona de recuperación del flujo aguas abajo de la confluencia de los dos afluentes.

Capítulo 3. Corrientes secundarias

3.1 Generalidades

Las corrientes secundarias son consecuencia de la componente transversal del vector velocidad y se desarrollan en el plano normal al eje del flujo principal. Estas corrientes aparecen tanto en tramos rectos como en curvas, pero son mayores en estas últimas. Su desarrollo en tramos rectos, se atribuye a la turbulencia anisotrópica y a la distribución no uniforme del esfuerzo cortante en la superficie del cauce. En los meandros, estas corrientes se deben principalmente a la espiralización del flujo y a las formas del fondo.

Las corrientes secundarias o transversales son importantes debido a tres factores (Falcón, 1984): a) son parcialmente responsables de la mayor parte de la topografía del cauce, b) interactúan de manera dinámica con la corriente primaria, y c) pueden ser útiles para estudios de difusión y navegación en vías fluviales naturales.

Como se muestra en la Figura 3.1, la componente radial o velocidad de la corriente secundaria u , se presenta en el plano perpendicular de la dirección del movimiento de la velocidad primaria v , y se origina por la aceleración centrífuga v^2/r , debido a la curvatura del canal (las coordenadas utilizadas son cilíndricas). La componente vertical de la velocidad w , que no se observa en la Figura, se considera generalmente como una parte del fenómeno de la corriente secundaria. Las líneas de corrientes de la componente de velocidad v , varían de cero en el lecho del cauce del río, hasta un valor máximo cerca de la superficie

libre del agua. Consecuentemente, las fuerzas centrífugas son mayores cerca de la superficie del agua y disminuyen hacia el fondo. Estas fuerzas tienden a empujar el agua radialmente hacia afuera y de este modo se acumulan en la parte exterior del canal. Por lo tanto, una segunda fuerza radial resultante se origina, debido al gradiente de presión radial $\partial p / \partial r$, también conocido como el fenómeno de la pendiente transversal en la curva. Si se hace la suposición que la presión se distribuye de forma hidrostática, el gradiente de presión radial es linealmente proporcional a la pendiente local radial de la superficie del agua $\partial H / \partial r$. La primera de estas fuerzas varía en la profundidad, mientras que la segunda permanece constante; por consiguiente, hay una fuerza total radial que cambia de signo según la elevación dentro del flujo. Estos cambios de sentido en la fuerza radial son los causantes de producir la velocidad radial secundaria u . La diferencia que existe entre la fuerza centrífuga y el gradiente de presión, se equilibra por el gradiente vertical del esfuerzo cortante radial $\partial \tau_{rz} / \partial z$, y de la fuerza inercial conectiva $\rho v \partial u / \partial s$ (solo si el flujo secundario no está desarrollado en su totalidad), ambos dependen de cómo se distribuye u . La distribución de u evoluciona a lo largo del eje del canal de tal forma que el equilibrio de fuerza radial se satisface. Bathurst *et al.* (1979) mencionaron que la circulación secundaria es más débil en gastos bajos y alta en descargas medias. Para este último caso, el medio fluye aun ocupando un cauce con una curvatura bien definida, y por lo tanto presenta velocidades relativamente grandes. Esta combinación produce una gran fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas. Los primeros dos casos tienen, sin embargo, velocidades muy bajas o un radio de curvatura muy largo, los cuales, en ambos casos, conducen a reducir el efecto centrífugo.

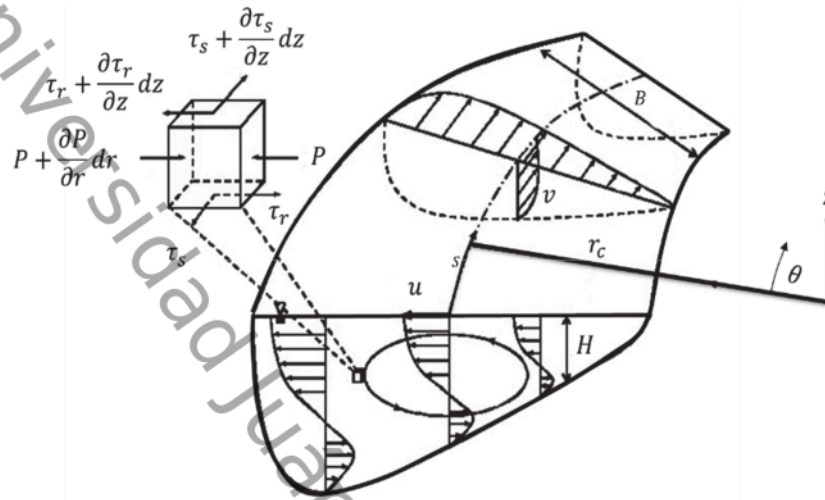


Figura 3.1. Velocidad transversal para una curva de un río (adaptado de: Seo *et al.*, 2008).

De acuerdo a Bathurst *et al.* (1979), el flujo secundario puede transferir algunas veces la posición longitudinal máxima del esfuerzo cortante en el fondo, desde el punto donde la velocidad longitudinal máxima pasa hacia un flujo descendente alto, donde se encuentran las principales componentes del flujo secundario y donde hay una compresión significativa de las isotacas.

En el caso de las corrientes sinuosas, donde el flujo avanza a lo largo del río pasando de un meandro a otro, la dirección de la fuerza centrífuga (en relación con el eje del canal) será reversible de forma periódica, de tal manera que la distribución u en la Figura 3.1 tendrá primero un sentido y después otro. Del mismo modo, la dirección radial de la pendiente en la superficie del agua y el gradiente de presión radial se invierten. Además, debido a que el esfuerzo cortante en el fondo, así como la tasa de transporte de sedimento longitudinal y radial varían a lo largo del río, la pendiente transversal del fondo también puede variar de la misma forma. El cambio en la profundidad del río, es el resultado del movimiento del líquido que se transporta primero en una dirección y luego en

otra. Por lo tanto, la distribución u se considera que está compuesta por dos componentes: una de rotación y una de traslación. Debido a que la inercia de la corriente del fluido, está representada por el término $\rho v \partial u / \partial s$, la distribución de u no responde de forma instantánea a las variaciones de la fuerza centrífuga; a pesar de ello, sí pueden existir los cambios de fase entre los ejes curvos del canal y la componente transversal de la velocidad de las líneas de flujo; así como entre el esfuerzo cortante del fondo y la dirección radial de la pendiente en la superficie del agua. Estos cambios de fase aumentarán a medida que la magnitud del término de la inercia $\rho v \partial u / \partial s$ aumente en relación al término del esfuerzo cortante (por fricción) $\partial \tau_{zr} / \partial r$. De acuerdo con estas consideraciones, se deduce que en corrientes desarrolladas en curvas, la corriente secundaria se dirige radialmente hacia afuera, cercana a las capas superiores de la corriente (véase la Figura 3.1), mientras que en corrientes no uniformes, el patrón de la corriente secundaria es variable.

3.2 Enfoque de Rozovskii

La derivación de las ecuaciones de movimiento y continuidad para el análisis del flujo en canales curvos, fueron desarrolladas por Rozovskii (1957). El análisis del flujo de las corrientes secundarias que se presenta en este trabajo es solo para flujo subcrítico, donde la distribución de la presión hidrostática y la profundidad del canal, es generalmente menor que la anchura y al radio de curvatura. Al derivar la ecuación de movimiento y utilizando un elemento diferencial de fluido en el sistema de coordenadas polares, la segunda ley de Newton se puede escribir como:

$$d\mathbf{F} = dm \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \quad (3.1)$$

Donde $\mathbf{F}$ es el vector fuerza, $\mathbf{v}$ es el vector velocidad, t es el tiempo, y dm es un elemento diferencial de masa.

El lado derecho de la ecuación (3.1) es la derivada sustancial. Por lo tanto, las ecuaciones de movimiento para la dirección longitudinal s y la dirección transversal r , en coordenadas cilíndricas polares son (Seo *et al.*, 2008):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{vu}{r} + gS + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_s}{\partial z} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial s} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{v^2}{r} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (3.3)$$

20

Donde ρ es la densidad del agua [$kg\ m^{-3}$], r es el radio de curvatura [m], S es la pendiente longitudinal, S_r es la pendiente transversal, τ_s es el esfuerzo cortante longitudinal [$N\ m^{-2}$] y τ_r es el esfuerzo cortante transversal [$N\ m^{-2}$].

La inclinación transversal de la superficie libre del agua en una curva de canal, se obtiene con el balance de fuerzas radiales y la profundidad del agua H en metros. Si la fuerza transversal aportada por el cauce se desprecia, la fuerza de presión asociada por la inclinación de la superficie transversal se equilibra por la fuerza centrípeta; entonces:

$$\int_0^D \frac{v^2}{r} \rho ds dr dz - \rho g S_r ds dr dz = 0 \quad (3.4)$$

$$S_r = \frac{\int_0^D v^2 dz}{gr} = \frac{C_r}{gr} \bar{v}^2 \quad (3.5)$$

Donde C_r es el factor de correlación y $\bar{v}$ es la profundidad promedio de la velocidad longitudinal. Para un flujo constante, las derivadas temporales $\partial v / \partial t$, $\partial u / \partial t$ de la ecuación (3.1) y ecuación (3.2) se pueden eliminar. También los términos de segundo orden vu/r , $u \partial v / \partial r$, $u \partial u / \partial r$, $w \partial v / \partial z$ y $w \partial u / \partial z$ pueden ser despreciados, porque u y w son muy pequeños en comparación de v . Entonces, la ecuación de movimiento se expresa en término de la dirección transversal como:

$$v \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{v^2}{r} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (3.6)$$

El método de desarrollo para el flujo secundario se describe por cada término de la ecuación (3.6). El lado izquierdo es la variación longitudinal transversal de velocidad; en el lado derecho, el primer término es la aceleración centrífuga, el segundo término se relaciona con la pendiente del agua en la superficie transversal y el tercer término es el esfuerzo cortante turbulento. Si la velocidad transversal no tiene ninguna variación a lo largo de la dirección de la línea de corriente, los tres términos del lado derecho de la ecuación (3.6), alcanzan el equilibrio de la fuerza (la suma de fuerza es igual a cero). En este caso, la magnitud del flujo secundario es máxima. Rozovskii definió este fenómeno como un flujo desarrollado por medio de la siguiente ecuación (ec. 3.7):

$$\frac{v^2}{r} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

Rozovskii adoptó la siguiente distribución logarítmica de la velocidad longitudinal

$$\frac{v}{\bar{v}} = 1 + \frac{g^{\frac{1}{2}}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \quad (3.8)$$

Donde κ es la constante de Karman, C es el coeficiente de Chezy, y $\eta = z/H$, la deformación por esfuerzo cortante, está dado como:

$$\tau_r = \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.9)$$

Donde ε es la viscosidad turbulenta. Sustituyendo las ecuaciones (3.8) y (3.9) en la ecuación (3.7), Rozovskii determinó la fórmula de velocidad transversal desarrollada para los casos de fondo suaves como:

$$u_f = \bar{v} \frac{1}{\kappa^2} \frac{H}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{g^{\frac{1}{2}}}{\kappa C} F_2(\eta) \right] \quad (3.10)$$

Donde u_f es la velocidad transversal completamente desarrollada con los cambios de rugosidad. El perfil de velocidad varía principalmente en la zona del fondo y se mantiene casi constante a lo largo de la profundidad del flujo. $F_1(\eta)$ y $F_2(\eta)$ están en función de la distancia vertical adimensional $\eta = (z - H)/h$, y se expresan:

$$F_1(\eta) = \int \frac{2 \ln(\eta)}{\eta-1} d\eta \quad (3.11)$$

$$F_2(\eta) = \int \frac{\ln^2(\eta)}{\eta-1} d\eta \quad (3.12)$$

Además, con el fin de reflejar las variaciones de las líneas de corriente de la velocidad transversal a lo largo del canal, Rozovskii propuso los términos de crecimiento ecuación (3.13) y decaimiento ecuación (3.14) basado en la ecuación de movimiento. La fórmula toma la forma siguiente:

$$u = u_f \left[1 - \exp\left(-\frac{2\kappa\sqrt{g}}{c} \frac{s'}{H}\right) \right] \quad (3.13)$$

$$u = u_f \left[\exp\left(-\frac{2\kappa\sqrt{g}}{c} \frac{s''}{H}\right) \right] \quad (3.14)$$

Donde s' , es la distancia desde el inicio de la curva, mientras que s'' , es la distancia de donde el canal se convierte en lineal. Sin embargo, las funciones logarítmicas complejas incluidas en la formulación de Rozovskii son difíciles de integrar analíticamente.

Kikkawa *et al.* (1976), emplearon el promedio de la viscosidad turbulenta a lo largo de la profundidad con la finalidad de obtener la distribución vertical de la velocidad transversal (ec. 3.15), lo que podría integrarse fácilmente con la velocidad promedio longitudinal $\bar{U}_1$ en la sección transversal.

$$u = \frac{1}{\kappa} \frac{h}{r_c} \frac{U_1^2}{U_1} \left[F_A - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \frac{U_1}{U_1} F_B \right] \quad (3.15)$$

$$\text{Con } F_A = -15 \left(\eta^2 \ln \eta - \frac{1}{2} \eta^2 + \frac{15}{54} \right) \text{ y } F_B = \frac{15}{2} \left(\eta^2 \ln^2 \eta - \eta^2 \ln \eta + \frac{1}{2} \eta^2 - \frac{19}{54} \right).$$

Rozovskii (1957) y Kikkawa *et al.* (1976) indicaron que la magnitud del flujo secundario estaba relacionada con la profundidad del agua para el radio de curvatura y los perfiles verticales de velocidad transversal, los cuales varían de manera significativa con la resistencia del fondo. En la Figura 3.2 se muestran los perfiles de la velocidad transversal que se obtuvieron teóricamente y su comparación contra resultados experimentales obtenidos por Rozovskii (1957) y Guymet (1998). Se observa que la mejor aproximación a los datos experimentales corresponde al modelo teórico de Seo y Jung (2010); sin embargo, la aproximación matemática de las velocidades secundarias para canales naturales sigue siendo la de Rozovskii (Parsons *et al.* 2013).

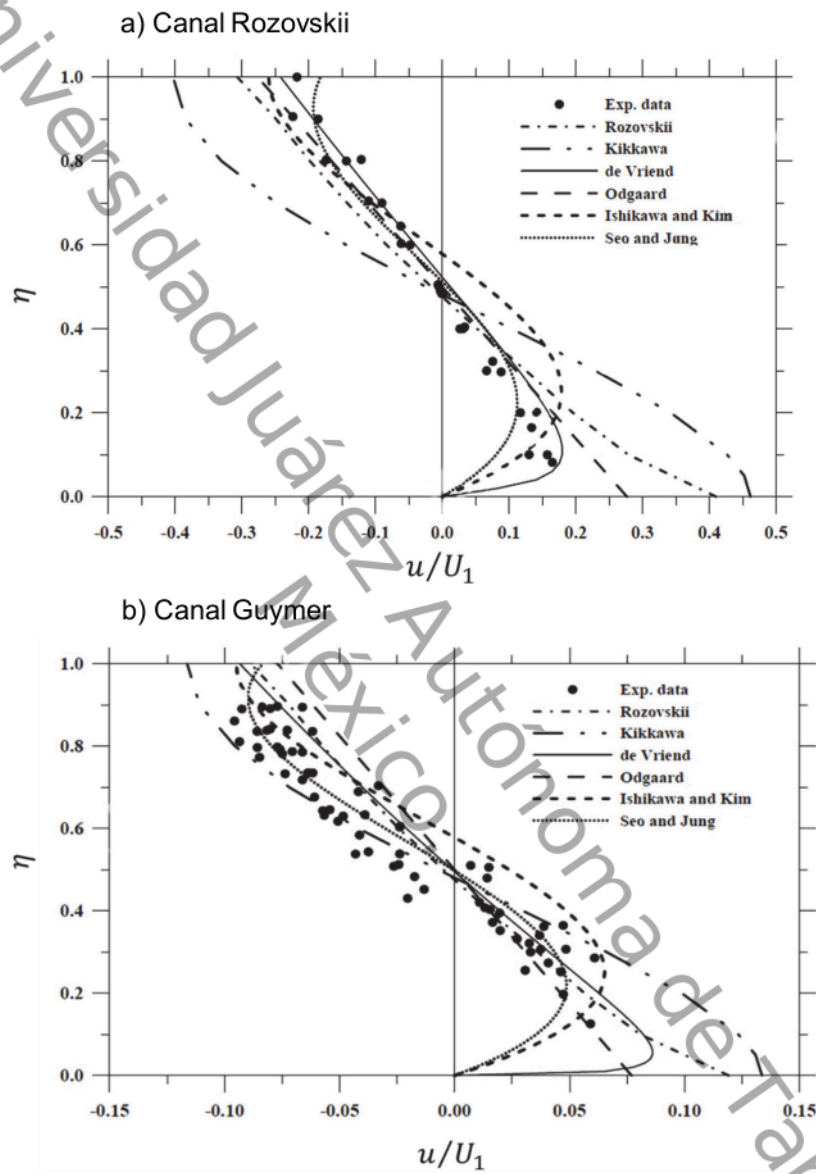


Figura 3.2. Distribución vertical de la velocidad transversal (Song *et al.*, 2012). a) Datos obtenidos en laboratorio por Rozovskii; b) datos obtenidos en laboratorio por Guymet.

3.3 Velocidades secundarias desarrolladas y no desarrolladas

En la Figura 3.3 se observa que los flujos secundarios formados en los ríos meándricos mantienen un movimiento helicoidal, en el cual el agua es impulsada hacia el exterior en la parte superior del río; mientras que cerca de la parte inferior, es impulsada hacia el interior en una curva. Este fenómeno puede explicarse como resultado de las interacciones entre la fuerza centrífuga, el gradiente de presión (debido a la disminución de la superficie del agua) y la fricción con el fondo (Blanckaert y Graf, 2004).

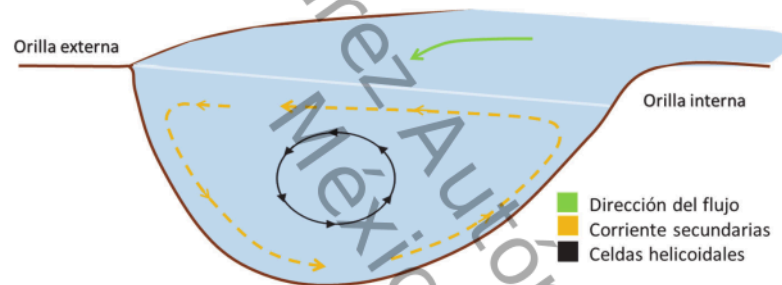


Figura 3.3. Corriente secundaria para un canal curvo.

La sinuosidad de un río meándrico se define como la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce o *thalweg* (L_c) y la distancia en línea recta entre ellos (L_b) como se muestra en la Figura 3.4. Conforme el río avanza, el río se mueve de un meandro a otro y la dirección de la fuerza centrífuga (en relación con el eje del canal) se vuelve periódicamente reversible, de tal forma que la distribución de la velocidad transversal $\vec{u}$ del río tendrá primero un sentido y después otro.

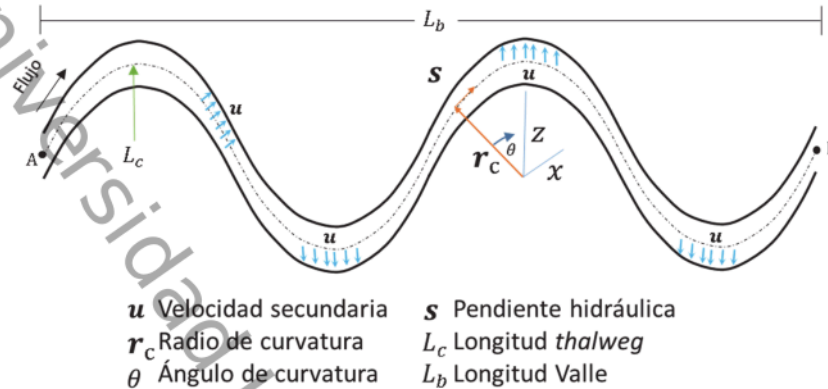


Figura 3.4. Distribución de la velocidad transversal u . Velocidades secundarias no desarrolladas (vista en planta).

Del mismo modo, la dirección radial de la pendiente hidráulica y el gradiente de presión radial se invierten periódicamente. Además, debido a que los esfuerzos cortantes del fondo, al igual que la tasa de transporte de sedimento longitudinal y radial varían periódicamente a lo largo del río, la pendiente transversal del fondo también puede variar de la misma forma. El cambio en la profundidad del río es el resultado del movimiento del líquido que se transporta primero en una dirección y luego en otra. Por lo tanto, la distribución $\vec{u}$ se considera que está compuesta por dos componentes: una de rotación y otra de traslación.

Debido a que la inercia de la corriente del fluido está representada principalmente por el término $\rho v \partial \vec{u} / \partial s$ (fuerza de inercia), la distribución de $\vec{u}$ no responde instantáneamente a las variaciones de la fuerza centrífuga; no obstante, sí pueden existir cambios de fase entre los ejes curvos del canal y la componente transversal de la velocidad de las líneas de flujo, así como entre el esfuerzo cortante del fondo y la dirección radial de la pendiente en la superficie del agua. Estos cambios de fase aumentarán a medida que la magnitud del término de la inercia $\rho v \partial \vec{u} / \partial s$ aumente en relación al término del esfuerzo cortante (por fricción) $\partial \tau_{zr} / \partial z$. De acuerdo a estas consideraciones, se deduce

que en la caracterización de las corrientes completamente desarrolladas en curvas (Figura 3.5), la corriente secundaria se dirige radialmente hacia afuera, cercano a las capas superiores de la corriente; mientras que en corrientes no uniformes, el patrón de la corriente secundaria es variable.

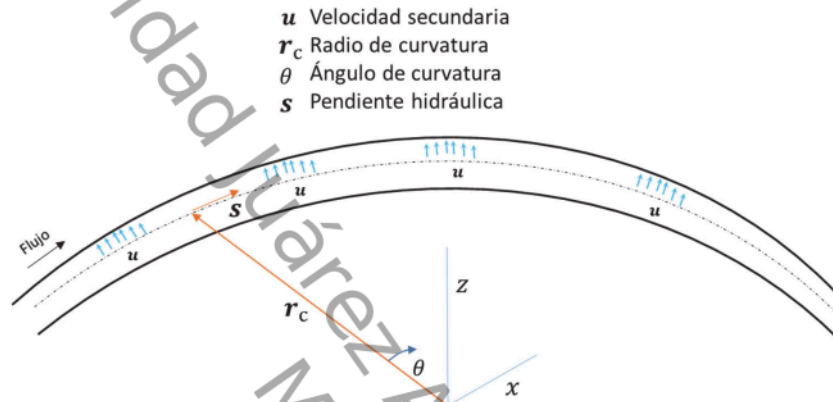


Figura 3.5. Distribución de la velocidad transversal u . Velocidades secundarias desarrolladas.

Por lo anterior, existen dos geometrías características de los ríos tributarios que conforman una confluencia en zona de planicie, para la generación de las velocidades secundarias desarrolladas y no desarrolladas. Cada una representa características físicas diferentes en el desarrollo de las corrientes secundarias hasta la zona de recuperación del flujo de la confluencia (Tabla 3.1). Para este trabajo, por el cambio de rol entre los ríos principal y tributario que presenta la confluencia en estudio, se estudiaron los arreglos: a) *velocidades desarrolladas y velocidades no desarrolladas*; b) *no desarrolladas - velocidades desarrollada*.

Tabla 3.1. Desarrollo de velocidades secundarias en una confluencia según su geometría.

Río principal	Río tributario
Velocidades desarrolladas	Velocidades desarrolladas
Velocidades desarrolladas	Velocidades no desarrolladas
Velocidades no desarrolladas	Velocidades no desarrolladas
Velocidades no desarrolladas	Velocidades desarrolladas

Conocer el desarrollo de las velocidades secundarias hasta la zona de recuperación del flujo es de interés, debido a que las características físicas que conservan el desarrollo de las velocidades, permiten estimar la tasa de migración de ríos meándricos (Gutierrez *et al.*, 2014).

Para determinar la zona de recuperación del flujo, se necesita estimar la interfaz de mezclado, para lo cual se utilizan modelos numéricos en dos dimensiones (2D), que aseguren la ubicación más exacta de la zona de recuperación del flujo. Esto permite optimizar el tiempo y los recursos disponibles. El modelo numérico se valida con datos obtenidos en campo.

3.4 Velocidades secundarias en confluencias

Las corrientes que se originan en las confluencias se caracterizan por condiciones hidrodinámicas complejas asociadas a la convergencia de flujos. Las características hidrodinámicas de las confluencias incluyen una zona de estancamiento de flujo, aguas arriba en la llegada a la confluencia. Esto genera una capa de cizalladura (cambio brusco en dirección de las velocidades) entre la unión de los dos flujos (Figura 3.6). La superficie de esta convergencia genera una celda helicoidal a cada lado de la capa de cizalladura; la separación de flujo de estas celdas, se da inmediatamente aguas abajo de la confluencia (Mosley, 1976; Best, 1987). Estas celdas helicoidales son formadas por las velocidades secundarias y por la existencia de las fuerzas desiguales entre el gradiente de

presión hidrostática y las fuerzas centrífugas. Estas fuerzas no son generadas por la curvatura del canal, sino por el ángulo de unión, la hidrodinámica y las características termodinámicas tales como la presión y la densidad. Se ha demostrado (Dietrich y Smith, 1983; Best, 1987) que la variación del ángulo de unión en una confluencia puede influir en los campos de velocidad descendente y en la corriente transversal, que a su vez determinan los patrones asociados del esfuerzo cortante y del transporte de sedimentos.

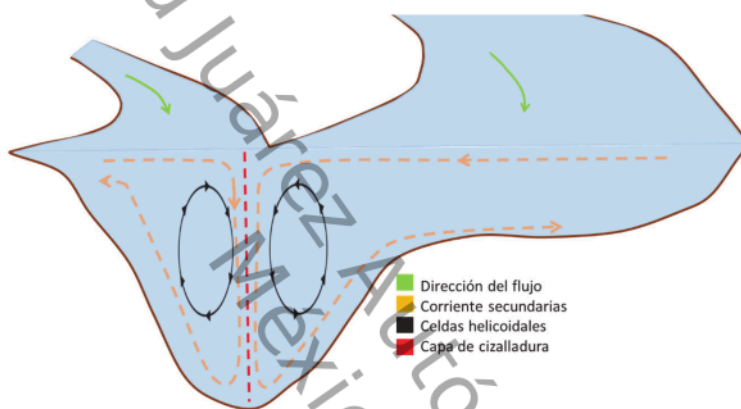


Figura 3.6. Dirección del flujo, corrientes secundarias, celdas helicoidales y la capa de cizalladura para una confluencia.

Las corrientes secundarias ligadas a la trayectoria de la capa de cizalladura mantienen una translación y una rotación hasta la zona de recuperación del flujo; la dirección de estas velocidades se determina por las características físicas y geométricas de los brazos tributarios de la confluencia. A partir de esto, surge la pregunta ¿Cuál de los dos caudales aporta las características físicas en el desarrollo de las corrientes secundarias, hasta la zona de recuperación del flujo en una confluencia?

Para dar respuesta a esta pregunta, se necesita llevar a cabo la caracterización de las velocidades secundarias desarrolladas y no desarrolladas

que se generan en los ríos tributarios de la confluencia, y analizar cómo estas se van transmitiendo hasta la zona de recuperación del flujo.

En la caracterización de las velocidades y corrientes secundarias en una confluencia, se identifican las contribuciones por separado del flujo desigual y el movimiento helicoidal para el campo de velocidades de las corrientes transversales (Rozovskii, 1957; Bathurst *et al.*, 1977; Bruce *et al.*, 1993); y posteriormente, se lleva a cabo la caracterización de las velocidades desarrolladas y no desarrolladas. Con esto, se determina cómo las contribuciones por separado varían con el cambio de las condiciones hidrodinámicas. Como primera aproximación, se calculan las velocidades primarias y secundarias; posteriormente, se determinan las componentes de las corrientes transversales de estas velocidades. Las velocidades primarias (V_p) y secundarias (V_s) (Figura 3.7a), tal como lo definió Bathurst *et al.* (1977) son las componentes de la velocidad resultante V_r a una profundidad en la columna de flujo que está orientada paralela y ortogonalmente (Figura 3.7b). Estas velocidades se calculan con las ecuaciones (3.17) y (3.18):

$$v_p = v_r \cos(\varphi - \emptyset) \quad (3.17)$$

$$v_s = v_r \sin(\varphi - \emptyset) \quad (3.18)$$

Donde $v_r = (v_x^2 + v_y^2)^{\frac{1}{2}}$, $\varphi = \tan^{-1}(v_x/v_y)$, $\emptyset = \tan^{-1}(V_x/V_y)$, V_y es la velocidad transversal del flujo promediada en la profundidad de la vertical [$m s^{-1}$], y V_x es la velocidad promedio en la dirección aguas abajo [$m s^{-1}$]. La orientación del promedio del vector velocidad ($\emptyset$) en diferentes verticales a través del canal, define el patrón del flujo asimétrico sobre la sección transversal. Los valores individuales de v_p para cada vertical, definen la intensidad del flujo desigual en lugares particulares de la columna de agua.

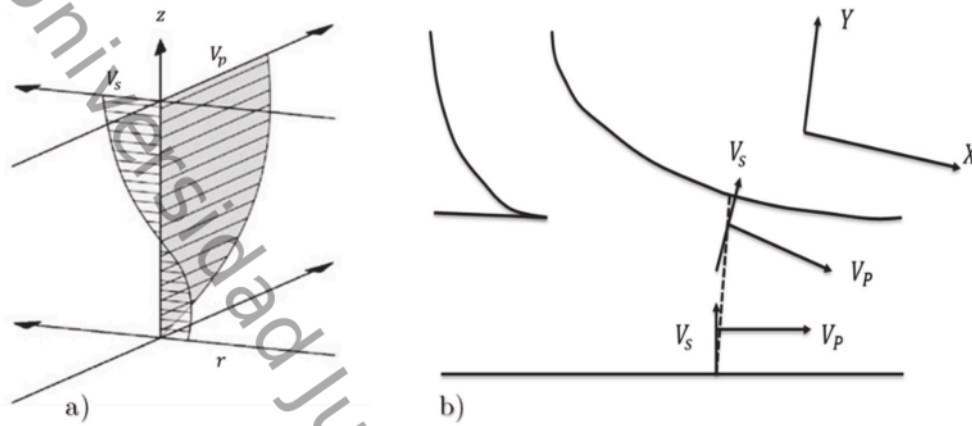


Figura 3.7. Componentes del vector velocidad. a) En una columna de agua (adaptación de Winterwerp *et al.*, 2006). b) Velocidad secundaria perpendicular a la velocidad primaria que va en dirección aguas abajo (adaptado de Lane *et al.*, 2000).

La velocidad secundaria v_s define la circulación promedio en el plano normal del vector velocidad en cada vertical e indica la intensidad del movimiento helicoidal dentro del flujo asimétrico (Ashmore *et al.*, 1992). Las componentes de las líneas transversales de v_p y v_s son:

$$v_{py} = v_p \sin \phi \quad (3.19)$$

$$v_{sy} = v_s \cos \phi \quad (3.20)$$

Donde la suma de v_{py} y v_{sy} es igual a la medida en la corriente transversal de la velocidad vertical (v_y). Los valores de v_{py} y v_{sy} representan las contribuciones separadas de flujo asimétrico y del movimiento helicoidal respectivamente para el campo de velocidades de las líneas de corrientes transversales. Debido a que el esquema de v_{sy} conserva el patrón general de la circulación secundaria, el método identifica el movimiento helicoidal dentro de los flujos asimétricos fuertes. Este procedimiento se utiliza también para determinar cómo varían los tipos de movimiento de los fluidos que contribuyen a los cambios

del campo de velocidad en las líneas de corrientes transversales; así como las condiciones hidrodinámicas en el cambio de la confluencia del río.

Por otro lado, la geometría de los ríos tributarios que conforman una confluencia es de interés, debido a que esta indica el comportamiento del vector de la aceleración centrífuga en la curva del canal y el lugar donde se generan las velocidades, así como las corrientes secundarias más representativas de un río. La variación de la dirección del vector de aceleración centrífuga, permite la caracterización de las velocidades secundarias desarrolladas y no desarrolladas, las cuales en el Capítulo 6, se discuten más a detalle.

Capítulo 4. Mediciones de campo

4.1 Perfiladores acústicos Doppler

El aforo de corrientes naturales y la medición hidrodinámica de cualquier sistema acuático, permiten conocer y analizar sus condiciones desde un punto de vista ambiental. En la actualidad, la medición de estas variables se realiza con el apoyo de equipos acústicos Doppler, también conocidos como equipos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Los ADCP se han vuelto más populares debido a su eficiencia, rapidez y calidad en la medición del flujo (Winterwerp *et al.*, 2006; Szupiany *et al.*, 2007; Priego-Hernández y Rivera-Trejo, 2016). Estos instrumentos tienen la ventaja de que además de aforar, permiten medir campos tridimensionales de velocidad (3D). Por otro lado, algunos investigadores han realizado comparaciones de mediciones de velocidad (Appell *et al.*, 1988; Shih *et al.*, 2000; Nystrom *et al.*, 2002) para determinar la validez de las mediciones del flujo; encontrando que el error de medición de velocidades obtenidas con ADCP es del orden de $\pm 1 \text{ cm s}^{-1}$ (Nystrom *et al.*, 2002). Otro estudio desarrollado por Mueller (2002) comparó la medición del caudal para un río con diferentes configuraciones del ADCP, encontrando que estos mantenían una diferencia del orden de $\pm 5 \%$. Otra variable significativa es la duración del tiempo de la medición sobre la sección transversal. Se ha demostrado que la incertidumbre se reduce cuando el tiempo de medición incrementa (Oberg y Mueller, 1994). En general, estas investigaciones se enfocaron en mediciones de velocidad y del flujo. Sin embargo, en fechas recientes han surgido nuevas aplicaciones, entre las que se mencionan: la cuantificación del transporte de sedimentos (Venditti *et al.*, 2016);

la detección de corrientes secundarias (Priego-Hernández y Rivera-Trejo, 2016); el monitoreo de humedales (Arega, 2013), el entendimiento de hábitats fluviales (Cundy *et al.*, 2007); el conocimiento de ecosistemas acuáticos (Chang *et al.*, 2015) y la calibración de modelos numéricos (García-Reyes *et al.*, 2017).

4.2 Principio de operación

Los ADCP utilizan un sonido ultrasónico mayor a 25 kHz que permite cuantificar la vibración de las partículas en suspensión en el agua. A una baja frecuencia menor a 25 kHz, la amplitud de esta vibración es la misma que la del medio; pero conforme va aumentando, el efecto de la inercia de las partículas llega a ser significativa, haciendo que la vibración sea menor. Así, a frecuencias mayores a 25 kHz, la vibración permanece estacionaria lo que permite medir la velocidad del flujo (Vogt y Neubauer, 1976). En la Figura 4.1a se muestra un diagrama de un pulso acústico (ping) transmitido por uno de los transductores del ADCP. En la Figura 4.1b la energía acústica regresa (backscattered) hacia el transductor con menor energía, ya que la mayor parte de esta energía se absorbe o se refleja en otras direcciones por los sedimentos en suspensión.

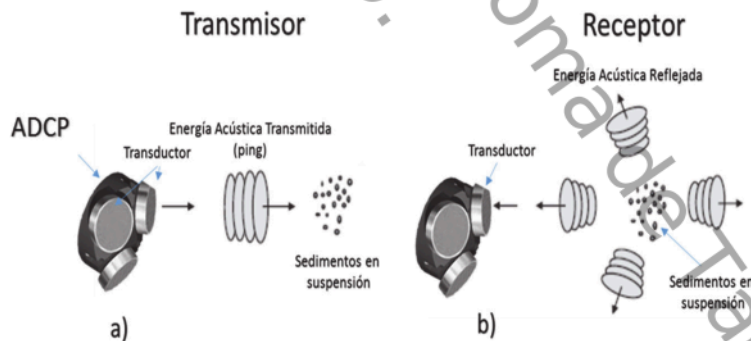


Figura 4.1. Pulso acústico emitido por el transductor del ADCP. a) El haz es reflejado por los sedimentos en suspensión; b) El cambio de frecuencia generada por los sedimentos es medido por el transductor

Los haces de sonido son generados por los transductores que se encuentran en los ADCP; generalmente poseen de tres a cuatro que divergen en 20°, 25° o 30° con respecto a la vertical (Figura 4.2) y que están espaciados uno con respecto al otro en 120° (Sontek, 2007; Teledyne, 2014). Cada transductor genera un haz sónico que viaja hacia el fondo y en su trayecto, divide la profundidad total en celdas del mismo tamaño. En el centro de cada celda se obtiene el promedio de la magnitud del vector velocidad.

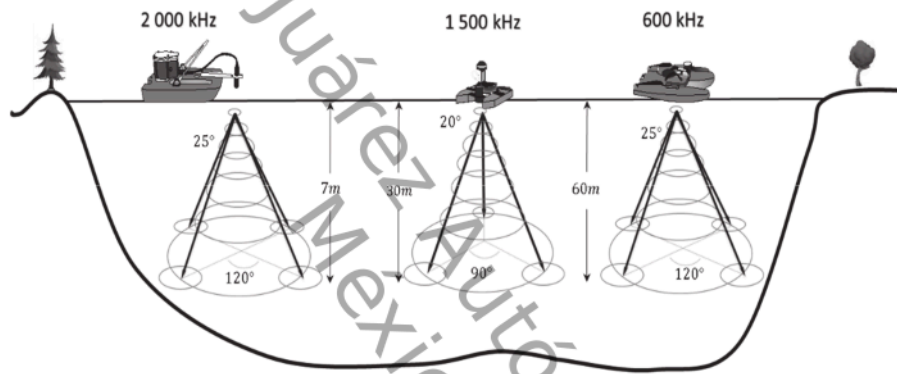


Figura 4.2. Configuración de los haces acústicos de ADCP utilizados.

En la Figura 4.3 los tres haces proporcionan tres vectores de velocidad y normalmente se distribuyen por igual por un ángulo de separación θ conocido para la vertical, donde sus componentes en coordenadas ortogonales para un sistema de tres haces son:

$$V_y = \frac{(2B_1 - B_2 - B_3)}{3 \sin \theta} \quad (4.2)$$

$$V_x = \frac{B_3 - B_2}{\sqrt{3} \sin \theta} \quad (4.3)$$

$$V_z = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{3 \cos \theta} \quad (4.4)$$

Donde, V_y = Velocidad de líneas de corrientes en dirección aguas abajo, $[m s^{-1}]$, V_x = Velocidad en la sección transversal, $[m s^{-1}]$, V_z = Velocidad en la vertical, $[m s^{-1}]$, B_1 = Velocidad radial medida por el haz 1, $[m s^{-1}]$, B_2 = Velocidad radial medida por el haz 2, $[m s^{-1}]$, B_3 = Velocidad radial medida por el haz 3, $[m s^{-1}]$, θ = Ángulo de inclinación del haz con respecto a la vertical $[^\circ]$.

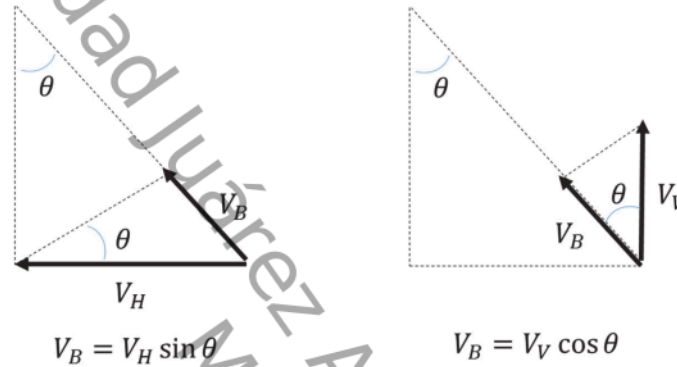


Figura 4.3. Componente vertical (V_V) y componente horizontal (V_H) del vector velocidad medida en paralelo en la dirección de la trayectoria acústica (adaptado de Muller *et al.*, 2009).

Los ADCP según su configuración trabajan a altas o bajas frecuencias, e inclusive con la combinación de ambas. La frecuencia juega un papel clave al momento de la medición, pues este parámetro determina el alcance, penetración y discretización del pulso acústico en la columna de agua. Así, para altas frecuencias se tendrá mayor atenuación de la onda acústica; es decir menos penetración, pero mayor cantidad de celdas de medición; mientras que para bajas frecuencia se tiene una mayor penetración, pero menos celdas de medición. Estos aspectos son importantes ya que existen dos zonas ciegas del transductor, la primera llamada blanking que se define como el tiempo de recorrido que necesita el pulso acústico entre su transmisión y retorno al transductor (Figura 4.4a). Con una frecuencia alta se tendrá un blanking más pequeño en comparación a una frecuencia menor. La segunda como zona de interferencia por los sidelobes y son señales de ruido reflejadas por el cauce del

canal que se sobreponen en la señal de retorno principal (Gordon, 1989). Estas zonas disminuyen cuando se tiene una frecuencia mayor (por ejemplo 2000 kHz) y aumentan cuando se tienen bajas frecuencias (600 kHz). Estas zonas ciegas provocan que, en las márgenes donde hay poca profundidad, no se pueda medir (Figura 4.4b). Por lo tanto, para estimar las velocidades en estas zonas se emplea un método de interpolación (Fulford y Sauer, 1986).

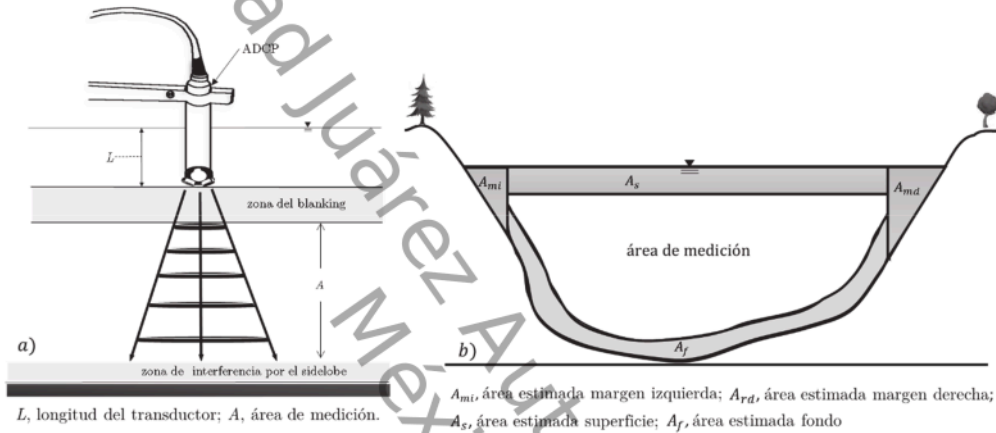


Figura 4.4. Área de medición por equipos acústicos. a) Zona ciega del ADCP; b) áreas estimadas por métodos de interpolación.

Medición de la velocidad del flujo en una embarcación en movimiento

La ecuación general para determinar el caudal de los ríos a través de una superficie arbitraria s , es:

$$Q_t = \int_s \mathbf{V}_f \cdot \hat{n} ds \quad (4.4)$$

Donde Q_t = descarga total del río, en $[m^3 s^{-1}]$, $\mathbf{V}_f$ = vector de velocidad del agua, en $[m s^{-1}]$, $\hat{n}$ = vector unitario perpendicular a ds , ds = elemento diferencial de área, en $[m^2]$.

Lo anterior es solo una forma de la conocida ecuación de continuidad $Q = AV$ sobre una sección transversal. Para medir el gasto en una embarcación en

movimiento utilizando el ADCP, el área s se define por la superficie vertical abajo de la trayectoria a lo largo de la cual el barco se desplaza. En la Figura 4.5 se muestra el producto escalar de $\mathbf{V}_f \cdot \hat{n}$ y es igual a cero cuando la embarcación se está moviendo directamente aguas arriba o aguas abajo, e igual a V_f cuando la embarcación se está moviendo en la dirección del vector normal $\hat{n}$; ambos vectores están en el plano horizontal.

Debido a que el ADCP se monta sobre una embarcación, la velocidad y los datos adquiridos están en referencia al sistema coordenado de la embarcación el cual debe estar ligado a un sistema de geo-posicionamiento geográfico (GPS). Por lo anterior, se formula la ecuación (4.4) de la siguiente forma (Christensen y Herrick, 1982):

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d [(\mathbf{V}_f \times \mathbf{V}_b) \cdot \hat{k}] dz dt \quad (4.5)$$

Donde T = tiempo de recorrido sobre la sección transversal, en $[s]$, d = profundidad total, en $[m]$, $\mathbf{V}_b$ = vector velocidad medida en el barco, en $[m s^{-1}]$, $\hat{k}$ = vector unitario en la dirección vertical, dz = diferencial de la profundidad, en $[m]$, dt = diferencial de tiempo, en $[s]$.

El término del producto cruz de la ecuación (4.5) es muy aproximado para la medición del gasto utilizando perfiladores acústicos. Traducido en términos matemáticos, lo anterior se describe como el producto vectorial de la velocidad del barco y la velocidad del agua; integrado sobre la profundidad de la sección transversal y luego, integrado sobre el tiempo en todo el ancho de sección transversal (Figura 4.5).

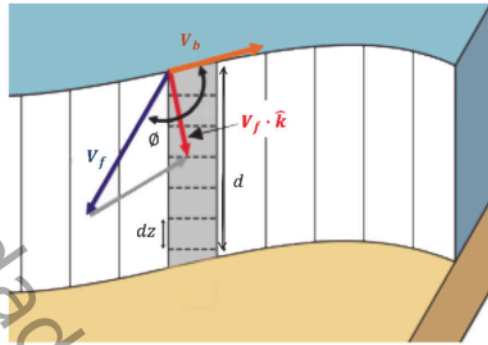


Figura 4.5. Vector velocidad del agua y el barco en un punto medido por el ADCP (adaptado de Simpson, 1993).

El producto vectorial $(V_f \times V_b) \cdot \hat{k}$, se puede convertir a coordenadas rectangulares para facilitar la conexión de la embarcación y el vector velocidad, entonces:

$$(V_f \times V_b) \cdot \hat{k} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad (4.6)$$

Donde a_1 = componente transversal del vector de velocidad media del agua, en $[m s^{-1}]$, a_2 = componente del vector velocidad media de agua en dirección aguas abajo, en $[m s^{-1}]$, b_1 = componente transversal del vector velocidad media del barco, en $[m s^{-1}]$, b_2 = componente del vector velocidad media del barco en dirección aguas abajo, en $[m s^{-1}]$.

A la expresión anterior se le conoce como producto vectorial de la velocidad y se escribe como:

$$f = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad (4.7)$$

Donde, f = al producto vectorial de los vectores de velocidad de agua y la velocidad de barco.

El ADCP proporciona datos de velocidad que están relacionadas con las coordenadas que tiene el bote en el momento de hacer las mediciones. En el cálculo de la descarga, se puede utilizar cualquiera de los sistemas de

coordenadas, siempre y cuando la velocidad del agua y del barco se encuentre en el mismo sistema.

En la práctica, la integral de gasto se aproxima por la sumatoria de todas las secciones donde se mide la descarga. Por lo tanto, la ecuación (4.5) toma la forma:

$$Q_m = \sum_{i=1}^{N_s} \left[\int_0^{d_i} f_i dz \right] t_i \quad (4.8)$$

Donde Q_m = gasto medido sobre el canal (no incluye el gasto medido en la orilla), en $[m^3s^{-1}]$, N_s = números de subsecciones de descarga medido, d = profundidad de una subsección, en $[m]$, f_i = magnitud del producto cruz en la profundidad i , dz = diferencial en la vertical de la profundidad de la subsección i , en $[m]$, t_i = tiempo en la trayectoria entre los extremos de las subsecciones, en $[s]$.

4.3 Recolección de datos

Para esta investigación, la hidrodinámica se determinó utilizando el perfilador acústico Doppler conectado a un sistema diferencial de posicionamiento global (DGPS), montado sobre una embarcación de aluminio con motor fuera de borda. El proceso consistió en realizar cuatros recorridos sobre una misma sección transversal del canal en estudio para obtener el promedio de velocidad del flujo y moviéndose de la margen izquierda a la margen derecha del río según lo sugerido por Pérez y Díaz (2000) y como se muestra en la Figura 4.6.

El número de secciones transversales que se realizaron para una zona de estudio dependió de la precisión del desarrollo del flujo requerida en la investigación (es decir, a mayor número de secciones transversales, mayor precisión). En este trabajo, se consideró una distancia de 25 m entre secciones

transversales ya que, en esta, la distribución de las velocidades en planta se mantuvo uniforme (García-Reyes *et al.*, 2017).

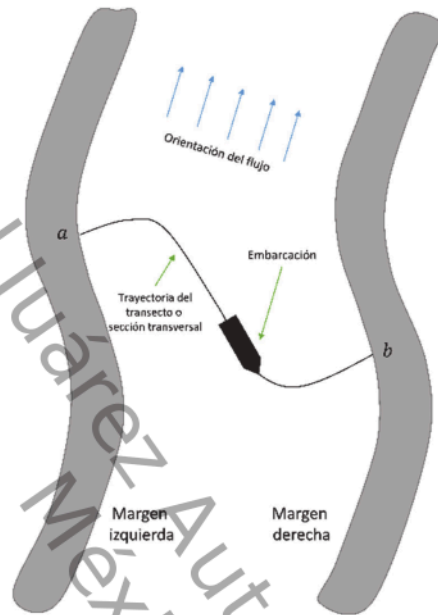


Figura 4.6. Trayectoria arbitraria de la margen izquierda a la margen derecha en la medición del flujo de un río.

4.4 Calibración de los equipos

Los equipos acústicos requirieron de una calibración para obtener las direcciones de los vectores de velocidad del flujo. Por lo que se debe calibrar la brújula interna de cada equipo. Este proceso se identifica como Heading, Pitch y Roll (HPR). En este trabajo, la calibración se inició realizando movimientos circulares en dirección de las manecillas del reloj sobre su plano horizontal. Otra variable a calibrar es la declinación magnética (variación magnética o variación de la brújula), que es la diferencia angular entre el polo norte magnético (la brújula del equipo apunta en esa dirección) y el polo norte geográfico. Este valor es un dato que debe ser ingresado a los equipos. En la presente investigación la declinación magnética se obtuvo de la página web de la British Geological Survey.

(BGS, 2015), mediante el ingreso de las coordenadas del sitio de estudio. Otro parámetro que debe tomarse en cuenta es la movilidad del fondo del río. Por lo que se debe dejar inmóvil la embarcación usada y medir con el ADCP al menos durante 5 min (Sontek, 2007; Teledyne, 2014). En caso de que el equipo detecte fondo móvil, su software realizará la corrección de los datos en crudo de las componentes de velocidad del flujo de manera automática.

Para llevar a cabo las mediciones de hidrodinámica, se dispuso de los perfiladores acústicos Doppler, marca Sontek modelo RiverSurveyor M481 y los perfiladores StreamPro y RiverRay de la Teledyne como se muestra en la Figura 4.7. Las características de los equipos se describen en la Tabla 4.1.

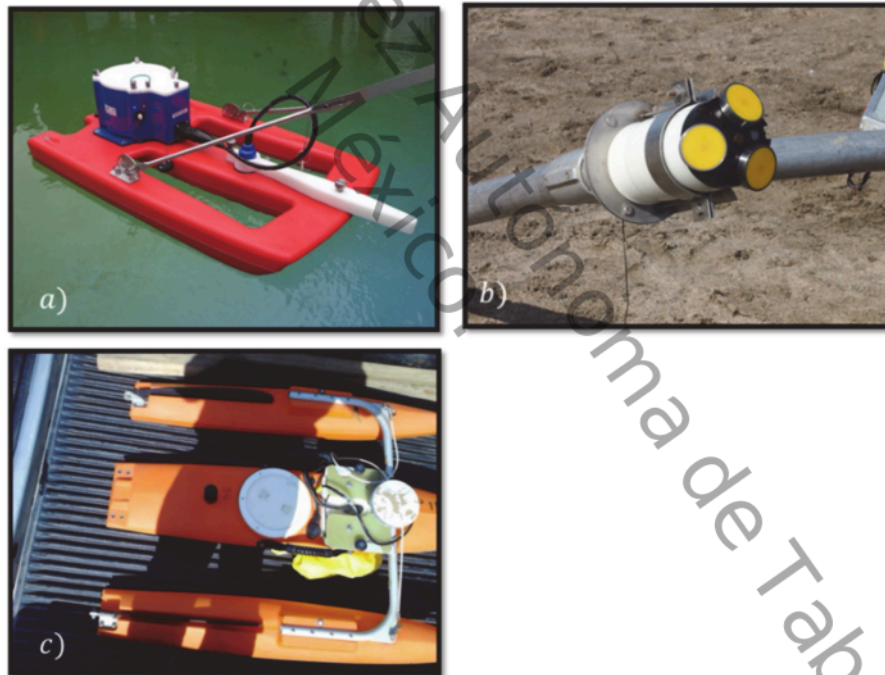


Figura 4.7. Equipos acústicos utilizados: a) Perfilador StreamPro de la Teledyne; b) Perfilador RiverCat de la SonTek; c) Perfilador RiverRay de la Teledyne.

Tabla 4.1. Características y configuración de los equipos acústicos utilizados (ADCP).

Especificaciones	StreamPro (Teledyne)	RiverCat (Sontek)	RiverRay (Teledyne)
Frecuencia	2000 kHz	1500 kHz	600 kHz
Ángulo de haz	20°	25°	30°
Rango de operación	0.20 – 7.0 m	0.90 – 30 m	0.40 – 60 m
Tamaño de celda	0.02 – 0.20 m	0.25 – 4.0 m	Selección automática*
Blanking	0.03 m	0.40 m	0.25 m

* 0.10 m mínimo

Si bien el StreamPro permite una resolución detallada de los vectores de velocidad por la frecuencia de operación, el RiverRay tiene un mayor número de perfiles y su frecuencia se ajusta a las profundidades que se presenta en la zona de estudio

4.5 Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos hidrodinámicos medidos por los ADCP's en el área de estudio, fue realizado los softwares RiverSurveyor® y Winriver II®, que son los que opera cada equipo. Se creó un archivo de Excel®, donde se clasificaron los datos por: sus componentes de velocidad del flujo, la profundidad en la cual se midió cada vector, la distancia transversal medida entre cada vector, la distancia total de la sección transversal y la posición geográfica de cada vector velocidad (Tabla 4.2). A partir de un algoritmo desarrollado, se llevó a cabo un proceso de filtrado de la hidrodinámica (Tabla 4.3 y 4.4), secciones transversales y batimetría (Tabla 4.5). Los datos de medición y configuración del equipo RiverRay se organizaron en un solo archivo de texto separado por espacios y sólo se tomaron los campos de las velocidades y características hidráulicas de las secciones. El software del RiverCat generó cinco archivos de texto que contienen toda la información de las velocidades y características hidráulicas de la sección. Se emplearon los softwares Excel® con Visual Basic, Tecplot® y

Velocity Mapping Toolbox (VMT) para el procesamiento y la visualización del campo de velocidades.

Tabla 4.2. Datos procesados en hojas de trabajo de software Excel®.

Posición geográfica		Sección transversal		Componentes del vector velocidad	
UTM x [m]	UTM y [m]	Distancia x [m]	Elevación de fondo [m]	Velocidad x [$m s^{-1}$]	Velocidad y [$m s^{-1}$]
513851.817	1976837.16	0	-2.763	0.129	0.146
513892.953	1976966.09	0	-3.092	0.164	0.209
513910.291	1977029.59	0	-2.718	0.222	0.210
513850.996	1976837.53	0.9	-2.746	0.098	0.275
513892.169	1976966.53	0.9	-3.209	-0.263	0.077
513909.416	1977029.8	0.9	-2.931	0.161	0.104
513920.057	1977094.68	0.9	-2.940	0.018	0.393
513929.015	1977154.44	0.9	-2.591	0.040	0.258
513927.967	1977263.31	0.9	-3.467	-0.086	0.184
513930.211	1977331.05	0.9	-3.475	-0.008	-0.035
513850.174	1976837.89	1.8	-2.769	0.112	0.253
513891.386	1976966.97	1.8	-3.440	0.116	0.330
513890.603	1976967.42	2.7	-3.494	-0.034	0.251
:	:	:	:	:	:

Tabla 4.3. Datos procesados: velocidades secundarias.

Perfil	x [m]	y [m]	v_x [$m s^{-1}$]	v_y [$m s^{-1}$]	$\hat{v}_x$ [$m s^{-1}$]	$\hat{v}_y$ [$m s^{-1}$]	v_s [$m s^{-1}$]	v_p [$m s^{-1}$]
1	4.2	-0.65	0.153	0.019	0.196	-0.322	0.141	-0.063
1	4.2	-0.90	0.375	-0.346	0.196	-0.322	-0.141	0.490
1	4.2	-1.15	0.133	-0.365	0.196	-0.322	0.076	0.381
1	4.2	-1.40	0.308	-0.250	0.196	-0.322	-0.134	0.374
1	4.2	-1.65	0.400	-0.618	0.196	-0.322	-0.021	0.736
1	4.2	-1.90	-0.055	-0.789	0.196	-0.322	0.457	0.646
1	4.2	-2.15	0.340	-0.502	0.196	-0.322	-0.030	0.606
1	4.2	-2.40	0.337	-0.436	0.196	-0.322	-0.062	0.548
1	4.2	-2.65	0.151	-0.695	0.196	-0.322	0.232	0.672
1	4.2	-2.90	0.494	-0.301	0.196	-0.322	-0.266	0.514
1	4.2	-4.15	0.005	-0.255	0.196	-0.322	0.128	0.221
1	4.2	-4.40	0	-0.323	0.196	-0.322	0.168	0.276
1	4.2	-4.65	0.084	0.020	0.196	-0.322	0.082	-0.027
1	4.2	-4.90	0.280	-0.265	0.196	-0.322	-0.102	0.372
:	:	:	:	:	:	:	:	:

x , distancia; y , elevación del fondo; v_x , magnitud de velocidad en x ; v_y , magnitud de velocidad en y ; $\hat{v}_x$, velocidad promedio en x ; $\hat{v}_y$, velocidad promedio en y ; v_s , velocidad secundaria; v_p , velocidad primaria

Tabla 4.4. Datos procesados: velocidad en planta.

Perfil	UTM x [m]	UTM y [m]	$\hat{v}_x$ [$m\ s^{-1}$]	$\hat{v}_y$ [$m\ s^{-1}$]	$ \hat{v}_p $ [$m\ s^{-1}$]
1	511025.2803	1991260.5575	0.218	-0.328	0.394
2	511020.6914	1991264.0588	0.217	-0.287	0.360
3	511016.9849	1991266.4543	0.234	-0.181	0.296
4	511014.3373	1991268.2960	0.242	-0.287	0.375
5	511014.3362	1991270.3251	0.509	-0.199	0.546
6	511015.7452	1991274.0135	0.360	-0.270	0.450
7	511017.8602	1991278.0718	0.478	-0.256	0.542
8	511021.0337	1991282.1295	0.463	-0.344	0.577
9	511024.3842	1991286.0038	0.467	-0.311	0.561
10	511027.2059	1991288.9561	0.372	-0.319	0.490
11	511030.5548	1991293.5682	0.423	-0.234	0.484
:	:	:	:	:	:

UTM x , posición geográfica en el eje x ; UTM y , posición geográfica en el eje y ; $\hat{v}_x$, velocidad promedio en x ; $\hat{v}_y$, velocidad promedio en y ; $|\hat{v}_p|$, magnitud de la velocidad en planta

Tabla 4.5. Datos procesados: sección transversal y batimetría.

Perfil	UTM x [m]	UTM y [m]	z [msnm]
1	511260.65	1990910.59	-5.35
2	511263.16	1990907.56	-5.67
3	511263.59	1990910.55	-6.34
4	511260.1	1990907.65	-6.32
5	511264.04	1990908.40	-5.16
6	511260.41	1990910.00	-5.94
7	511261.53	1990907.15	-6.51
8	511263.27	1990911.35	-6.11
9	511263.09	1990910.08	-5.35
10	511259.98	1990907.42	-6.06
11	511263.09	1990907.16	-6.41
12	511260.13	1990910.56	-6.18
13	511263.01	1990909.50	-5.34
14	511260.09	1990906.56	-6.22
15	511263.24	1990906.60	-6.32
:	:	:	:

UTM x , posición geográfica en el eje x ; UTM y , posición geográfica en el eje y ; z , elevación del fondo del río.

4.6. Sonda Multihaz SeaBeam 1000

Con la finalidad de recolectar datos batimétricos se empleó una sonda Multihaz SeaBeam 1000. Se trata de un equipo que tiene un conjunto de transductores que emiten pulsos acústicos a una frecuencia constante. Estos permiten la recolección de datos batimétricos de ríos con una resolución fina y una incertidumbre relativamente pequeña. Los procedimientos para su calibración y puesta a punto están muy bien definidos por las compañías de fabricación. En la Figura 4.8 se muestra el multihaz SeaBeam 1000 y en la Tabla 4.6 se muestran las características del multihaz.



Figura 4.8. Multihaz SeaBeam 1000.

Tabla 4.6. Características del multihaz SeaBeam 1000.

Especificaciones	SeaBeam
Frecuencia	180 kHz
Ángulo de haz	153 °
Rango de operación	250 m
Tiempo de emisión del pulso	0.15 ms
Número de haces	126
Haz espaciados	Triangular

El procesamiento de los datos en crudos de la sonda multihaz estuvo a cargo de la empresa Lupach S.A. de C.V. El procedimiento de medición batimétrica de los ríos en estudio con ayuda de la sonda multihaz modelo SeaBeam 1000, consistió en lo siguiente: se tomaron mediciones 800 m aguas arriba del punto de unión de la confluencia para los ríos tributarios y a una distancia de un kilómetro aguas abajo del punto de unión de la confluencia. El detalle de la batimetría que se nos entregó fue de 2 m entre cada sección medición.

Capítulo 5. Modelación numérica

5.1 Generalidades

Para entender el comportamiento de los flujos en la interfaz de mezclado (Figura 5.1) hasta la zona de recuperación del flujo en una confluencia, se requiere conocer con detalle el campo de velocidades a superficie libre. Existen dos formas de obtener las velocidades en superficie libre: por mediciones en campo y por medio de modelos numéricos validados con datos de campo.

- La primera, involucra procedimientos que generan tiempo y costos, teniendo como beneficio información precisa y real de los fenómenos físicos que se desarrollan en el entorno.
- En la segunda, el costo es bajo –comparado contra mediciones– y requiere sólo de procesamiento de datos, obteniendo aproximaciones de los fenómenos estudiados.

Debido a que un objetivo de este trabajo de investigación fue entender el comportamiento de la interfaz de mezclado hasta la zona de recuperación del flujo, se decidió realizar un modelo numérico bidimensional de la shear layer. Al validarlo contra datos de campo es posible predecir comportamientos, establecer referencias y controlar el rendimiento del sistema en una infinidad de condiciones (Stoesser *et al.*, 2010).



Figura 5.1. Interfaz de mezclado (líneas punteadas color naranja) formada por la unión entre los ríos Grijalva y Carrizal.

La modelación numérica del campo de velocidades se aplica para modelos en dos-dimensiones (2D) y tres-dimensiones (3D); sin embargo, cada uno de ellos se aproximan en mayor o menor detalle a los fenómenos físicos en estudio (Oerted, 2015). Cuando existen zonas de recirculación en planta, los modelos 2D consideran las dos componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad, prediciendo con suficiente aproximación el campo de velocidades. Este tipo de resultados son aplicables para zonas de inundación en planicies. Los modelos 3D ocupan las tres componentes del vector velocidad, dos horizontales y una vertical y son aplicables en áreas muy específicas del sistema (Oerted, 2015); por ejemplo, en estudios locales de socavación de pilas o identificación de zonas de recirculación a nivel local.

Por la escala de medición que se modela en este trabajo (una confluencia), se utilizaron modelos de simulación numérica 2D. Ejemplos de modelos 2D comerciales para la simulación de flujos en ríos, se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Características principales de softwares de simulación de flujo de ríos.

Software	Dimensiones	Fenómenos que modelan	Entorno que trabajan	Costo
HYDRO_AS	2D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos - Transporte de contaminantes	Windows	Licencia
MIKE21	2D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos - Transporte de contaminantes	Windows	Licencia
TELEMAC	1D, 2D y 3D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos	Windows y Linux	Libre
IBER	2D	- Flujo hidrodinámico - Transporte de sedimentos	Windows	Libre
RIVER 2D	2D	- Flujo hidrodinámico - Hábitat de peces - Evaluación de hielo	Windows	Libre

Todos los softwares de la Tabla 5.1 resuelven las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de Saint-Venant. Estos softwares utilizan métodos numéricos por discretización como son: métodos de diferencias finitas, métodos de volumen finito y métodos de elementos finitos. Los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial (Cea *et al.*, 2007; Constantinescu *et al.*, 2012; Cea y Blade, 2015).

En esta investigación se eligió el software IBER, por ser un software de libre acceso y que ha demostrado resultados confiables (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014; Cea y Blade, 2015; Álvarez *et al.*, 2015; García-Reyes *et al.*, 2017). En la validación del modelo numérico, se emplearon equipos Doppler, ya que permiten medir el campo de velocidades 3D con una incertidumbre mínima (0.1 ms^{-1}).

5.2 Modelación Numérica con Iber

Iber es un modelo numérico en 2D, que simula flujo turbulento a superficie libre, tanto en régimen permanente como no permanente. Permite el estudio de

procesos medioambientales e hidráulica fluvial. El rango de aplicación incluye: la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de mareas en estuarios.

El software Iber consta actualmente de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Figura 5.2). Todos ⁵ trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros.

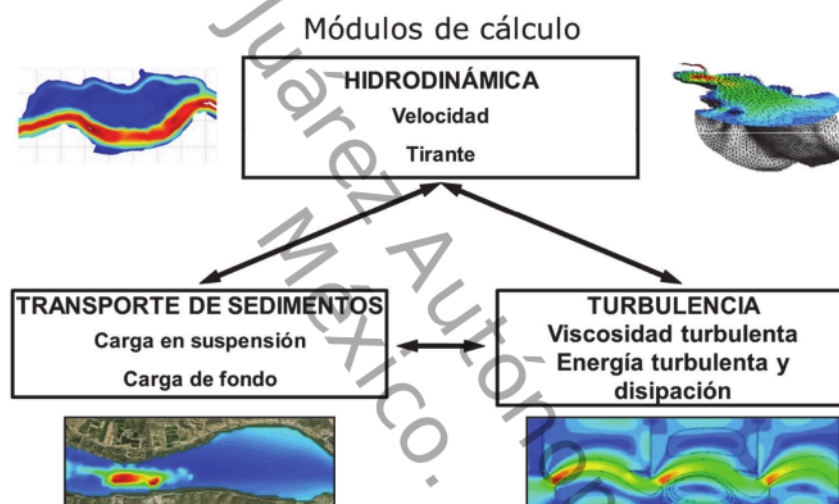


Figura 5.2. Módulo de cálculo en Iber.

En este trabajo se empleó únicamente el módulo hidrodinámico. Este módulo requiere de: las condiciones iniciales, los caudales en cada uno de los ríos tributarios de la confluencia en estudio, la rugosidad y el nivel de la superficie libre del agua.

5.3 Ecuaciones Hidráulicas ¹¹ en Iber

A diferencia de los modelos unidimensionales (1D) que trabajan con la velocidad media en la sección y que suponen que la dirección del flujo es perpendicular a esta, el módulo hidrodinámico de Iber trabaja con las dos

componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad. Estas componentes se definen como (Cea y Blade, 2015):

$$V_x = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} v_x dz \quad V_y = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} v_y dz \quad h = z_s - z_b \quad (5.1)$$

Donde h es el tirante en cada punto del dominio $[m]$, v_x y v_y son las componentes del vector velocidad del flujo $[m s^{-1}]$, V_x y V_y son las componentes promediadas en la profundidad del vector de velocidad del flujo $[m s^{-1}]$, z_s es la elevación de la superficie libre del agua $[m]$ y z_b es la cota del fondo $[m]$.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. Dichas ecuaciones se expresan como:

Ec. de continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = 0 \quad (5.2)$$

Ec. de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial h V_x}{\partial t} + \frac{\partial h V_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h V_x V_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + 2\Omega h \sin(\lambda) V_y + \frac{\partial h}{\partial x} \tau_{xx}^e + \frac{\partial h}{\partial y} \tau_{xy}^e \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial h V_y}{\partial t} + \frac{\partial h V_y^2}{\partial y} + \frac{\partial h V_x V_y}{\partial x} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + 2\Omega h \sin(\lambda) V_x + \frac{\partial h}{\partial x} \tau_{xy}^e + \frac{\partial h}{\partial y} \tau_{yy}^e \quad (5.4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad $[m s^{-2}]$, 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 $[kg m^{-3}]$, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra $[rads^{-1}]$, λ es la latitud del punto considerado, y τ_{xx}^e , τ_{xy}^e y τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales. Dichas ecuaciones suponen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis

de presión hidrostática se cumple en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. De igual modo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple 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. Las ecuaciones pueden además, tener en cuenta el efecto de variaciones en la presión atmosférica, así como aportaciones puntuales o distribuidas del caudal.

5

En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, en evaluación de zonas inundables, y en el cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes (Constantinescu *et al.*, 2012; Cea y Blade, 2015; García-Reyes *et al.*, 2017).

5.4 Entorno de Trabajo en Iber

Para realizar la simulación hidráulica en dos dimensiones se necesita tener conocimientos teóricos en: hidráulica, dinámica fluvial y modelización numérica unidimensional. El Iber es un software de licencia libre, visual e intuitiva, que tiene tres etapas: a) preproceso; b) proceso y c) posproceso. A continuación, se enlistan las características de cada una.

a) PREPROCESO, consiste en:

- Crear o importar una geometría.
- Condiciones de contorno, iniciales y rugosidad.
- Mallado de cálculo.

b) PROCESO, consiste en:

- Iniciar el cálculo.
- Evolución de la simulación.

c) POSTPROCESO, consiste en:

- Visualización de resultados.

En la Figura 5.3 se muestra el resumen de las etapas que se deben seguir para la modelación numérica bidimensional utilizando el software Iber 2.4.

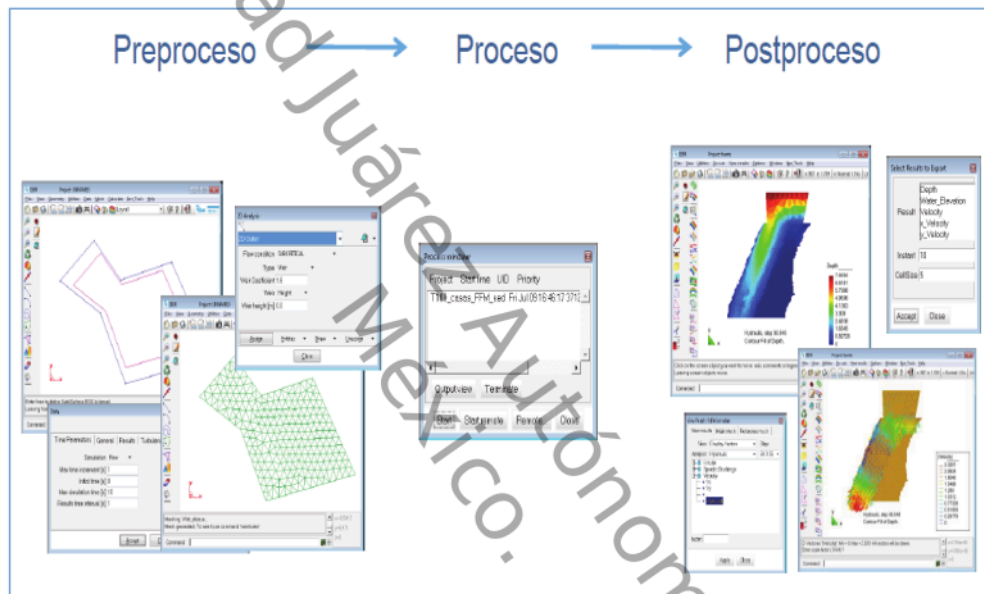


Figura 5.3. Resumen de las etapas del modelo numérico.

A continuación, se describen detalladamente el desarrollo de cada etapa.

5.4.1 PREPROCESO

a) Creación de geometría a modelar

Iber maneja dos conceptos de geometrías para la modelación numérica; el primero se refiere a geometrías generadas en el mismo entorno de Iber o prediseñadas con softwares de diseño estructural (AutoCad). El segundo, a geometrías de modelos digitales de elevaciones (MDE) que son diseñadas con softwares de sistemas de información geográficas (ArcGis). En ambos casos los

datos pueden ser propuestos u obtenidos en campo. En este trabajo se utilizó un modelo digital de elevación para la generación de la geometría a partir de datos obtenidos en campo. En la Figura 5.4 se muestran los tres formatos que utiliza Iber para la modelación numérica.

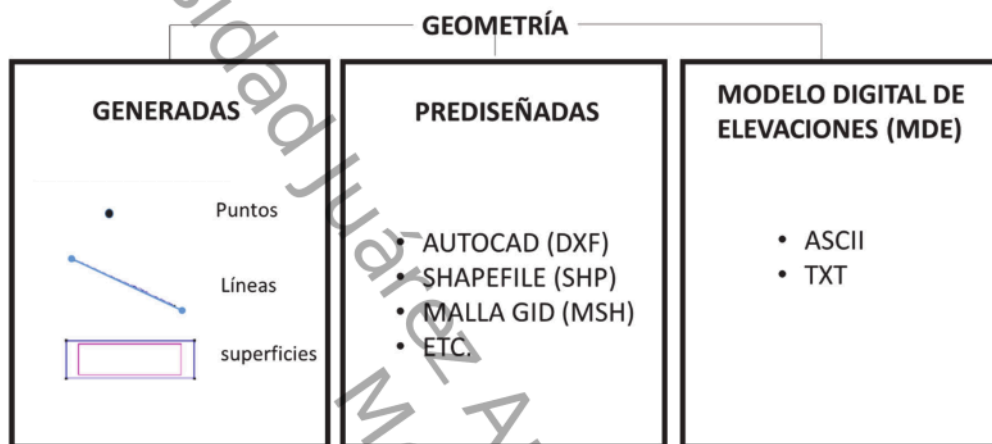


Figura 5.4. Formatos de diseño de geometría generadas, prediseñadas y de los modelos digitales de elevación.

b) Condiciones de contorno

En un problema bidimensional es necesario distinguir entre dos tipos de contornos: abiertos y cerrados. Los contornos abiertos son utilizados en ríos y se les pueden imponer diferentes tipos de condiciones. Los contornos cerrados también llamados contornos de tipo pared son impermeables; es decir, no permiten el paso del fluido a través de ellos. En este trabajo solo nos enfocamos en las condiciones de contornos abiertos.

Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende del tipo de contorno (de entrada, o de salida de flujo), así como del tipo de régimen (rápido/lento).

Para condiciones de contorno de entrada si el régimen es supercrítico, se necesitan imponer tres condiciones (una para cada ecuación de St.Venant). Para el caso de ríos con régimen subcrítico es suficiente con imponer dos condiciones. Para las condiciones de salida de ríos con régimen subcrítico es suficiente con imponer una sola condición, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico. En este trabajo debido a que la zona de estudio es un río de planicie y este trabaja a régimen subcrítico, se utilizaron como condiciones de contorno de entrada, el caudal total y como condiciones de salida una curva de gasto elevación. En la Tabla 5.2 se enlistan las condiciones de entrada y salida para los contornos abiertos que acepta Iber.

Tabla 5.2. Condiciones de contorno implementadas en los contornos abiertos.

Contorno	Régimen	Condición
Entrada	Caudal total	Subcrítico / crítico
		Supercrítico
	Caudal específico	Subcrítico / crítico
		Supercrítico
Salida	Subcrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado.
		b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua.
		5 a) Calado
		b) Cota de agua
	Supercrítico	c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga)
		d) Curva de gasto
	Subcrítico / crítico	No es necesario imponer ninguna condición

c) Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del problema en el entorno Iber son aplicables a todo el dominio del modelo numérico. Estas se pueden emplear en dos formas. La primera se refiere a la cota del agua; esto implica que al momento de modelar existe ya un nivel de agua asignado y es útil para contornos cerrados. La segunda opción hace referencia al calado del agua; aquí el nivel del agua inicia desde cauce del canal hasta una lámina de agua asignada en las condiciones de

contorno, lo que permite la evolución del flujo del agua en el modelo numérico y es más aplicable a contornos abiertos.

d) Rugosidades

La rugosidad cumple un papel fundamental en el modelo y es necesario fijarla antes de iniciar el cálculo. En Iber incluso, sin un valor de rugosidad de referencia asignado en la malla, este no podría realizar algún tipo de simulación. Inicialmente debe tenerse en cuenta que la rugosidad en canales naturales y zonas de aportación tiene dos componentes importantes, la rugosidad de grano (irregularidades de las paredes o tamaño del sedimento de fondo como tal), y la rugosidad de la vegetación, que en términos de parámetros morfométricos se traduce en la fuerza de arrastre y la viscosidad.

En Iber la rugosidad se asigna a través de un coeficiente de rugosidad de Manning para un tipo determinado de superficie, por ejemplo, de las tablas existentes en la literatura o con datos obtenidos en campo. Las formas de la asignación de la rugosidad son dos: a) una sola rugosidad para toda la geometría, con el inconveniente que considerar una rugosidad constante en el tiempo puede derivar en inconsistencias en la distribución de flujo (Chow, 1959); b) asignar diferentes rugosidades a la geometría en función del material encontrado en el área de estudio. Esta opción sería la adecuada para el modelo numérico; sin embargo, el costo en recurso y tiempo es considerable. En este trabajo se consideró solo una rugosidad para toda la geometría del modelo numérico. En la Figura 5.5 se muestran las rugosidades de Manning o el uso de suelos predeterminados en el programa Iber.

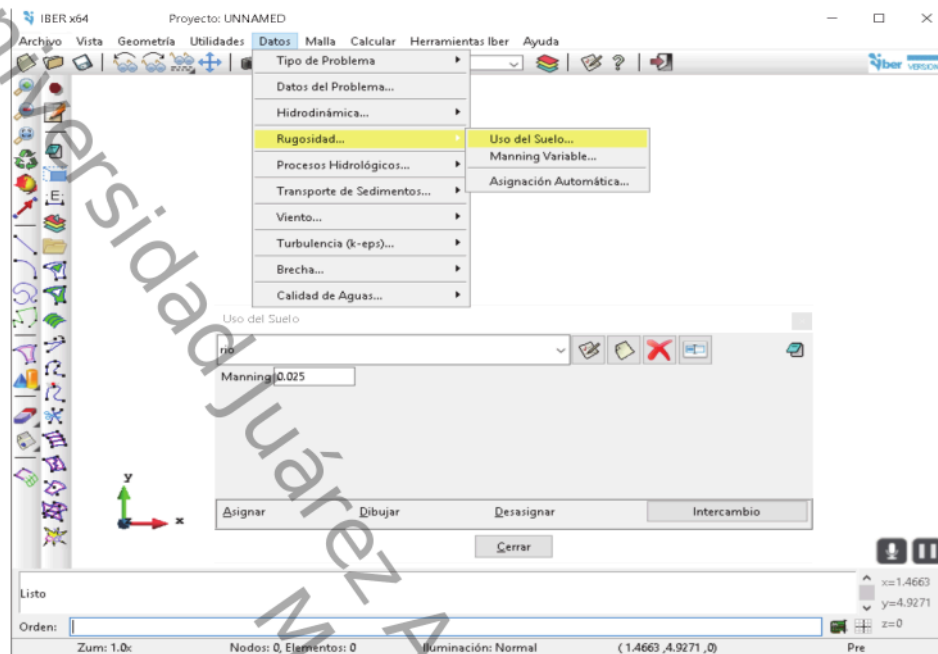


Figura 5.5. Coeficiente de rugosidad de Manning o uso de suelo predeterminados en el entorno IBER.

e) Mallado de cálculo

En los modelos numéricos, los cálculos de transporte de flujos superficiales y subterráneos se realizan a nivel de celdas, aplicando la resolución de las ecuaciones de Saint Venant a través de esquemas de volúmenes finitos. De esta manera, es muy importante la concepción y tratamiento de cada una de las celdas a través del mallado del terreno en estudio; sin embargo, no todos los conceptos hidráulicos mantienen la misma importancia en el mallado es decir, las zonas del cauce de río que no presenten topografías irregulares; por ende, el curso del agua no generará aumentos representativos de calado. Por tal motivo, el efecto de transporte y tránsito de crecientes es poco representativo en los resultados del modelo hidrodinámico. Por el contrario, en las zonas donde la topografía acoge toda la importancia en el transporte del flujo es necesaria la

aplicación a detalle de las ecuaciones de Saint Venant, para lograr su adecuada caracterización.

Iber implementa dos tipos de malla: estructurada o no estructurada. En cualquiera de los dos casos se necesita aplicar un valor al error cordal. El concepto de error cordal es importante ya que determina el distanciamiento medio entre la curva topográfica y el límite del elemento finito. En mallas estructuradas, los errores cordales son representativos debido a que el tamaño de las celdas es mayor, pero generan un menor número de elementos de malla y mayor rapidez en los rendimientos del modelo. Para mallas no estructuradas, el error cordal es menor obteniendo una mayor precisión y adaptación al terreno, pero podrían generarse tamaños de celda menores aumentando los tiempos de simulación. En la Figura 5.6 se muestra una comparativa entre las mallas estructuradas y no estructuradas respecto al error cordal. En este trabajo se implementó el mallado no estructurado para el terreno en estudio.

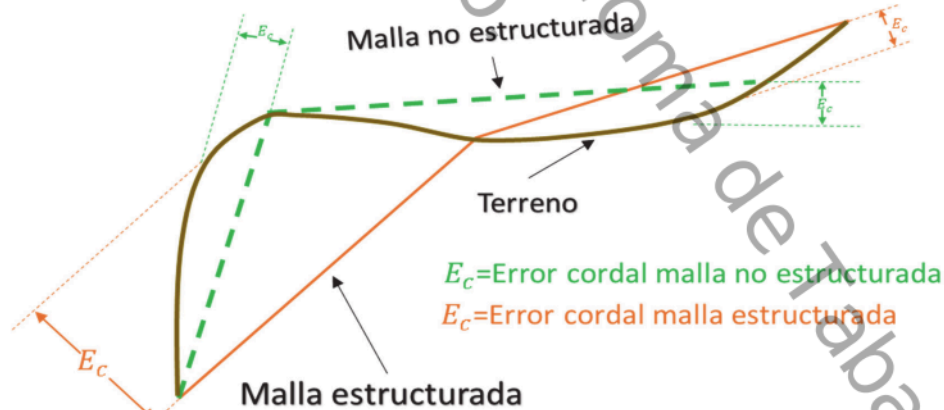


Figura 5.6. Representación comparativa de mallas estructuradas y no estructuradas respecto al error cordal.

5.4.2 PROCESO

Para iniciar un cálculo del modelo numérico en Iber, se deben fijar los parámetros de cálculo, o datos del problema, mediante las distintas pestañas del menú “*Datos > Datos del problema*” (Figura 5.7). En datos de problema solo se toma en cuenta el tiempo máximo de procesamiento del modelo numérico, los intervalos de tiempo de resultados, el número de procesadores, el esquema numérico de primer orden (procesamiento más rápido) y la selección de resultados como: calado, velocidad, caudal específico, cota del agua y número de Froude.

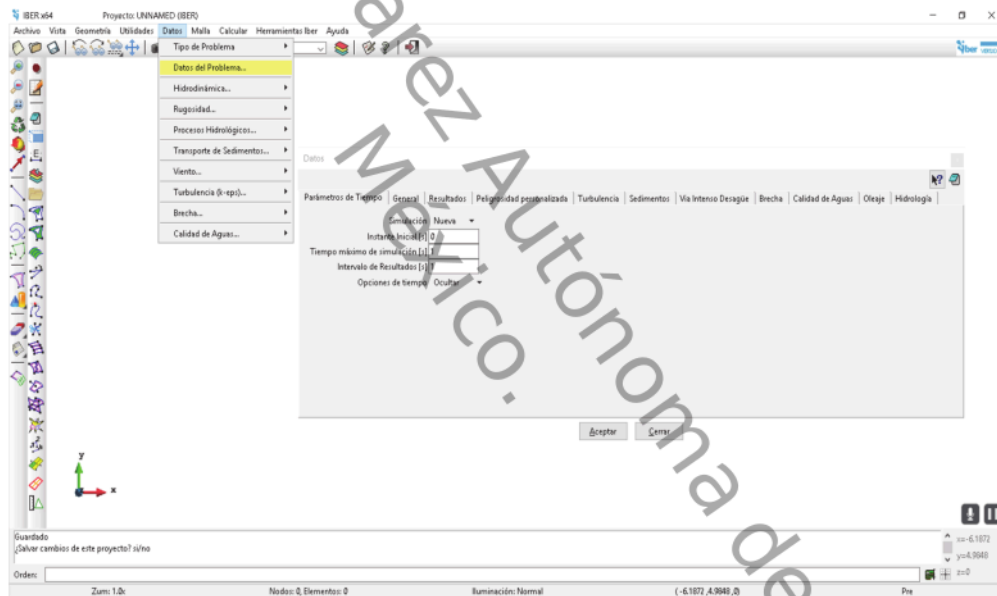


Figura 5.7. Datos del problema en el entorno Iber.

A través del menú *Calcular* es posible iniciar directamente el cálculo (“*Calcular > Calcular*”) o acceder a la ventana de cálculo (“*Calcular > Ventana de cálculo*”). Esta segunda opción permite tener un mejor control del proceso de

cálculo, o acceder al archivo que muestra el estado del proceso (Botón *Ver salida*), mientras el cálculo se está ejecutando.

La ventana de información del proceso también se abre, durante el proceso o cuando éste ha finalizado, con el menú "*Calcular > Ver información del proceso*". Es conveniente consultar dicha información para detectar posibles avisos de errores. En la Figura 5.8 se presenta una captura de pantalla de la ventana de la evolución del modelo numérico, así como los resultados a medida que se van calculando, sin esperar a que termine el cálculo.



Figura 5.8. Ventana del software Iber que muestra la evolución del cálculo del modelo numérico.

5.4.3 POSTPROCESO

Iber dispone de diferentes opciones para visualizar y analizar los resultados, personalizar los colores, asignar leyendas, mostrar etiquetas de

valores, entre otras. Una opción para visualizar resultados es mediante el menú “Ventana > ver resultados”. La ventana de *información de salida* muestra los distintos grupos de resultados (o Análisis) que se pueden visualizar en cada instante de tiempo, como áreas coloreadas, áreas coloreadas suavizadas, o vectores (Figura 5.9). Los resultados obtenidos por el modelo numérico se guardaron en formato raster para un análisis más detallado con programas de sistema de información geográfica.

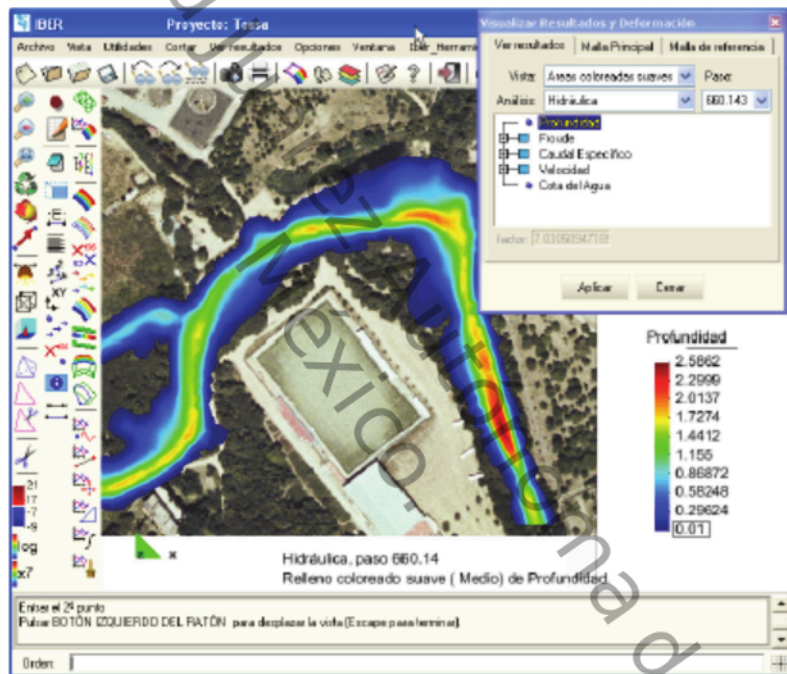


Figura 5.9. Ventana de resultados del modelo numérico Iber.

Finalmente, la calibración de los modelos numéricos se debe realizar con datos obtenidos en campo, para tener la certeza de los resultados del modelo. Es a partir de la validación del modelo numérico que se realizan diferentes corridas de condiciones de gastos para obtener los campos de velocidades.

En este estudio se analizaron los campos de velocidades generados para la confluencia Grijalva – Carrizal, donde se obtuvo la interfaz de mezclado hasta el punto de recuperación del flujo. En el capítulo 6 se describe a detalle este caso de estudio.

Capítulo 6. Caso de aplicación: Confluencia Grijalva - Carrizal

6.1 Localización

Con la finalidad de determinar el desarrollo de las velocidades secundarias hasta la zona de recuperación del flujo en una confluencia, se seleccionó un área de medición ubicada en la confluencia Grijalva - Carrizal, en Tabasco, México (coordenada norte 1990967.91 m N, coordenada este 511288.47 m E, en la zona 15 N) (Figura 6.1). Esta corriente está clasificada como régimen subcrítico (río de planicie); con una pendiente media de 0.00031 m y un gasto medio anual de $382.50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y se considera como un río arenoso.

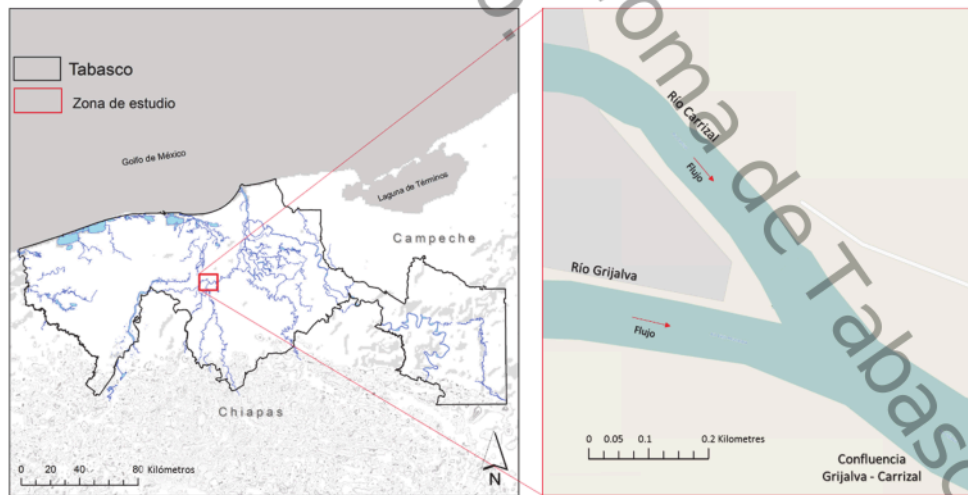


Figura 6.1. Localización de la confluencia en estudio.

Las mediciones se realizaron utilizando el perfilador acústico Doppler conectado a un sistema diferencial de posicionamiento global (DGPS), montado sobre una embarcación. Para el caso de las mediciones realizadas del año 2013 al año 2015 se utilizó el ADCP RiverCat y se realizaron dos mediciones en cada sección que se muestra en la Figura 6.2. Para las mediciones del año 2016 se utilizó el ADCP RiverRay y se hicieron cuatro mediciones en cada una de las 42 secciones de control sobre la confluencia Grijalva – Carrizal, que se muestran en la Figura 6.3.

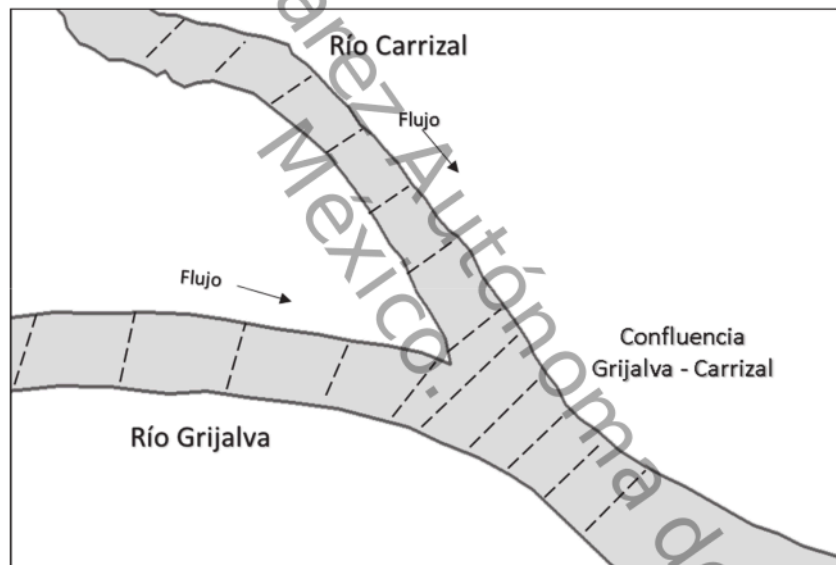


Figura 6.2. Secciones transversales en la confluencia Grijalva - Carrizal donde se aforó con el ADCP RiverCat para los años 2013 - 2015.

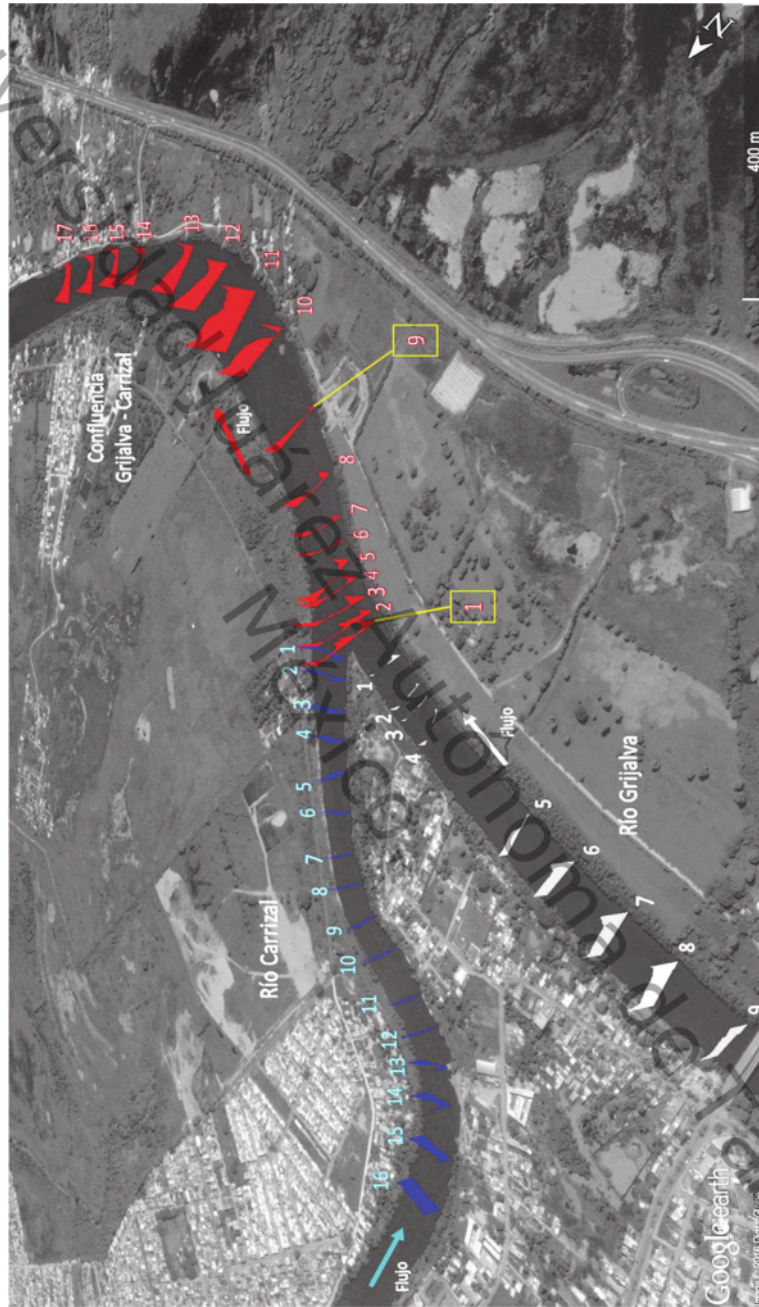


Figura 6.3 Secciones transversales en la confluencia Grijalva - Carrizal donde se aforó con el ADCP RiverRay para el año 2016.

6.2 Batimetría de la confluencia Grijalva - Carrizal

Con los datos de profundidad de los ríos Carrizal, Grijalva y la confluencia obtenidos por los ADCPs, se generó la batimetría de la zona. Los datos de profundidad medidos en el río se transformaron a metros sobre el nivel del mar (msnm), garantizando así la misma referencia y una correcta escala geográfica de la zona de estudio. En la Figura 6.4 se aprecian los modelos digitales de elevaciones (MDE) del relieve del fondo del cauce de los ríos y la confluencia para los años 2013 al 2015 obtenido por el ADP RiverCat. La Figura 6.4a presenta una erosión pronunciada en el margen izquierdo de la confluencia; esta erosión cambia de posición (margen derecha de la confluencia) para las mediciones realizadas en el año 2014 (Figura 6.4b) por las condiciones del flujo y el transporte de sedimentos. La Figura 6.4c muestra que la erosión retorna hacia el margen izquierdo de la confluencia para una condición de gasto diferente que el 2013. El fenómeno de erosión del cauce de la confluencia se explicará en las siguientes secciones. En la Figura 6.5a se observa el MDE de la confluencia Grijalva – Carrizal para el año 2015 con los datos obtenidos por la sonda Multihaz SeaBeam 1000. En la Figura 6.5b se aprecian formaciones de dunas en el río Grijalva, que son generadas por el flujo y el transporte de sedimentos. Estas dunas no se pueden ver en los MDE de los datos obtenidos por los ADCP (Figuras 6.4 y 6.6). El MDE presentado en la Figura 6.6a fue obtenido de los datos recolectados por el equipo ADCP RiverRay correspondiente al año 2016 y muestra una mejor distribución de las elevaciones si se compara con el equipo acústico RiverCat. Sin embargo, el MDE de la Figura 6.6b no muestra una resolución del cauce del río como la que se obtuvo con el equipo multihaz SeaBeam.

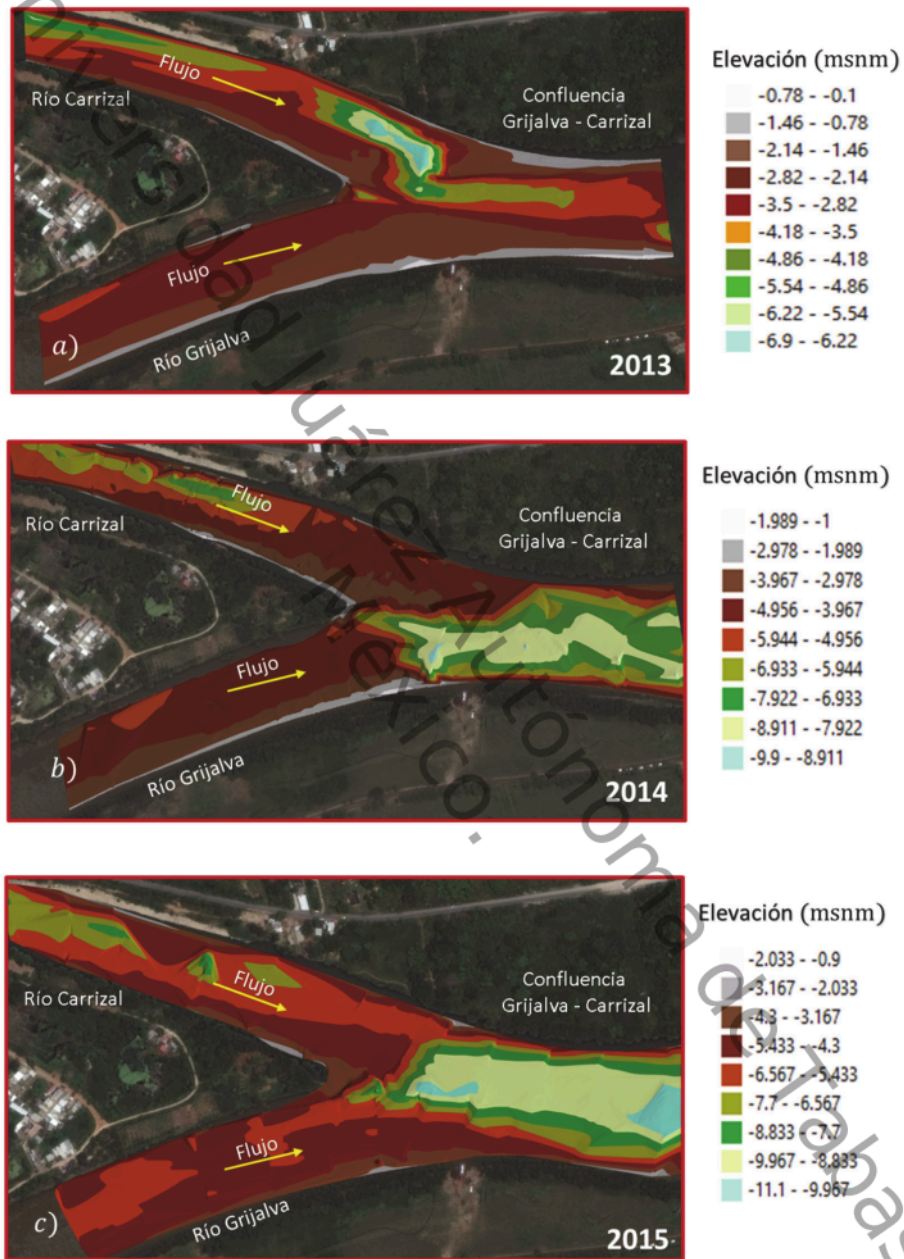


Figura 6.4. Modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva – Carrizal, para los años del 2013 al 2015.

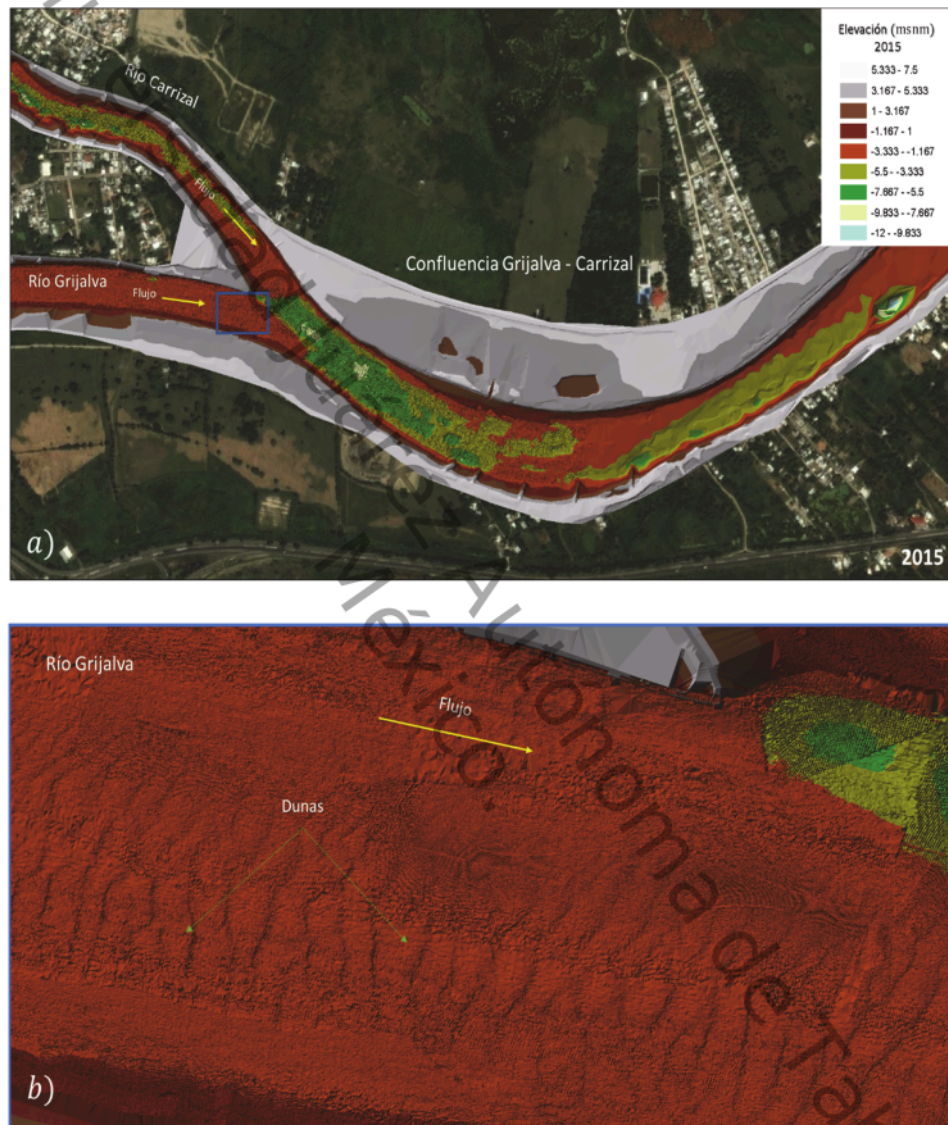


Figura 6.5. Modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva - Carrizal. a) Obtenida con el equipo Multihaz SeaBeam 1000; b) Se muestra un área del cauce del río Grijalva (cuadro azul).

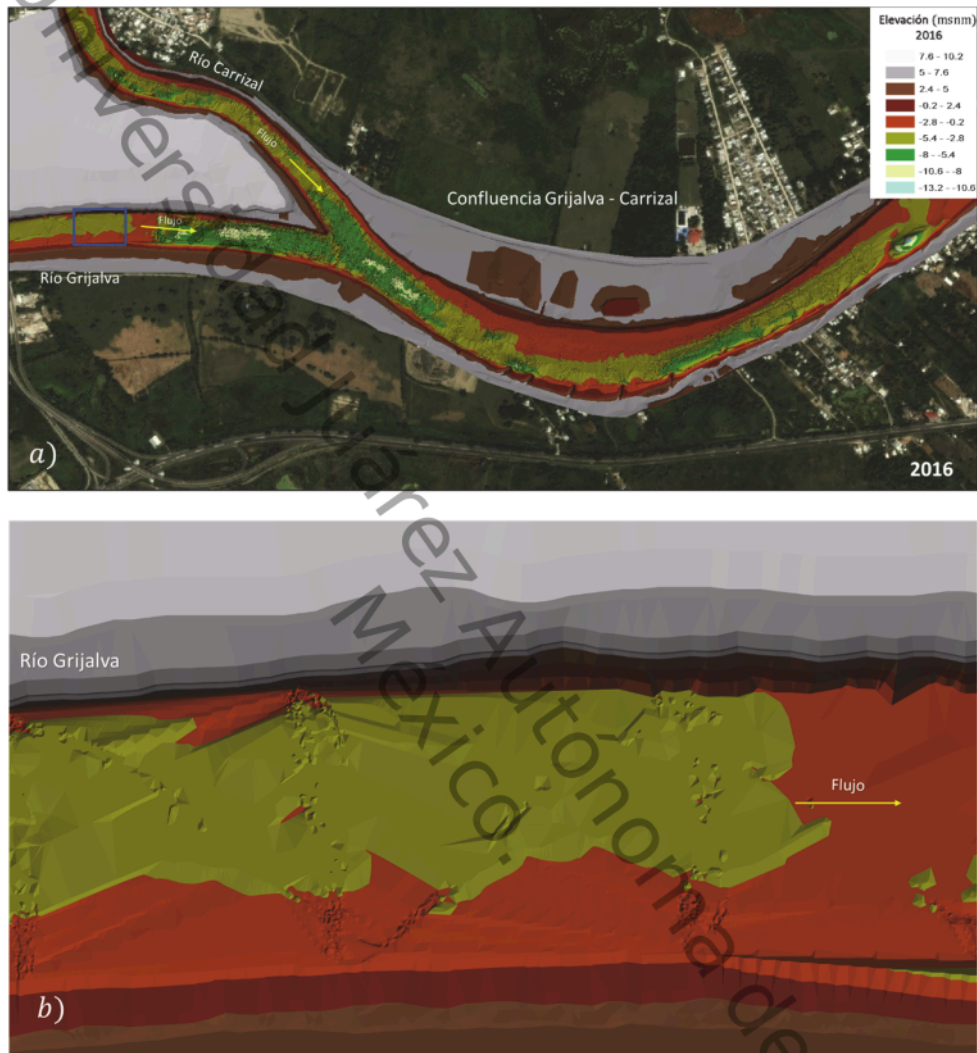


Figura 6.6. Modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva - Carrizal. a) Obtenida con el equipo ADCP RiverRay, correspondiente al año 2016; b) Se muestra un área del cauce del río Grijalva (cuadro azul).

6.3 Hidrodinámica de la confluencia Grijalva - Carrizal

6.3.1 Velocidad en planta

Con la finalidad de entender el funcionamiento hidrodinámico de la confluencia Grijalva - Carrizal, es importante construir una representación del campo de velocidades en la dirección principal del flujo. En este sentido, el ADCP permite generar de forma casi directa estos vectores de velocidad. En particular, se graficó el promedio de las velocidades en planta lo cual permite visualizar la trayectoria del flujo en cada uno de los brazos tributarios y de la confluencia hasta la zona de recuperación del flujo. La graficación de la magnitud de estas velocidades también es útil para calibrar y validar el modelo numérico empleado en esta investigación.

En este trabajo se realizó el análisis de estas velocidades para los cuatro años de medición. En la Figura 6.7a se presentan las velocidades en planta de las mediciones realizadas en el 2013. En la Figura 6.7b se muestran las líneas de tendencias generadas con el programa TecPlot (streamtracer) y se observa una recirculación en el margen izquierdo donde confluye el río Carrizal que es característico en esas zonas. En la zona donde se unen los dos flujos (confluencia) se observa la formación de la interfaz de mezclado (línea roja punteada) y que se va disolviendo varios metros aguas abajo de la confluencia. En la margen izquierda donde termina el río Grijalva e inicia la confluencia, se observa una desviación de las líneas de corriente, lo que indica que se encuentran bajas las velocidades (zona de estancamiento del flujo) lo cual es característico de la confluencia.

Para el caso de las mediciones del 2014, se realizaron 11 mediciones aguas arriba de los ríos tributarios que conforman la confluencia y solo 3 mediciones sobre la confluencia. En la Figura 6.8a se graficaron las velocidades en planta correspondiente a estas mediciones. En la Figura 6.8b se muestran las líneas de tendencia que cambian de dirección por los efectos de los meandros

del río carrizal. Las líneas de tendencia en el río Grijalva se mantienen en una sola dirección hasta el punto de unión con el río Carrizal. En el punto donde convergen los dos afluentes se observa una desviación de las líneas de tendencia (interfaz de mezclado) hacia el margen izquierdo de la confluencia; esto es debido a la diferencia del flujo que existía en ese momento entre el río Carrizal ($354.51 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y el río Grijalva ($98.92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Sin embargo, la interfaz de mezclado es desviada ligeramente aguas abajo de la confluencia debido a los efectos de la presión que es mayor en el río Grijalva, por sus bajas velocidades.

De las mediciones realizadas en el 2015 en la confluencia Grijalva – Carrizal, 5 secciones corresponden al río Grijalva, 7 secciones al río Carrizal y 8 secciones a la confluencia. En la Figura 6.9a se muestran las velocidades en planta correspondientes al año 2015. Para esta condición de gasto el río principal corresponde al Grijalva ($391.98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y el río el tributario al Carrizal ($198.93 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). En la Figura 6.9b se muestran las líneas de tendencias que convergen en el centro de la confluencia. Las zonas de estancamiento del flujo se encuentran bien definidas en las márgenes de la confluencia y las velocidades más altas en el centro de la confluencia. Algunos autores (Best, 1987, 1988; Boyer *et al.*, 2006; Riley y Rhoads, 2011) llaman a esta combinación del flujo, zonas de separación del flujo y este fenómeno se da por el ángulo de incidencia y las condiciones del flujo. La posición de las líneas de corrientes generadas en Tecplot que forman el interfaz de mezclado en la unión de la confluencia, coinciden con la posición medida en campo (líneas punteadas color negras).

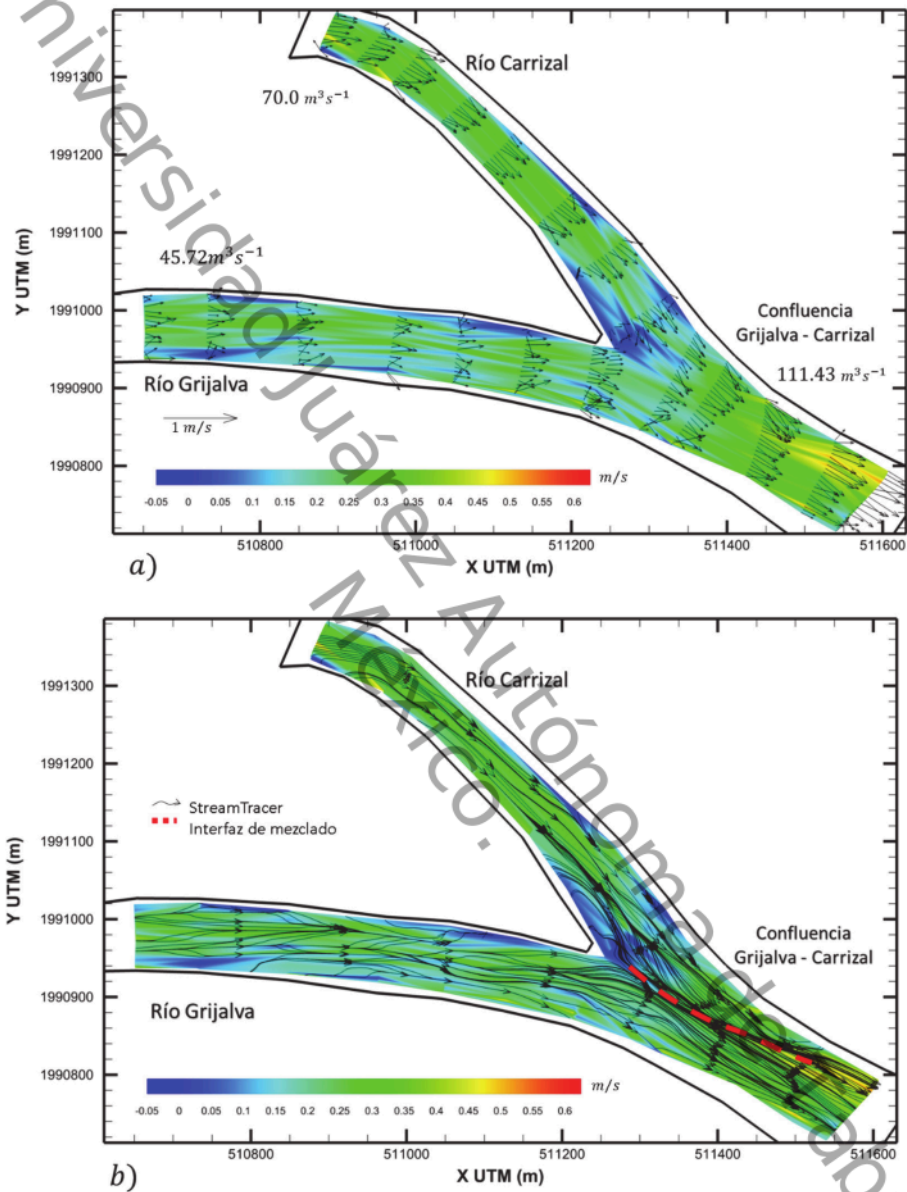


Figura 6.7. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Los vectores indican la velocidad en planta y la gama de colores representa la magnitud del vector de velocidad en planta de las mediciones realizadas en el 2013; b) Se muestran las líneas de tendencia generadas por software TecPlot.

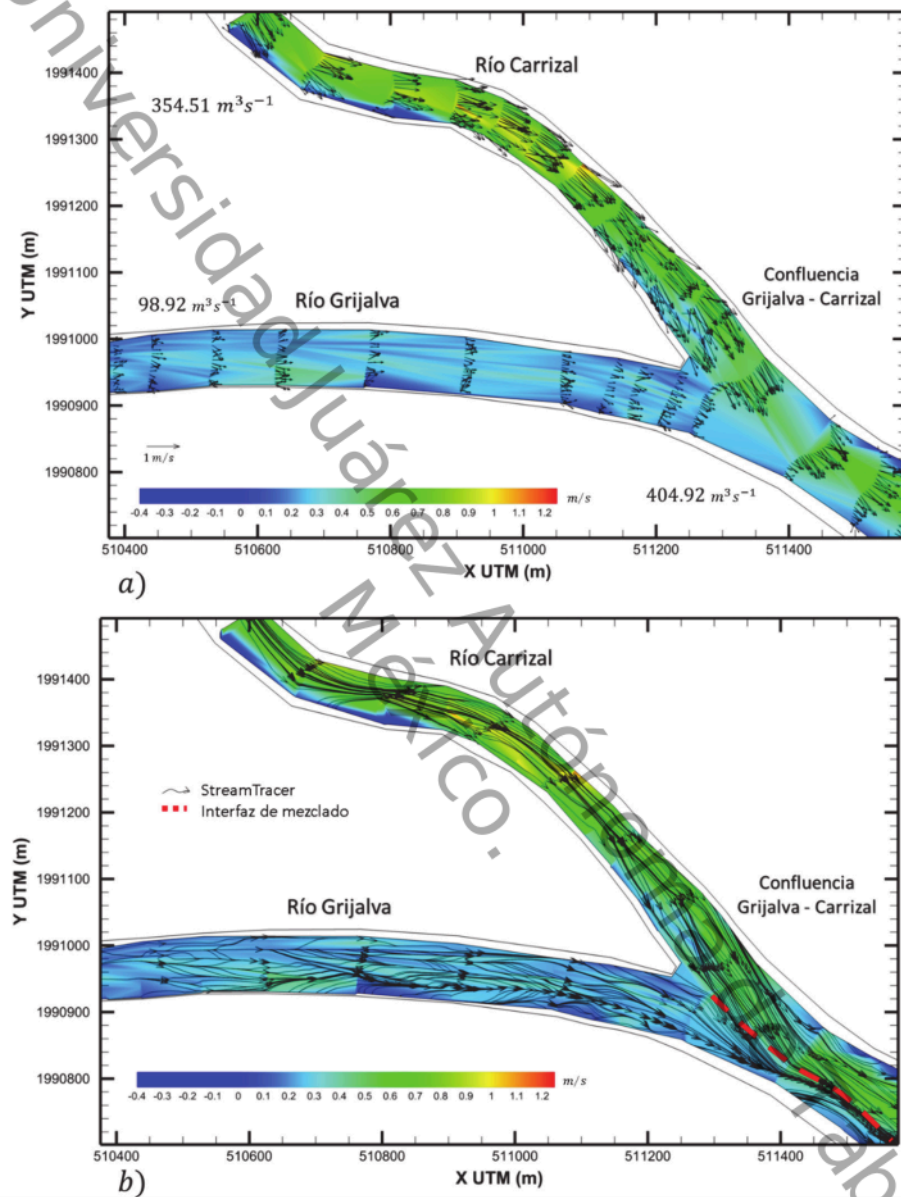


Figura 6.8. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Los vectores indican la velocidad en planta y la gama de colores representa la magnitud del vector de velocidad en planta de las mediciones realizadas en el 2014; b) Se muestran las líneas de tendencia generadas por software TecPlot (líneas negras)

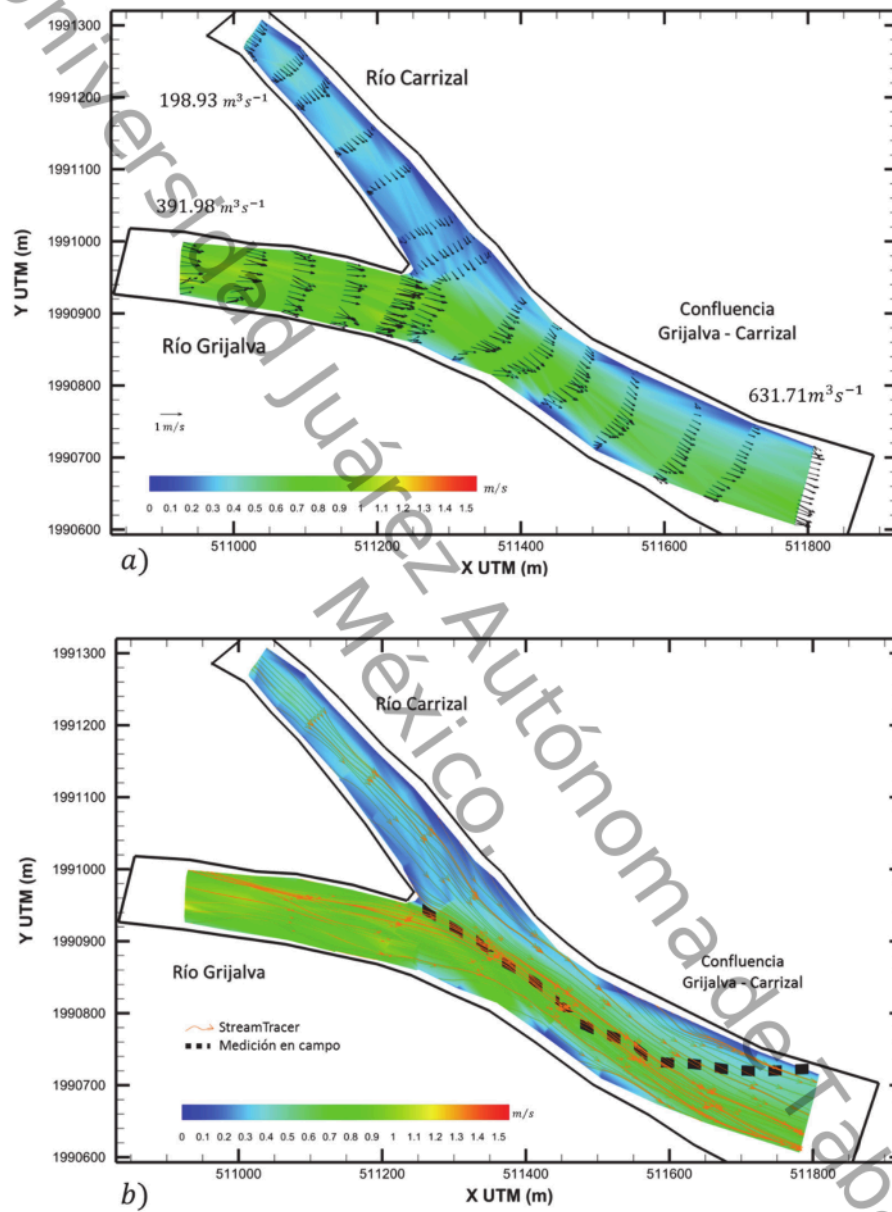


Figura 6.9. Hidrodinámica de la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Los vectores indican la velocidad en planta y la gama de colores representa la magnitud del vector de velocidad en planta de las mediciones realizadas en el 2015; b) Se muestran las líneas de tendencia generadas por software TecPlot (línea café) y la línea negra punteada señala la posición de la interfaz de mezclado medida.

De la experiencia obtenida en las mediciones realizadas con el equipo RiverCat, del año 2013 al año 2015, se decidió realizar una nueva medición del campo de velocidad de la confluencia Grijalva – Carrizal utilizando el equipo acústico RiverRay, ya que este equipo genera un campo de velocidad más detallada (Priego – Hernández *et al.*, 2017). La información obtenida abarcó desde un kilómetro aguas arriba de cada río tributario hasta la confluencia y un kilómetro aguas abajo desde el punto donde se interceptan los ríos. En la Figura 6.10 Se muestra la velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para el año 2016 en la confluencia Grijalva – Carrizal y muestra una distribución de los vectores de velocidad en planta mejor definido. Para esta condición de gasto, en las siguientes secciones se realiza un análisis detallado de las velocidades en planta y de las velocidades secundarias.

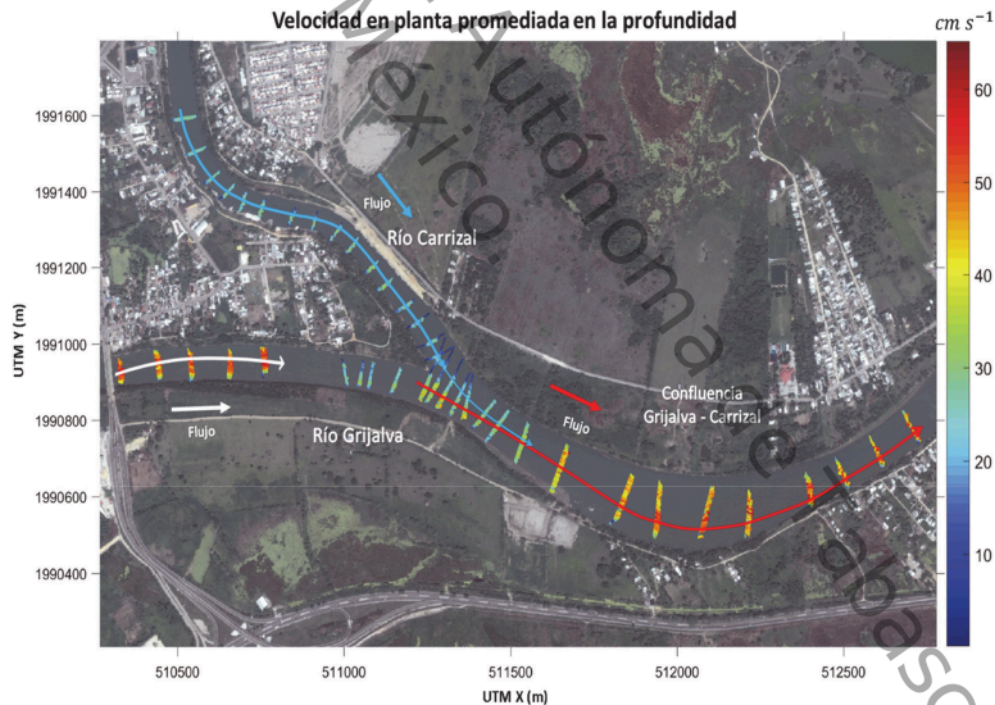


Figura 6.10. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para el año 2016 en la confluencia Grijalva - Carrizal. Las líneas de color azul, blanco y rojo representan la tendencia del flujo para el río Carrizal, Grijalva y la confluencia Grijalva – Carrizal respectivamente.

Velocidad en planta: Río Carrizal

En la Figura 6.11 se muestran las secciones aforadas para el río Carrizal. En la Figura 6.12 se grafican en planta las magnitudes de las velocidades promediadas en la profundidad para el río Carrizal. En las primeras tres secciones (16, 15 y 14) de aguas arriba a aguas abajo, las velocidades en planta presentan una tendencia uniforme; de las secciones 13 hasta la 9, las magnitudes del vector velocidad en planta muestran variaciones en sus direcciones lo que indica que el flujo está cambiando de dirección debido a la fuerza centrífuga y al gradiente de presión hidrostática que actúan en los márgenes del río. De las secciones 8 a la 5, las velocidades en planta retoman una tendencia uniforme en la dirección del flujo. De las secciones 4 a la 1, las magnitudes mayores de las velocidades en planta se mantienen en el centro del río y las de menor velocidad se encuentran en las márgenes; esto va formando zonas de estancamientos del flujo donde termina el río carrizal e inicia la confluencia como se mostró en el apartado 2.21.



Figura 6.11. Secciones transversales correspondiente al río Carrizal donde se aforó con el ADCP RiverRay.

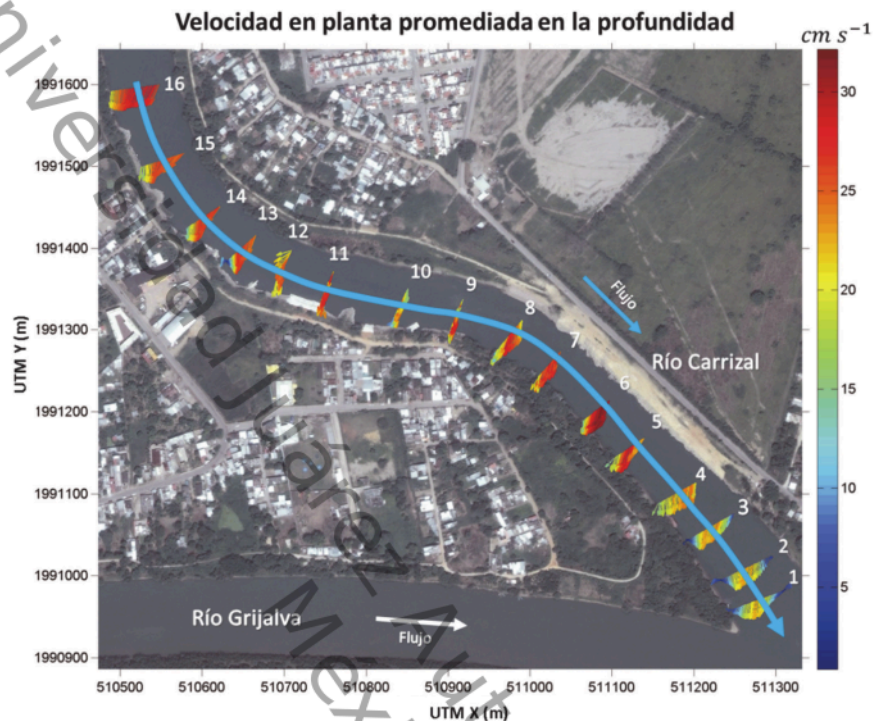


Figura 6.12. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para condiciones de caudal bajo en el río Carrizal. La línea azul representa la tendencia del flujo.

Velocidad en planta: río Grijalva

En la Figura 6.13 se muestran las secciones aforadas para el río Carrizal. En la Figura 6.14 se grafican en planta las magnitudes de las velocidades promediadas en la profundidad para el río Carrizal. De las secciones 9 a la 5, la tendencia de la dirección del flujo se mantiene constante y las magnitudes más representativas de las velocidades promediadas en la profundidad, se inclinan más hacia el margen izquierdo del río Grijalva; esta tendencia es característica en las curvas de los ríos y está fuertemente asociada a corrientes secundarias desarrolladas (Falcón, 1984). Entre las secciones 5 y 4, no se muestran secciones medidas del flujo debido a que se encontraban dragando esa zona del río. Los efectos del dragado en el flujo se muestran aguas abajo, en las secciones

4 a la 1. El comportamiento de la tendencia del flujo no se puede graficar, ya que la continuidad de las intensidades de las velocidades promediadas en la vertical no concuerda claramente entre las secciones 9 a la 5 aguas arriba, con las secciones 4 a la 1 aguas abajo.

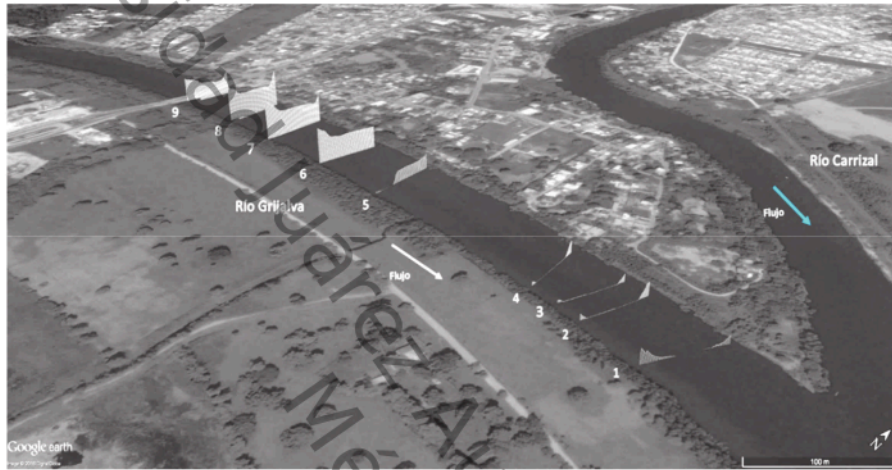


Figura 6.13. Secciones transversales correspondientes al río Grijalva donde se aforó con el ADCP RiverRay.

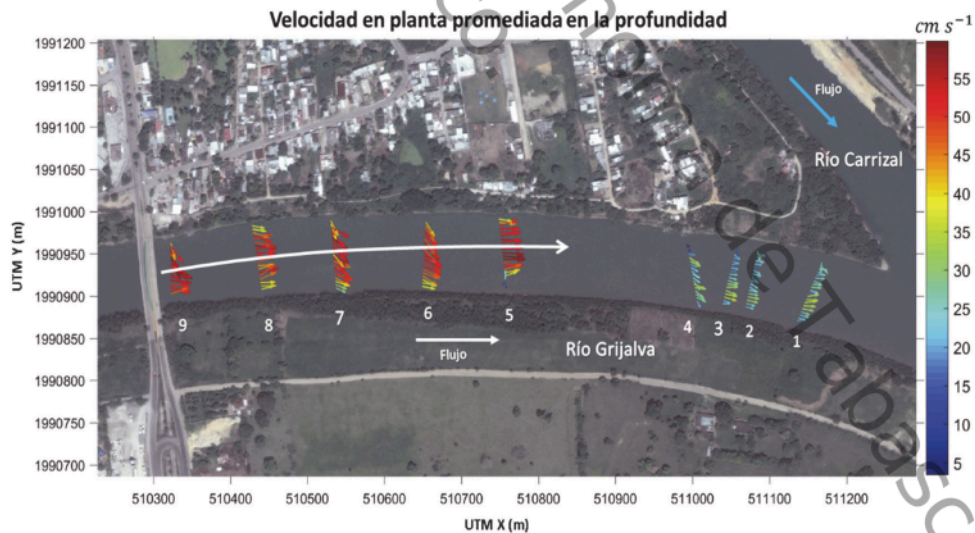


Figura 6.14. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para condiciones de caudal bajo en el río Grijalva. La línea blanca representa la tendencia del flujo.

Velocidad en planta: Confluencia Grijalva - Carrizal

En la Figura 6.15 se muestran las secciones aforadas para la confluencia Grijalva - Carrizal. En la Figura 6.16 se grafican en planta las magnitudes de las velocidades promediadas en la profundidad para la confluencia Grijalva - Carrizal. De las secciones 1 a la 8 correspondientes a la confluencia Grijalva - Carrizal, se observa que las magnitudes más representativas de las velocidades se encuentran en la margen derecha de la confluencia, y estas son aportadas por el río Grijalva. En estas secciones se observa la formación de la shear layer o interfaz de mezclado, por la unión de los dos flujos y que se pierde hasta la sección 7. La tendencia del flujo se va orientado hacia en el centro del canal. Las magnitudes más bajas se encuentran en la margen izquierda de la confluencia y son aportadas por el río Carrizal; estas magnitudes se extienden hasta la sección 8. Por otro lado, se observan pequeñas áreas de bajas magnitudes en la velocidad en planta en el margen derecho (de la sección 1 a la 9), de igual forma en las secciones 1 a la 4 en la zona central de la confluencia se encuentran velocidades de bajas magnitudes conocidas como zonas de estancamiento del flujo y son característicos de las confluencias.

Entre las secciones 9 y 10 se observa que las magnitudes de las velocidades en planta mantienen uniformidad en su magnitud y dirección, lo que indica que se encuentran en la zona de recuperación del flujo (apartado 2.2.3). De las secciones 11 a la 14, las magnitudes y direcciones de los vectores de velocidad se orientan más hacia el margen derecho por efecto de la curvatura del canal. De las secciones 15 a la 17 la orientación de los vectores corresponde a una zona donde existe un punto de inflexión; es decir, las direcciones del flujo están cambiando debido a la fuerza centrífuga y al gradiente de presión hidrostática que actúan en los márgenes del río.

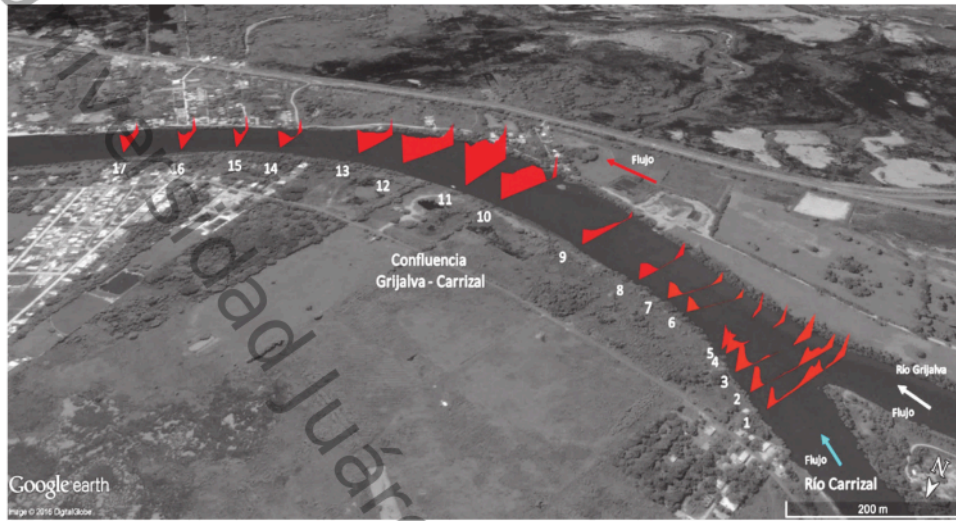


Figura 6.15. Secciones transversales correspondientes al río Grijalva donde se aforó con el ADCP RiverRay.

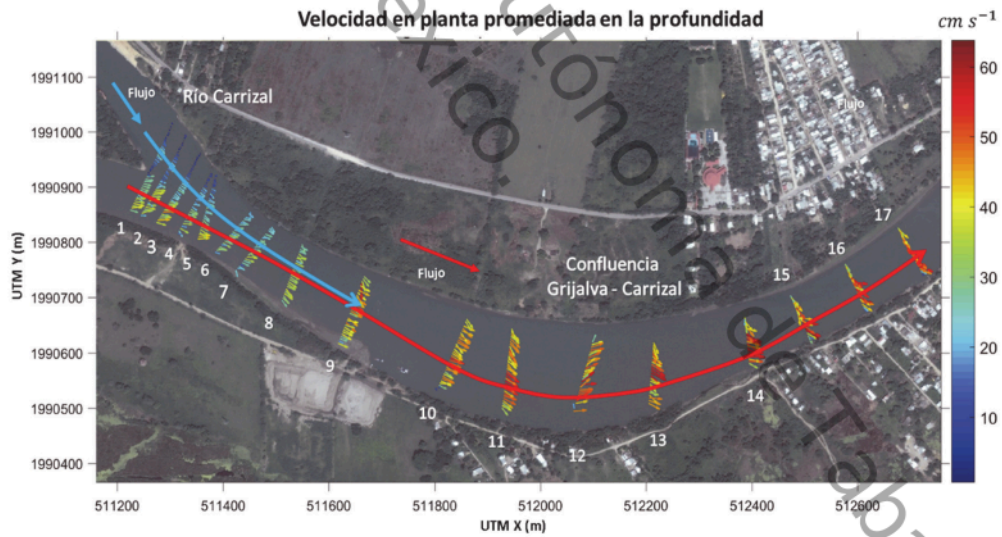


Figura 6.16. Velocidad en planta de aguas arriba a aguas abajo para condiciones de caudal bajo en la confluencia Grijalva - Carrizal. Las líneas roja y azul representan la tendencia del flujo para la confluencia y para el río Carrizal, respectivamente.

6.3.2 Velocidad Secundaria

Los datos obtenidos por el ADCP RiverRay se graficaron con el software Velocity Mapping Toolbox (Parsons, 2013). Para lograr visualizar las recirculaciones en las secciones transversales, se observaron las trayectorias preferentes del flujo dadas por las velocidades en planta. Posteriormente, se buscó la tendencia de giros en las componentes transversales del vector velocidad. Estas tendencias son más evidentes en la curvatura de los meandros que en zonas rectas del río como se discutió en el Capítulo 3. Sin embargo, cuando no es posible observar estas tendencias, se recurre al desarrollo propuesto por Rozovskii (1957) que, al aplicarlo a las componentes transversales del vector velocidad se suavizan mostrando las tendencias de las recirculaciones en la sección transversal. Si el desarrollo de Rozovskii (1957) no muestra las tendencias de las recirculaciones puede ser que el flujo esté siendo afectado por maquinarias como excavadoras o por perturbaciones generadas por el mismo flujo del agua. En las figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos.

Velocidad Secundaria: río Carrizal

De las Figuras 6.17 a la 6.21, las velocidades secundarias en el río Carrizal se muestra sobre las secciones y son representadas por los vectores; la gama de colores representa la magnitud del vector velocidad y la línea de color azul representa el flujo secundario. En la Figura 6.17a, b y c, el sentido del flujo secundario va en dirección de la margen izquierda a la margen derecha. Las magnitudes del vector velocidad más representativas de las secciones transversales (zona de color roja y amarilla de las secciones transversales) concuerdan con las zonas graficadas de las velocidades en planta para estas secciones (Figura 6.12, secciones 16,15 y 14) mostrando la trayectoria principal que va siguiendo el flujo en el río.

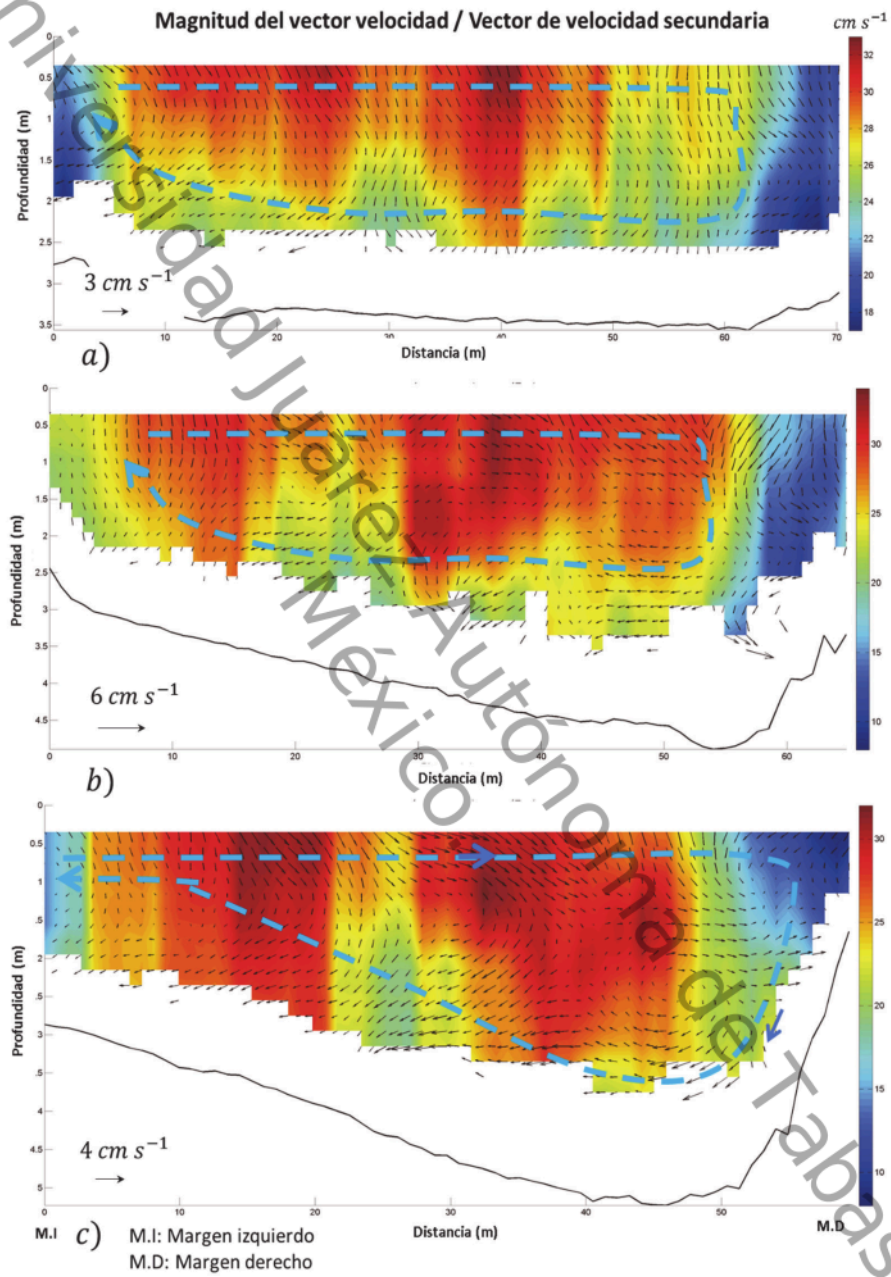


Figura 6.17. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 16; b) Sección 15; c) Sección 14.

En la Figura 6.18a, de la margen derecha, se observa una nueva tendencia del flujo secundario que va en sentido opuesto del que ya se había observado en la figura anterior. Esta sección se encuentra exactamente en la curva y es donde inicia el cambio de dirección del flujo secundario. El flujo secundario del margen derecho de la Figura 18b y 18c comienza aumentar y el flujo secundario del margen izquierdo disminuye. En la Figura 6.19a y 6.19b, presenta el flujo secundario que inició en el margen derecho sobre toda la sección transversal; este cambio de dirección concuerda con las velocidades en planta ya graficadas en la Figura 6.12. En la Figura 6.20a se aprecia que el flujo secundario mantiene la dirección que inició en la Figura 6.19a. En la Figura 6.20b y c aparece nuevamente el flujo secundario en el margen izquierdo y va aumentando de una sección a otra. Finalmente, Figura 6.20d, el flujo secundario que inició en el margen izquierdo de la Figura 6.20b se encuentra en toda la sección transversal.

En la Figura 6.21, los círculos con flechas de color negro representan las celdas helicoidales. En la Figura 6.21a, presenta nuevamente un cambio brusco en las direcciones del flujo secundario; esto puede deberse a que la sección se encuentra en una zona recta en el cauce disminuyendo los efectos de la fuerza centrífuga sobre el flujo del río. En Figura 21b y c se observa que en las márgenes inician flujos secundarios en zonas donde la velocidad es baja (zona de color azul) y en la parte central de la sección se encuentra el flujo secundario más representativo de la sección transversal, manteniendo la dirección que se presentó en la Figura 6.20d. Por último, en la Figura 6.21d se distingue el flujo secundario solamente en la zona central de la sección transversal; este flujo es el que se mantiene hasta el punto de unión de la confluencia. Las zonas de baja velocidad (color azul) que se presentan en la Figura 6.21b, c y d son características de las confluencias y se les conoce como zonas de estancamiento del flujo.

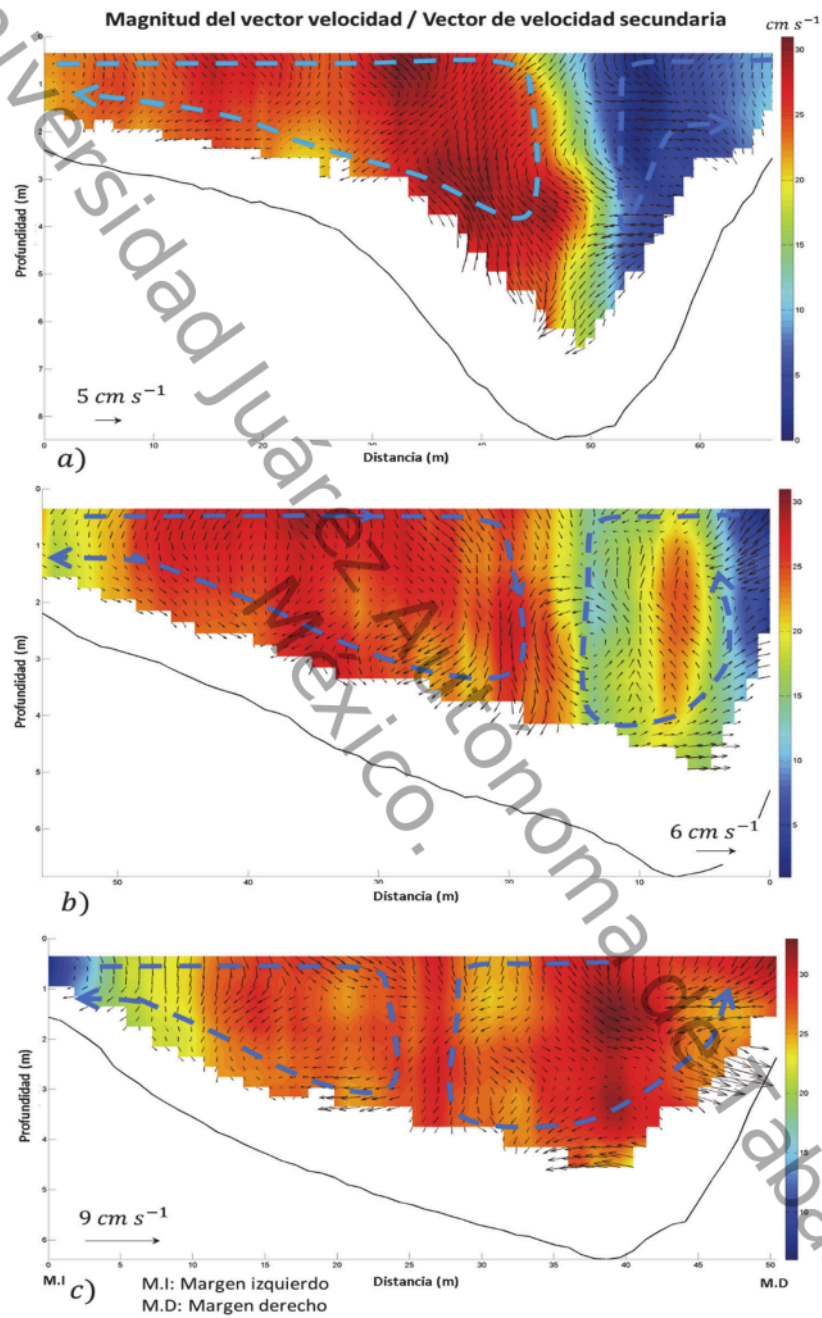


Figura 6.18. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 13; b) Sección 12; c) Sección 11.

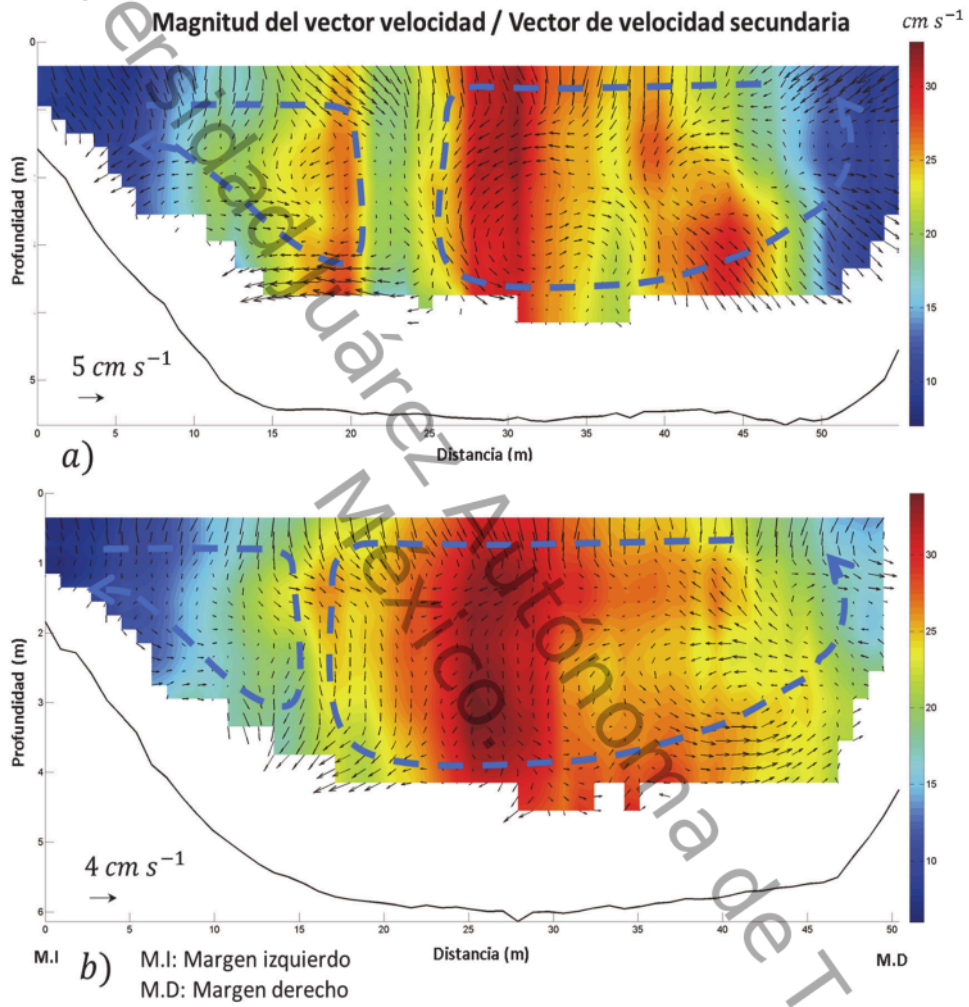


Figura 6.19. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 10; b) Sección 9.

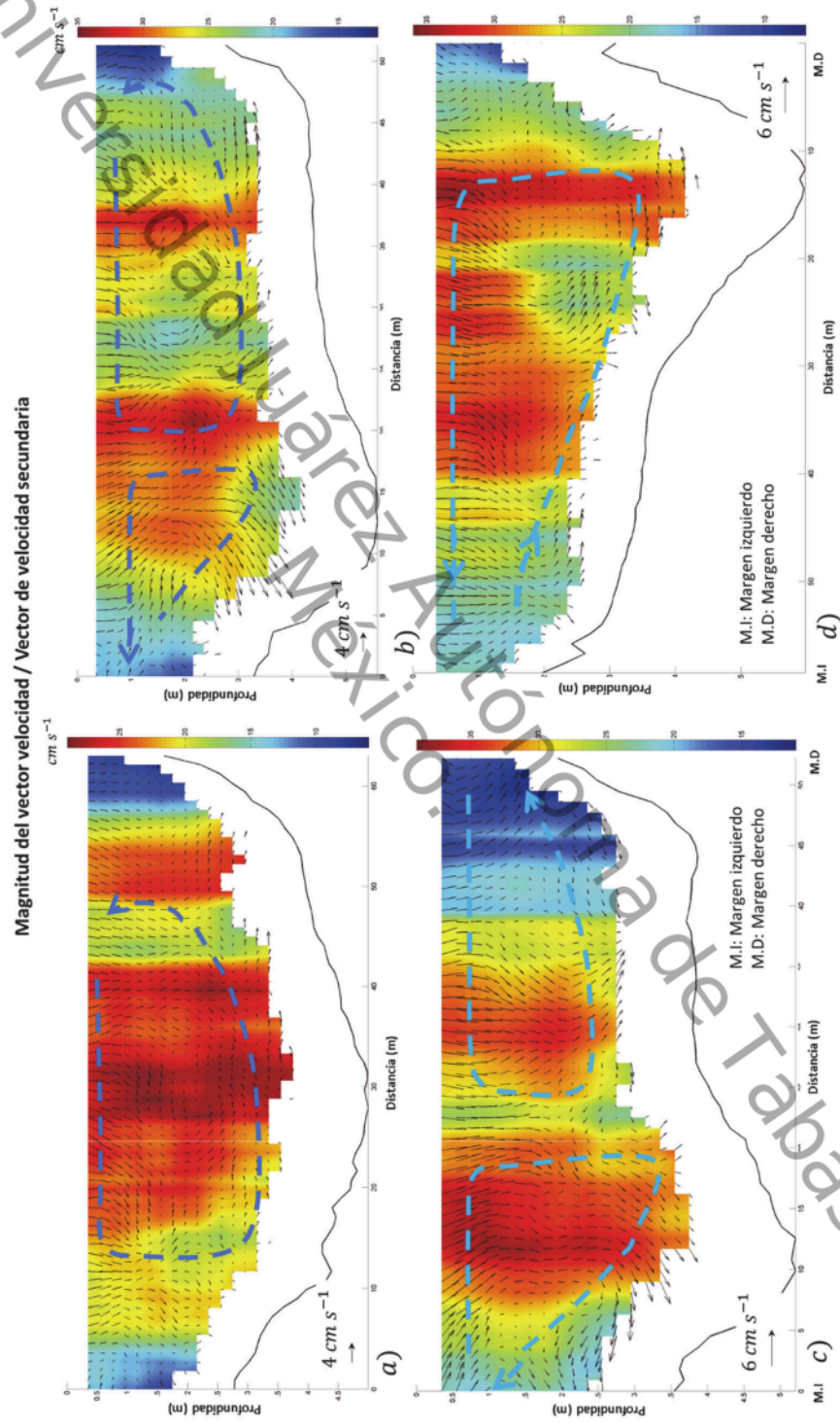


Figura 6.20. Velocidades secundarias en el río Carrizal. a) Sección 8; b) Sección 7; c) Sección 6; d) Sección 5.

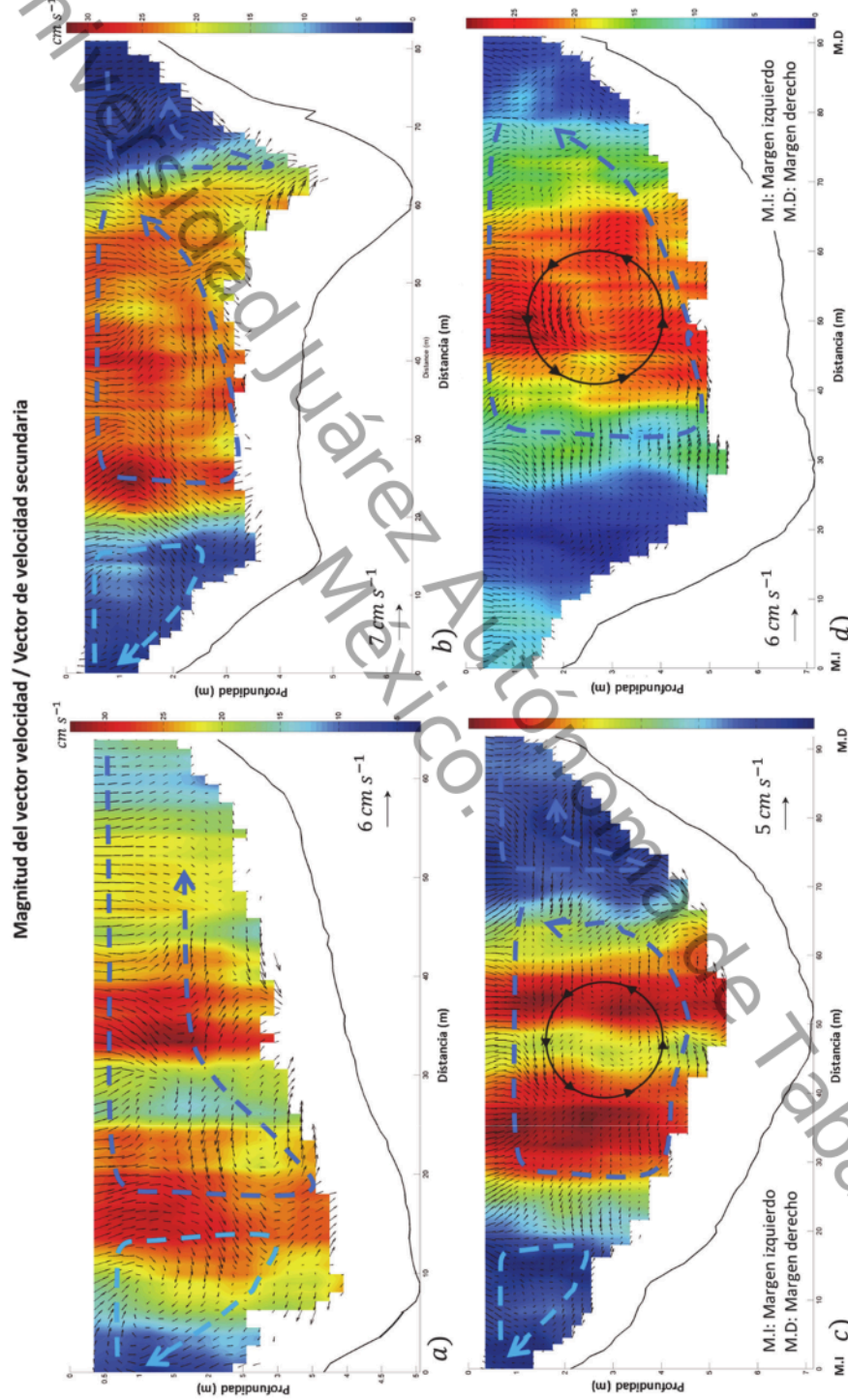


Figura 6.21. Velocidades secundarias en el río Carizal. a) Sección 4; b) Sección 3; c) Sección 2; d) Sección 1.

Velocidad secundaria: río Grijalva

En las Figuras 6.22 a la 6.24, las velocidades secundarias en el río Grijalva son representadas por los vectores; la gama de colores representa la magnitud del vector velocidad y la línea de color azul representa el flujo secundario. En la Figura 6.22a, b y c, se presenta el flujo secundario representado por la línea azul. El sentido de la corriente secundaria va en dirección de margen izquierda a margen derecha en la Figura 6.22a. En la Figura 6.22b se muestra un cambio en la dirección de la corriente secundaria en el margen derecho; esta sección se encuentra en una zona recta del río. El flujo secundario de la Figura 6.22c se mantiene en la dirección que inició en la sección anterior del margen derecho y se distribuye en toda sección transversal.

En la Figura 6.23a, el flujo secundario está representado por la línea azul. En esta sección se observa que el sentido de la corriente secundaria es la misma de su antecesor, con la particularidad de que es uniforme sobre toda la sección transversal. En la Figura 6.23b y c, no se pudo determinar la tendencia de la corriente secundaria, por los efectos del dragado que se realizaba en esos momentos; es decir, la morfología del canal juega un papel importante en el comportamiento de las corrientes secundarias.

En la Figura 6.24a y b, se muestra el flujo secundario representado por la línea azul y en la Figura 6.24b, el círculo con flechas de color negro representa la celda helicoidal. La sección transversal de la Figura 6.24b, se encuentra a una distancia de 30 m de la sección transversal de la Figura 6.23c. A pesar de que la distancia es relativamente corta entre secciones, la sección de la Figura 6.24b muestra una recuperación en el comportamiento de la corriente secundaria, observando dos direcciones diferentes que fluyen de cada margen. Por último, la distancia entre la zona de dragado y la sección de la Figura 6.24b es de 400 m aproximadamente. Los efectos de la draga en las corrientes secundarias son nulos ya que la sección muestra un comportamiento más definido en estas

corrientes y el flujo secundario central que se forma en la Figura 6.23b es el que se mantiene hasta el punto de unión de la confluencia.

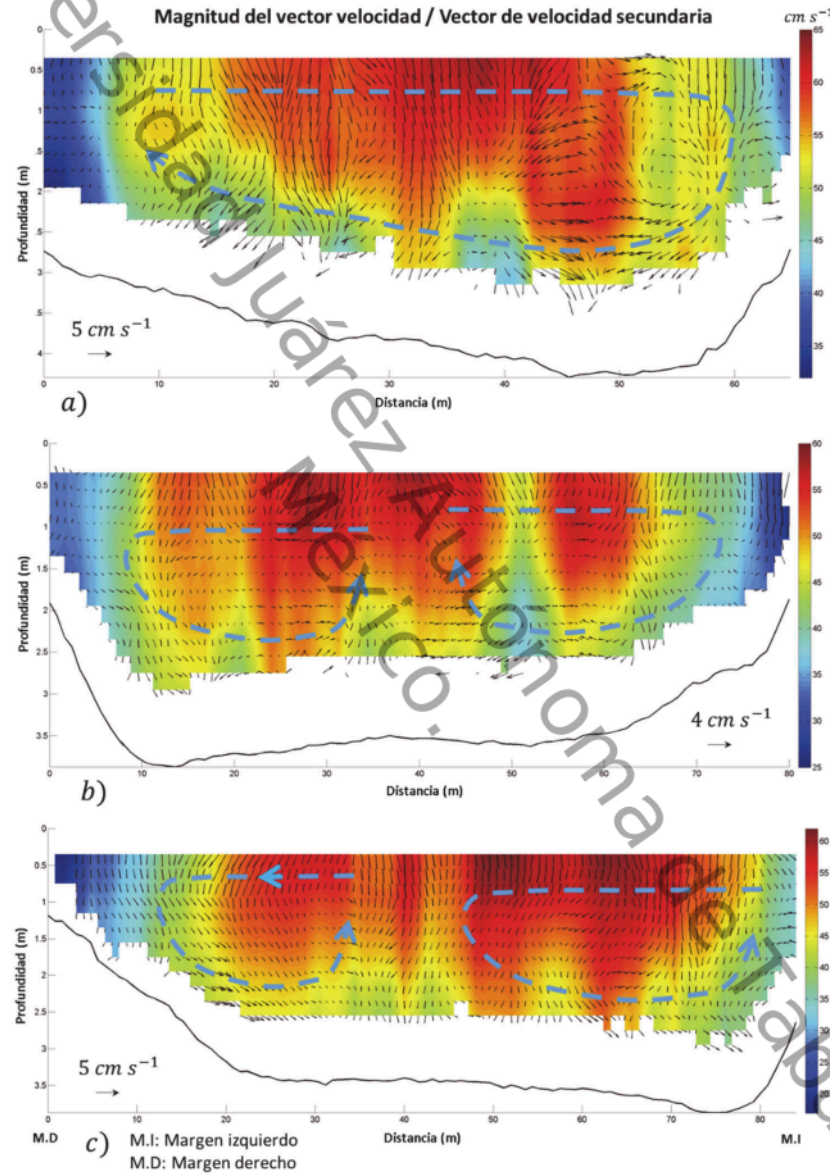


Figura 6.22. Velocidades secundarias en el río Grijalva. a) Sección 9; b) Sección 8; c) Sección 7.

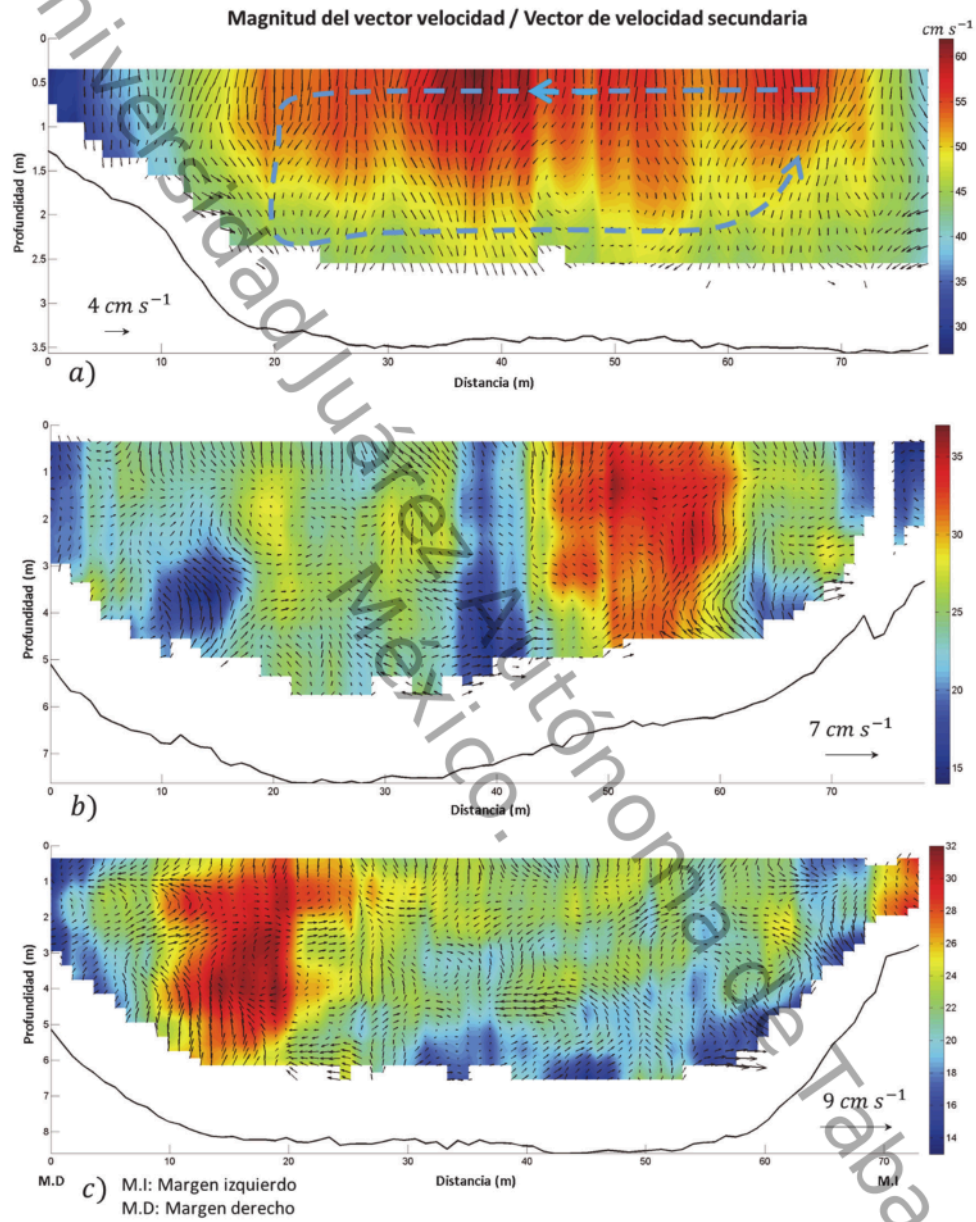


Figura 6.23. Velocidades secundarias en el río Grijalva. a) Sección 6; b) Sección 5; c) Sección 3.

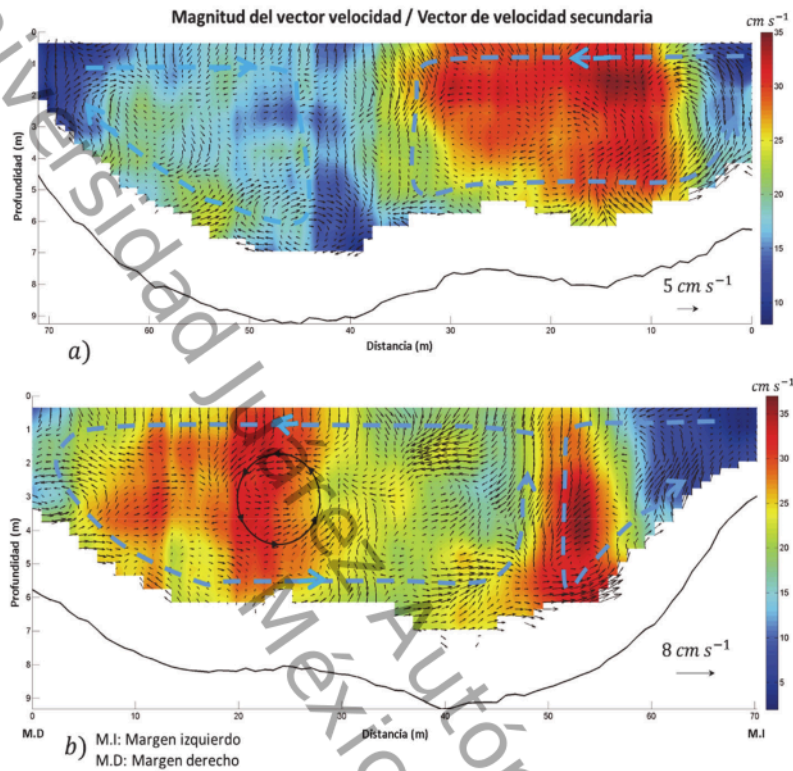


Figura 6.24. Velocidades secundarias en el río Grijalva, a) Sección 2; b) Sección 1.

Velocidad secundaria: confluencia Grijalva – Carrizal

En las Figuras 6.25 a la 6.27, las velocidades secundarias para la confluencia Grijalva - Carrizal son representadas por los vectores; la gama de colores representa la magnitud del vector velocidad y las líneas de color azul y blanco representan el flujo secundario. Los círculos con flechas de color negro representan las celdas helicoidales. Las secciones graficadas corresponden únicamente de la sección 1 a la 8 de la Figura 6.3, ya que son las que muestran el desarrollo de las corrientes secundarias hasta el punto de recuperación del flujo para el año 2016. Las secciones 9 a la 17 de la Figura 6.3 muestran una tendencia similar a las corrientes secundarias ya descritas para una curva, por lo

que no se presenta en esta tesis. La Figura 6.25a, muestra las tendencias de las corrientes secundarias en el punto de unión de la confluencia; la corriente secundaria del margen izquierdo corresponde al río Carrizal (línea de color blanco), mientras que la del margen derecho corresponde al del río Grijalva (línea de color azul). Es importante mencionar que las tendencias de las corrientes secundarias de la Figura 6.25a corresponden a las heredadas por los ríos Carrizal (Figura 6.25b) y Grijalva (Figura 6.25c).

En la Figura 6.26a, b y c, se muestra el flujo secundario representado por la línea blanca y roja sobre la confluencia. La corriente secundaria del margen derecho (aportada por el río Grijalva) de la Figura 6.26a tiende a dirigirse hacia el margen izquierdo y las magnitudes más representativas de la velocidad del flujo tienden a irse hacia el centro del canal. En la Figura 6.26b la corriente secundaria se encuentra en la mayor parte de la sección del canal; sólo en una pequeña área de margen izquierdo se observa la corriente secundaria aportada por el río Carrizal. En la Figura 6.26c se muestra la corriente secundaria sobre toda la sección de la confluencia; esta zona es donde se encuentra el flujo recuperado.

En la Figura 6.27, se muestra el flujo secundario representado por la línea blanca y roja sobre las secciones 7 y 8 de la confluencia. La corriente secundaria en la sección 7 se sigue manteniendo sobre toda la sección y las magnitudes más representativas del vector velocidad se distribuyen sobre toda la sección transversal, en esta sección las velocidades secundarias se mantienen uniformes; esto corresponde a la zona de recuperación del flujo. Por último en la sección 8, las magnitudes de velocidad tienden a concentrarse en la margen derecha del canal y esto es característico cuando se mide cerca del inicio de una curva. La corriente secundaria de igual forma tiende a irse hacia el margen derecho del canal.

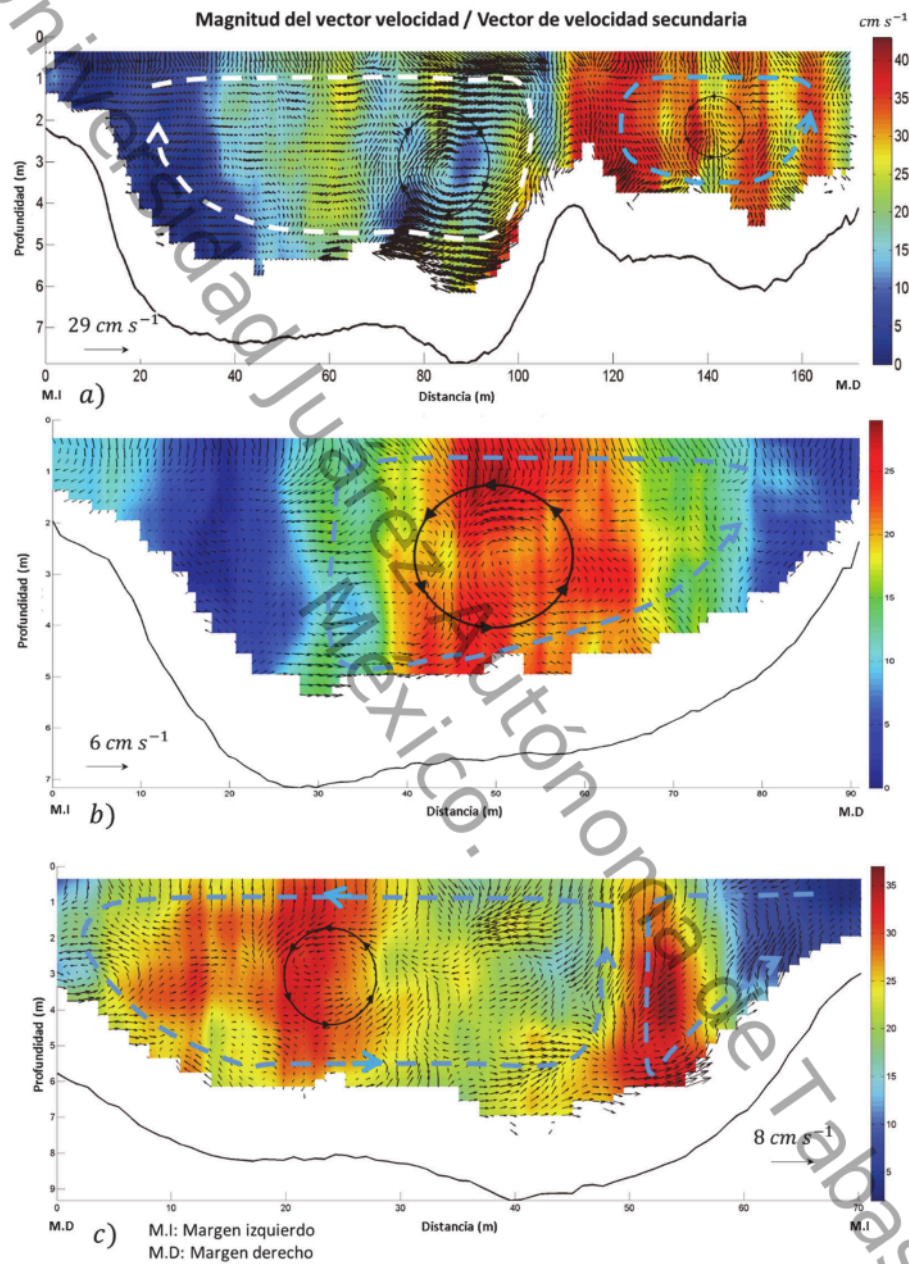


Figura 6.25. Velocidades secundarias para: a) confluencia Grijalva – Carrizal Sección 2; b) río Carrizal sección 1; c) río Grijalva Sección 1.

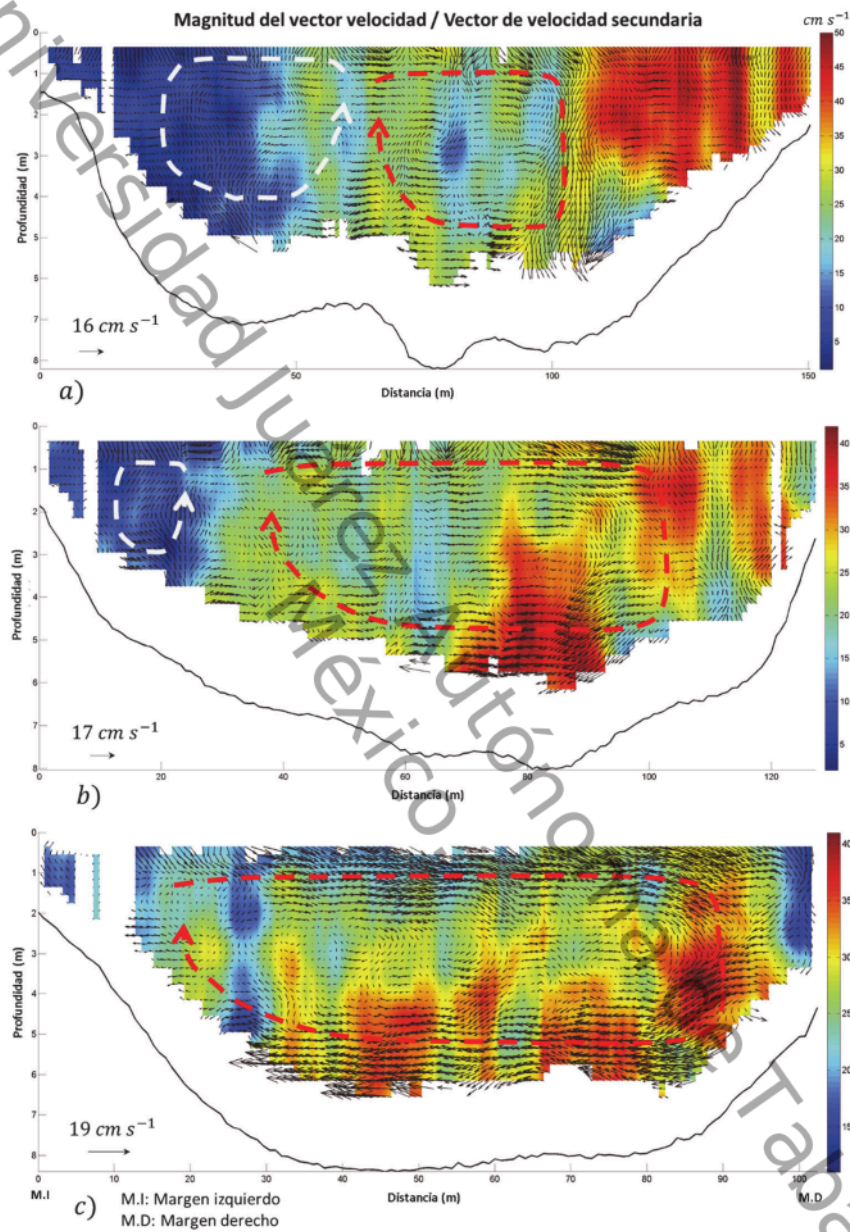


Figura 6.26. Velocidades secundarias para la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Sección 3; b) Sección 4; c) Sección 6.

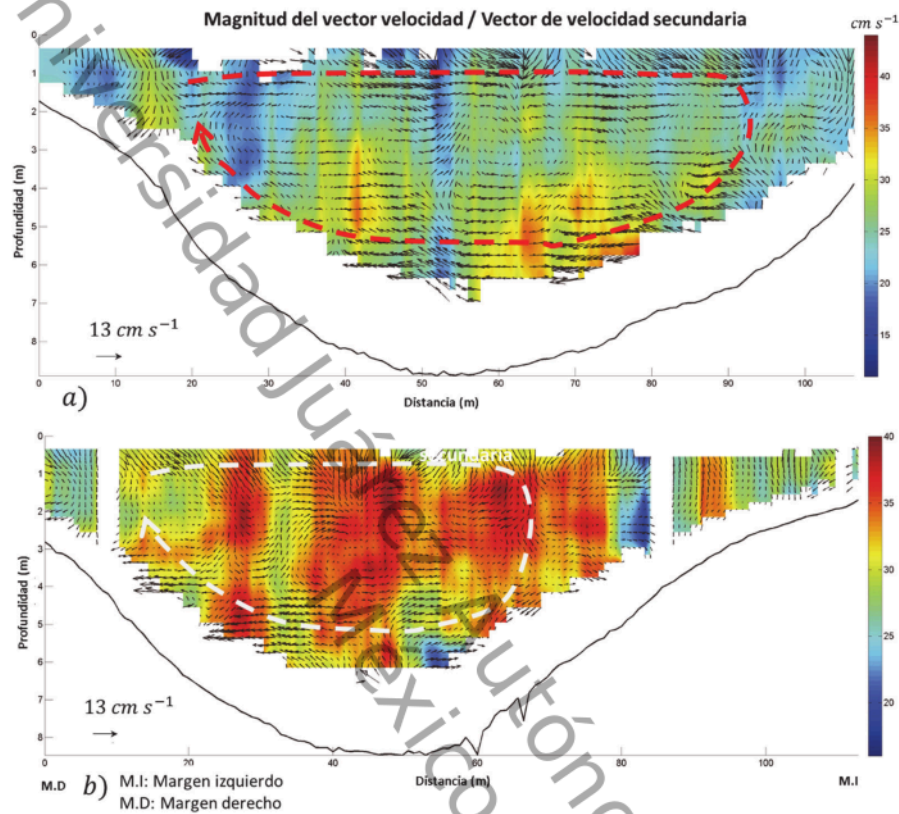


Figura 6.27. Velocidades secundarias para la confluencia Grijalva – Carrizal. a) Sección 7; b) Sección 8.

6.4 Determinación de los momentos de flujos

Con los datos obtenidos por los ADCPs: RiverCat y RiverPro, y utilizando la ecuación $M_r = \rho_t Q_t U_t / \rho_p Q_p U_p$ de la sección 2.1, se determinaron los momentos de flujos para las condiciones medidas en los años 2013 - 2016, como se muestra en la Tabla 6.1. Por otro lado, de la geometría de la confluencia se determinó el ángulo de unión y la sinuosidad de los ríos confluentes (Figura 6.28). El río Carrizal muestra una sinuosidad de 1.27 en comparación con la del río Grijalva que es de 1.07. Entonces, de acuerdo a la clasificación de Brierley y

Fryirs (2005), se dice que el río Carrizal es moderadamente sinuoso (1.06-1.30), mientras que el río Grijalva se considera recto (1-1.05).

Tabla 6.1. Relación de momentos de flujos para la confluencia Grijalva – Carrizal.

Año	Río	$Q, m^3 s^{-1}$	$V, m s^{-1}$	M_r
2016	Carrizal (t)	69.5	0.16	0.332
	Grijalva (p)	124	0.27	
2015	Carrizal (t)	198.93	0.39	0.247
	Grijalva (p)	391.98	0.80	
2014	Carrizal (p)	354.81	0.80	0.087
	Grijalva (t)	98.82	0.25	
2013	Carrizal (p)	70.09	0.20	0.718
	Grijalva (t)	45.72	0.22	

Q , caudal; V , velocidad media; M_r , momento de flujo; t , tributario; p , principal.

Las mediciones que se realizaron fueron en condiciones de gastos bien definidas para cada año como se puede apreciar para los periodos 2004 – 2014 de la Figura 6.29; es decir, para condiciones de estiaje o caudales bajo se midió en el mes de abril; para las condiciones de gastos medio en el mes de enero y condiciones de gastos alto o condición de avenidas, para el mes de septiembre. A demás, para cada condición de medición los ríos que conforma la confluencia cambian su rol de pasar a tributario a principal o viceversa como se observa en la Tabla 6.2.

Las mediciones se tomaron de esta manera por el interés de estudiar la evolución de la morfodinámica de la confluencia. En la Tabla 6.1 se observa que la relación de momento de flujos (M_r) entre los afluentes principal y tributario que oscila entre $0 \leq M_r \leq 1$. Por ser un parámetro importante debido a su influencia en la morfología de los lechos en confluencias, los momentos de flujos se relacionaron con las batimetrías obtenidas en las Figuras 6.24 y 6.25. En la Figura

6.30 se muestran las batimetrías obtenidas del año 2013 – 2016 con relación de los momentos de flujos.

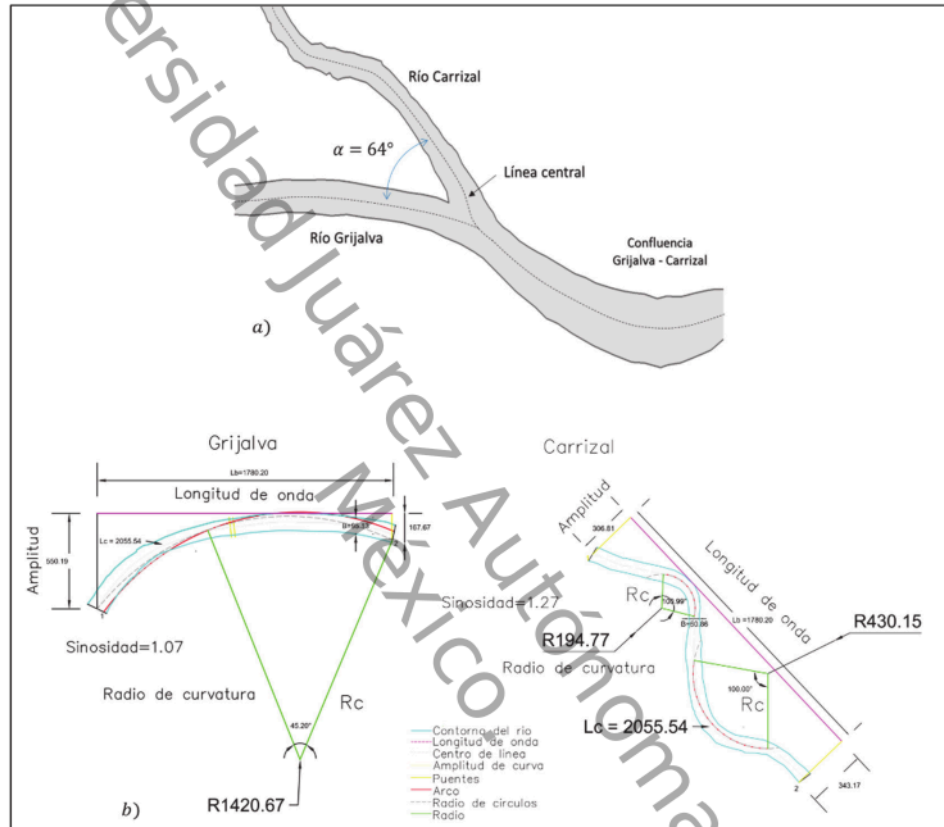


Figura 6.28. Confluencia Grijalva – Carrizal: a) ángulo de unión de la confluencia; b) sinuosidad de los ríos Grijalva y Carrizal.

Tabla 6.2. Rol que toman los ríos en la confluencia Grijalva – Carrizal en diferentes condiciones de gasto.

Río	2013	2014	2015	2016
Carrizal	Principal	Principal	Tributario	Tributario
Grijalva	Tributario	Tributario	Principal	Principal

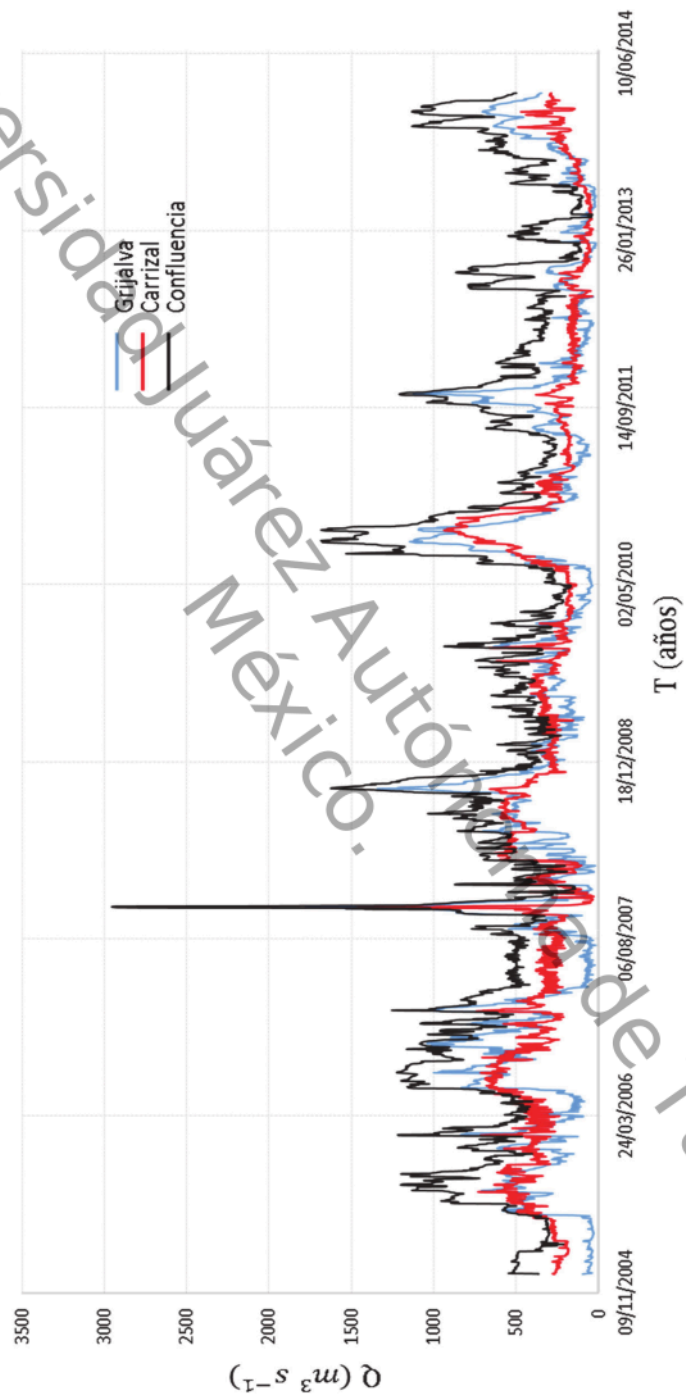


Figura 6.29. Gastos diarios del 2004 al 2014 de los ríos Grijalva, Carrizal y la confluencia.

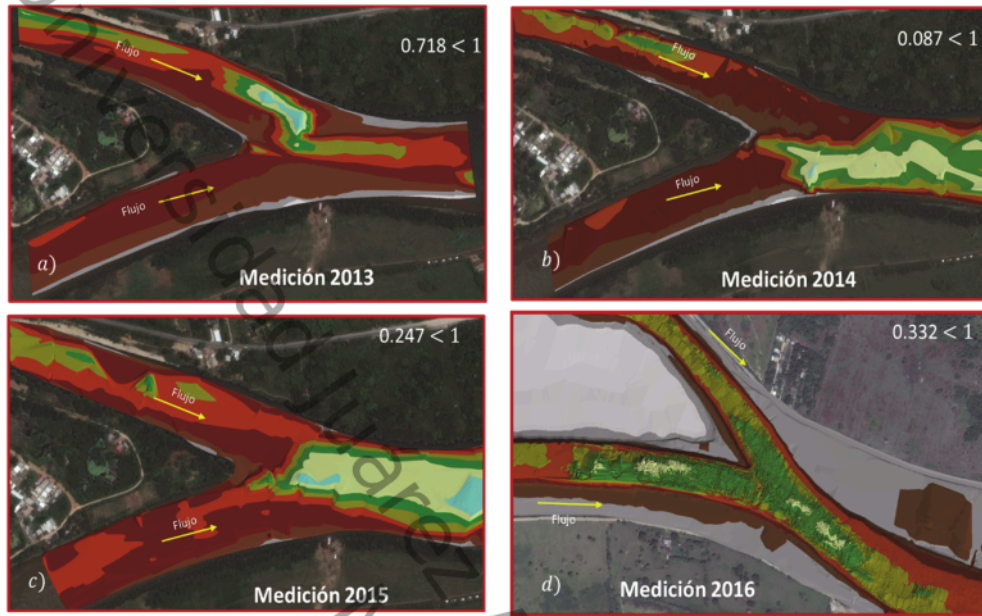


Figura 6.30. Batimetría de la confluencia Grijalva – Carrizal en diferentes escenarios de caudales en relación con los momentos de flujos.

En la Figura 6.30a se muestra un momento de flujo de 0.718, siendo el río Carrizal el principal y el río Grijalva el tributario; la morfología formada en la unión de los dos ríos muestra la formación de un hoyo que se ubica en la margen izquierda en la intersección de los dos afluentes y que es formada por las recirculaciones que se mencionan en el capítulo 2 y mostradas en la Figura 6.26 sección confluencia 2. En la Figura 6.30b el momento de flujo disminuye ($M_r = 0.087$) y el rol sigue manteniéndose para los afluentes de la confluencia; sin embargo, el hoyo que se forma en la intersección de los ríos se mueve hacia el margen derecho de la confluencia. En la Figura 6.30c el momento de flujo tiene un valor de 0.247 y el río Carrizal es el tributario y el río Grijalva, el principal. El hoyo formado en la intersección de los ríos muestra una tendencia hacia la margen izquierda en la confluencia, es decir la morfología de la confluencia es

parecida a la encontrada en el 2013. Es importante mencionar que en el 2013 se tenía una condición de gastos bajos y que el río principal era el Carrizal y se observa que aguas más abajo del margen izquierdo de la confluencia se encuentra una barra formada por las bajas velocidades que mantiene la confluencia. Esta misma barra es formada en el margen derecho de la confluencia por el río Grijalva cuando tiene un rol principal y a las bajas velocidades que se forman en esas zonas de la confluencia (Figura 2.4).

En la Figura 6.30d la relación de momentos de flujos es de $M_r = 0.332$, el río principal es el Grijalva y el río tributario es el Carrizal. Si la tendencia se mantuviera como se ha estado analizando, el hoyo formado en la confluencia estaría en el extremo izquierdo de la confluencia; sin embargo, la presencia de una excavadora sobre el río Grijalva alteró la morfología de la confluencia. Esto puede apreciarse si se comparan las batimetrías de las Figuras 6.5 y 6.6. La hidrodinámica en esta condición fue la analizada en los apartados 6.3.1 y 6.3.2, donde se muestra que hidrodinámicamente la confluencia se mantiene trabajando de forma natural, es decir recuperan el sentido del flujo por la geometría del canal, pero la morfodinámica es afectada de manera considerable.

6.5 Modelación de Hidrodinámica

Verificación del Modelo

En el caso particular del módulo hidrodinámico empleado del software Iber, este requirió como condiciones iniciales, al caudal, la rugosidad, la superficie libre del agua y como datos de frontera la batimetría (Figura 6.5). Se modelaron tres condiciones de gasto en la zona. En los tres, se simuló la condición de gasto medida por el ADCP RiverCat en la confluencia Grijalva - Carrizal. En la Tabla 6.3, se resumen estas condiciones y Figura 6.31 se muestra la triangulación de volúmenes finitos.

Tabla 6.3. Escenarios modelados.

Contorno	Régimen	Condición	
Entrada	1er. escenario Carrizal 2015	Caudal total	
		Tiempo (s)	$Q(m^3 s^{-1})$
		0	198.93
	1er. escenario Grijalva 2015	Caudal total	
		Tiempo (s)	$Q(m^3 s^{-1})$
		0	391.98
	2do. escenario Carrizal 2014	Caudal total	
		Tiempo (s)	$Q(m^3 s^{-1})$
		32400	354.81
	2do. escenario Grijalva 2014	Caudal total	
		Tiempo (s)	$Q(m^3 s^{-1})$
		32400	98.82
Salida	3er. escenario Carrizal 2013	Caudal total	
		Tiempo (s)	$Q(m^3 s^{-1})$
		70200	70.09
	3er. escenario Grijalva 2013	Caudal total	
		Tiempo (s)	$Q(m^3 s^{-1})$
		70200	45.72
	1er. escenario Confluencia 2015	Nivel dado	
		Tiempo (s)	Cota (msnm)
		0	4.54
Salida	2do. escenario Confluencia 2014	Nivel dado	
		Tiempo (s)	Cota (msnm)
		32400	3.38
	3er. escenario Confluencia 2013	Nivel dado	
		Tiempo (s)	Cota (msnm)
		70200	1.28

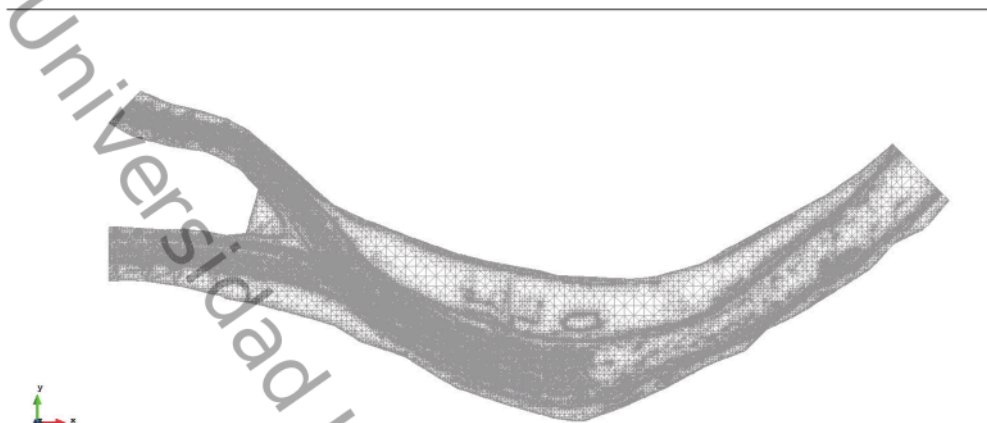


Figura 6.31. Mallado no estructurado (triangulación de volúmenes finitos) generado por programa Iber 2.4 de la confluencia Grijalva - Carrizal.

Los resultados obtenidos de la modelación se presentan en las Figuras 6.32, 6.33 y 6.34. En la Figura 6.32 las líneas punteadas de rojo representan la tendencia de la interfaz de mezclado con una tendencia hacia el margen izquierdo de la confluencia. Al comparar las velocidades obtenidas por el ADCP (Figura 6.9) con la modelación numérica existe una diferencia en las velocidades promedio máxima de 0.428 m s^{-1} . Por otro lado, la modelación muestra la zona de recuperación del flujo que no se incluye en las gráficas de las velocidades en planta medidas en campo (Figuras 6.7, 6.8 y 6.9).

En la Figura 6.33 se observan los resultados de la modelación de la velocidad promedio para condición medida en el 2014. Al comparar las velocidades máximas obtenidas por el ADCP (Figura 6.8) con las obtenidas en el modelo numérico, existe una diferencia de 0.127 m s^{-1} . La interfaz de mezclado obtenido por el modelo numérico indica una tendencia hacia el margen derecho de la confluencia. La zona de recuperación del flujo se encuentra en una posición similar a la condición medida en el 2015.

En la Figura 6.34, la modelación muestra una zona de estancamiento en el punto de unión de la confluencia. La posición de la shear layer se encuentra

cerca de la margen izquierda de la confluencia. La velocidad promedio máxima obtenida por el modelo numérico difiere en 0.24 m s^{-1} , con respecto a las medidas recolectadas en campo (Figura 6.7).

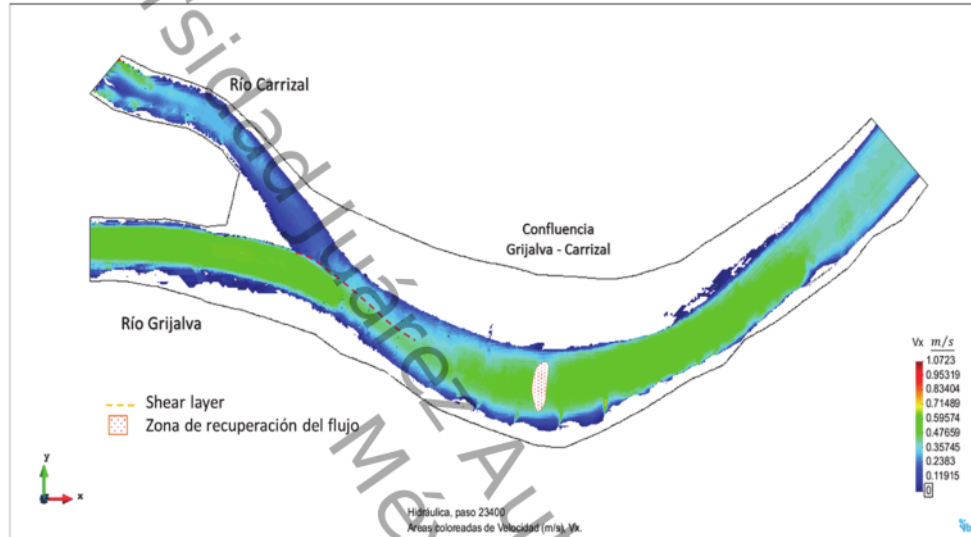


Figura 6.32. Modelación numérica para condiciones de caudal, medido en el año 2015.

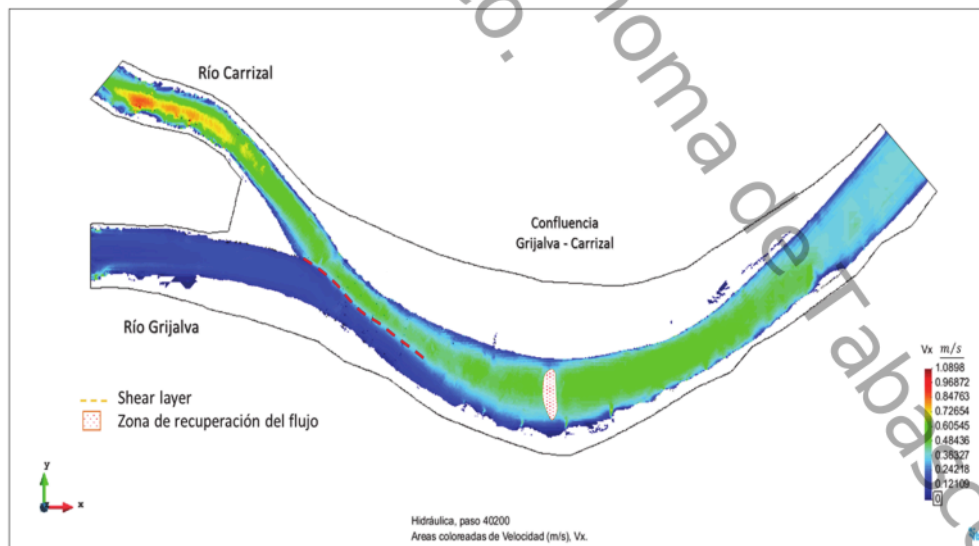


Figura 6.33. Modelación numérica para condiciones de caudal, medido en el año 2014.

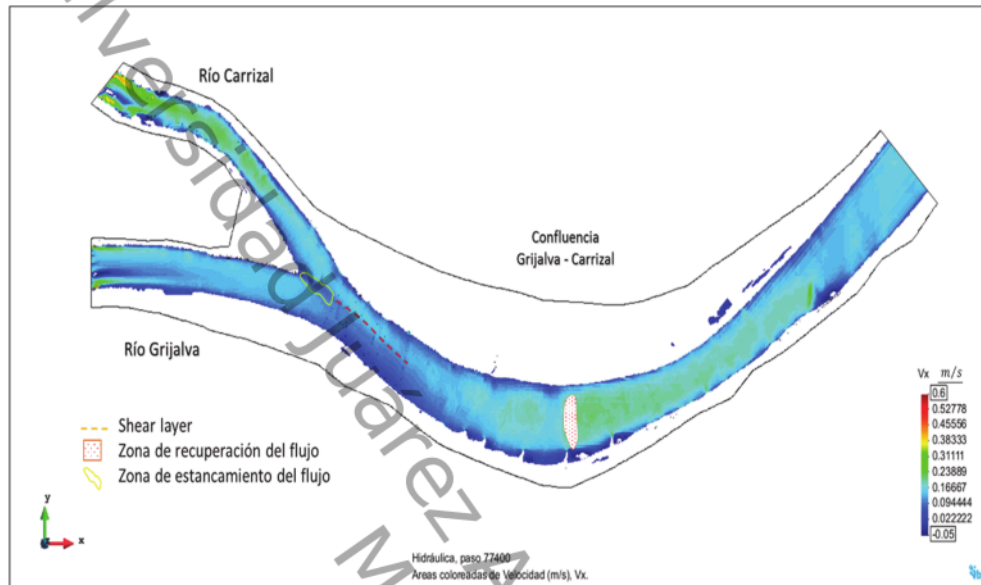


Figura 6.34. Modelación numérica para condiciones de caudal, medido en el año 2013.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El empleo de perfiladores de corriente acústicos Doppler, permitió realizar el análisis de las corrientes secundarias en confluencias. Las mediciones del campo tridimensional del vector velocidad, la turbulencia y la morfología de la confluencia en diferentes condiciones de gastos, revelaron que los patrones de flujo y la morfología de los meandros confluentes son diferentes. Esto se debe a la deflexión del flujo generada por cada uno de los canales, misma que es heredada desde la zona de formación de la confluencia hasta la zona de recuperación del flujo.

En este trabajo se encontró que, para las condiciones de gastos medidos, no existe un brazo dominante, ya que el gasto de los ríos cambia constantemente. También se encontró que este cambio de rol en los caudales, está ligado con las condiciones hidrológicas de los ríos que conforman la confluencia. Bajo este escenario se encontró que la relación de momentos de flujos determinado a partir de las diferentes condiciones de caudales medidas, muestra una correlación entre la batimetría, la interfaz de mezclado y el desarrollo de las corrientes secundarias. La morfodinámica de la confluencia mostró que cuando uno de los brazos es el principal, la formación de la socavación, queda determinada por el gasto del río principal. La interpretación de los momentos de flujos está condicionada al rol de los ríos que conforman la confluencia y los gastos

dominantes. De esto se concluye que el momento de flujo es un indicador de las zonas de erosión y movimiento de la confluencia.

Las velocidades graficadas en planta, mostraron un cambio en la dirección del flujo sobre el río Carrizal; mientras que sobre el río Grijalva estas mantuvieron una sola dirección. Lo anterior indica que el río Carrizal mantiene una sinuosidad en su cauce aguas arriba de la confluencia, lo que genera estos cambios de direcciones que se traduce en velocidades secundarias no desarrolladas, mientras que el río Grijalva presenta un radio de curvatura constante aguas arriba de la confluencia lo que genera velocidades secundarias desarrolladas. Se encontró que, en el punto de unión de la confluencia, las corrientes secundarias observadas son consecuencias de los ríos Grijalva y Carrizal, ya que son heredadas por estas y se mantienen hasta aguas abajo hasta el punto de recuperación del flujo. A partir del análisis de las secciones transversales se encontró que la suma de las corrientes secundarias en el punto de recuperación del flujo, está en función de las velocidades desarrolladas por el río que aporta el gasto dominante, por lo que en la confluencia en estudio no existe un río dominante.

Se calibró el modelo numérico contra tres condiciones hidráulicas medidas en campo, encontrando una similitud entre lo medido y lo modelado cercana al 90%. Esto permitió tener la certeza de una adecuada representación hidrodinámica del campo de velocidades en la confluencia. Se estaba interesado en evaluar la capacidad del modelo numérico para reproducir la interfaz de mezclado y la zona de recuperación del flujo. Encontrando que la interfaz de mezclado (shear layer) para las diferentes condiciones de flujo, tenía un ajuste cercano al 90%; lo que puede considerarse una reproducción adecuada. Sin embargo, se encontró que la predicción de la zona de recuperación del flujo – donde el flujo se uniformiza- coincidió solamente en un 60% contra la medida en campo. Este resultado muestra que la modelación numérica bidimensional (2D),

no es suficiente para determinar la zona de recuperación del flujo. Esto se debe a los efectos de las recirculaciones transversales que se generan en el río; en otras palabras, a efectos tridimensionales que el software no puede reproducir. De ahí se destaca la importancia del trabajo de campo.

7.2 Recomendaciones

El proceso de medir en hidráulica fluvial no es sencillo, este requiere de una amplia variedad de conocimientos en el área de ingeniería e investigación; además, de una amplia experiencia en el manejo de equipos de medición, uso de software, así como del análisis, procesamiento e interpretación de datos.

A continuación, se enumeran algunas recomendaciones derivadas de la experiencia en mediciones de campo.

Reconocimiento del área de estudio: Es de importancia realizar un recorrido presencial previo en la posible área de estudio. Esto permitirá conocer las zonas de fácil acceso al punto de medición, esto con la finalidad de evitar pérdidas de tiempo innecesarias. De igual forma, permite conocer los puntos de emergencia como son hospitales o autoridades de rescate.

Equipos de medición y de apoyo: son las herramientas fundamentales en las campañas de campo, por lo que se recomienda revisar previamente el funcionamiento de los equipos y realizar una lista de cada material a utilizar. Debido a que las mediciones en condiciones naturales del flujo y el transporte de sedimentos cambian constantemente, es importante que los equipos de medición estén ajustados y calibrados; por lo tanto, el operador debe contar con conocimientos básicos de hidráulicos, y entrenamiento adecuado para el manejo de los equipos. Mediciones incorrectas, originan predicciones equivocadas. Lo que significa pérdidas en tiempo y dinero.

Recolección y procesamiento de datos de campo: Es de gran importancia establecer el número de variables a medir, ya que las mediciones que se realizan en campo pueden ser costosas. Considerando, que las condiciones del río previamente identificadas para su evaluación pueden cambiar. Por lo que, es importante definir las variables a medir y las condiciones de gastos que se quiera estudiar.

Además, se deben tener listas las hojas de campo, que incluyan los puntos de medición y las observaciones importantes que afecten dichas medidas. Esto con la finalidad de tener un registro confiable de los datos.

Finalmente, la interpretación de datos requiere de personas expertas en el tema, ya que un buen análisis e interpretación permite una mejor calibración y validación de resultados generados con modelos numéricos y experimentales.

7.3 Investigaciones futuras

Durante el desarrollo de esta tesis se ha adquirido el conocimiento y experiencia del funcionamiento de las confluencias zona de planicie en condiciones naturales. Se calibró y validó un modelo numérico de la zona donde y se generaron los campos de velocidad. Quedando como trabajos futuros:

A) El pronóstico de la evolución morfológica de la confluencia de estudio, que permitirá conocer las zonas de erosión y depósitos de sedimentos.

B) La predicción de la interfaz de mezclado para distintos momentos de flujo, lo que mostrará las zonas de recirculación generadas por las corrientes secundarias en una confluencia.

C) La inclusión de transporte de sedimentos, permitirá conocer la forma de fondo y los esfuerzos cortantes formados en una confluencia.

D) La estimación de la tasa de migración, permitirá conocer la evolución de los meandros de una confluencia de planicie.

REFERENCIAS

- Álvarez, A., Bermúdez, J., Cea, M., Suárez, L., Ures, J., and Puertas, J., (2015). Modelización de los impactos por DSU en el río Miño (Lugo). *Ingeniería del agua*, 19(2), 105-116. doi:<http://dx.doi.org/10.4995/ia.2015.3648>.
- Appell, G., Gast, J., Williams, R., Bass, P., (1988). Calibration of acoustic Doppler current profilers. *Proceedings, Oceans 88—Conference and Exposition October 31-November 2, 1988, IEEE, Washington, D.C.*, 346–352.
- Arega, F., (2013). Hydrodynamic modeling and characterizing of Lagrangian flows in the West Scott Creek wetlands system, South Carolina. *Journal of Hydro-environment Research*, 7, 50-60.
- Ashmore, P.E., (1993). Anabranch confluence kinetics and sedimentation processes in gravel-braided streams. In: Best, J.L., Bristow, C.S. (Eds.), *Braided Rivers*. Geological Society Special Publication 75. Geological Society, London,. 129–146.
- Ashmore, P.E., Ferguson, R.I., Prestegard, K.L., Ashworth, P.J., Paola, C., (1992). Secondary flow in anabranch confluences of a braided, gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms* 17 (3), 299–311.
- Ashmore, P.E., Gardner, T., (2008). Unconfined confluences in braided rivers. In: Rice, S., Roy, A., Rhoads, B.L. (Eds.), *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. Wiley, Chichester,. 119–143.
- Balouchi, B., Nikoo, M.R., and Adamowski, J., (2015). Development of expert systems for the prediction of scour depth under live-bed conditions at river confluences: Application of different types of ANNs and the M5P model tree. *Applied Soft Computing*,. 34, 51-59.
- Bathurst, J.C., Thorne, C.R., Hey, R.D., (1977). Direct measurements of secondary currents in river bends. *Nature* 269 (5628),. 504–506.
- Best, J.L., (1988). Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*, 35(3),. 481-498.
- Best, J. L., & Reid, I., (1984). Separation zone at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1588-1594.
- Best, J.L., (1987). Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M., Harvey, M.D. (Eds.), *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*. Society

- of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication No. 39. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, OK., 27–35.
- BGS, (en línea) World Magnetic Model 2015 Calculator, http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html. Fecha de consulta 5 de enero 2015.
- Biron, P., Roy, A.G., and Best J.L., (1996b), Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences, *Experiment Fluids*, 21, 437–446, doi:10.1007/BF00189046.
- Biron, P., DeSerres, B., Roy, A.G., Best, J.L., (1993a). Shear layer turbulence at an unequal depth channel confluence. In: Clifford, N.J., French, J.R., Hardisty, J. (Eds.), *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK., 197–213.
- Biron, P., Best, J.L., and Roy A.G., (1996a), Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences, *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 676–682, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:12(676).
- Biron, P.M., Richer, A., Kirkbride, A.D., Roy, A.G., Han, S., (2002). Spatial patterns of water surface topography at a river confluence. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (9), 913–928.
- Blanckaert, K., and Graf, W.H., (2004). "Momentum transport in Sharp open-channel bends." *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(3), 186–198.
- Boyer, C., Roy, A.G., and Best, J.L., (2006), Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology, *Journal of Geophysical Research*, 111, F04007, doi:10.1029/2005JF000458.
- Brierley, G.J. and Fryirs K.A., (2005). *Geomorphology and River Management*. UK: Blackwell Publishing.
- Bruce L. R., Stephen T. K., (1993). Flow structure at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology* II, 273 – 293.
- Ce2, L. and Blade, E., (2015), A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications, *Water Resources Research*, 51, 1944–7973, 10.1002/2014WR016547.

- Cea, L., Puertas, J., Vázquez-Cendon, M.E., (2007) Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. Archives of Computational Methods in Engineering, State of the art reviews, Vol.14 (3).
- Chang, N.B, Crawford, A.J, Mohiuddin, G., Kaplan, J., (2015) Low flow regime measurements with an automatic pulse tracer velocimeter (APTV) in heterogeneous aquatic environments. Flow Measurement and Instrumentation, 42, 98-112.
- Chow, V., (1959). Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.
- Christensen, J.L., and Herrick, L.E., (1982. Mississippi River Test, Volume 1. Final report DCP4400/300, prepared for the U.S. Geological Survey by AMETEK/Straza Division, El Cajon, California, under contract No. 14-08-001-19003,. A5-A10.
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., and Sukhodolov, A., (2012), Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence, Journal of Geophysical Research., 117, F04028, doi:10.1029/2012JF002452.
- Cundy, A.B, Lafite, R., Taylor, J.A., Hopkinson, L., Deloffre, J., Charman, R., et al., (2007) Sediment transfer and accumulation in two contrasting salt marsh/mudflat systems: the Seine estuary (France) and the Medway estuary (UK). Hydrobiologia, 588, 125-134.
- Dietrich, W.E., Smith, J.D., (1983). Influence of the point bar on flow through curved channels. Water Resources Research 19 (5), 1173-1192.
- Falcón, M., (1984). Secondary flow in curved open channels. Annual Review of Fluid Mechanics. 16: 179-93.
- Ferguson, R., Ashmore, P., Ashworth, P., Paola, C., Prestegard, K., (1992). Measurements in a braided river chute and lobe: I. Flow pattern, sediment transport and channel change. Water Resources Research 28, 1877-1886.
- Fulford, J.M, Sauer, V.B., (1986). Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge in S.Y. Geldon AL (ed.) Selected papers in the hydrologic sciences: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2288. Colorado, United States,. 139-144.

- García-Reyes, M., Priego-Hernández, G., Soto-Cortes, G., Rivera-Trejo, F., (2017). Análisis hidrodinámico en un canal de derivación: caso el Censo, municipio de Centro, Tabasco. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 1(2). 23-42.
- Gordon, R.L., (1989). Acoustic measurement of river discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(7), 925-936.
- Gotz, W., (1980). Discussion of secondary flow and shear stress at river bends by Bathurst, J., Thorne, C, Hey, R. *Journal of Hydraulic Engineering. Div. ASCE* 106; 1710-13.
- Gutierrez, R.R., Abad, J.D., Choi, M., and Montoro, H., (2014). Characterization of confluences in free meandering rivers of the Amazon basin. *Geomorphology*, 220, 1-14.
- Guymer I., (1998). Longitudinal dispersion in a sinuous channel with changes in shape. *Journal of Hydraulic Engineering Eng.* 124(1):33-40.
- Iberaula.es., (2015). Presentación. [online] Available at: <http://iberaula.es/aula-iber/presentacion> [Accessed 3 Dec. 2015].
- Kikkawa, H., Ikeda, S., Kitagawa, A., 1976. Flow and bed topography in curved open channels. *Journal of Hydraulic Engineering. Div. ASCE* 102: 1327—42.
- Kir¹³ G., and Constantinescu, G., (2009), Nature of flow and turbulence structure around an in-stream vertical plate in a shallow channel and the implications for sediment erosion, *water resources research*, 45, W06412, doi:10.1029/2008WR007363.
- La¹⁷ S.N., Bradbrook K.F., Richards, K.S., Biron, P.M. and Roy, A.G., (2000). Secondary circulation cells in river channel confluences: measurement artefacts or coherent flow structures? *Hydrological Processes* 14: 2047 - 2071.
- Leclair, S., and Roy, A.G., (1997), Variabilité de la morphologie et des structures sédimentaires du lit d'un confluent de cours d'eau discordant en période d'étiage, *Géographie physique et Quaternaire*, 51, 125–139.
- Leite Ribeiro, M., (2011). Influence of tributary widening on confluence morphodynamics (No. EPFL-BOOK-169900). EPFL-LCH.

- Mosley, M. P., (1976). An experimental study of channel confluences. *The journal of geology*, 535-562.
- Mueller, D.S., (2002). Field assessment of acoustic Doppler based discharge measurements. *Proceedings, Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, Va.
- Nyom, E.A., Oberg K.A., Rehmann, C.R., (2002). Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers—Sources of error and laboratory results. *Proceedings, Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, Va.
- Oberg, K.A., Mueller, D.S., (1994). Recent applications of acoustic Doppler current profilers. In *Proceedings of the Symposium on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, ASCE, Reston, Va., 341–350.
- Oerted, M., (2015). Numerical Modeling of free-surface flows in practical applications. Springer, P. Rowinski and A. Radeck-Pawlik, (eds.), *Rivers-physical, fluvial and environmental processes*, GeoPlanet. DOI 10.1007/978-3-319-17719-9_8.
- Parsons, D.R., Jackson, P.R., Czuba, J.A., Engel, F.L., Rhoads, B.L., Oberg, K.A., and Riley, J.D., (2013). Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(11), 1244-1260.
- Pérez, A.K, Díaz, F.F., (2000). *Manual de Aforos*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. 137p.
- Priego-Hernández, G.A., and Rivera-Trejo, F., (2016). Secondary currents: Measurement and analysis. *Atmosfera*.
- Priego-Hernández, G.A., Rubio-Arias, H., and Rivera-Trejo, F., (2017). Hidrodinámica y medición de corrientes naturales en un río de planicie utilizando equipos acústicos Doppler. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* (aceptado).
- Rhoads, B.L., and Sukhodolov, A.N., (2004). Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence, *water resources research*, 40, W06304, doi:10.1029/2003WR002811.
- Rhoads, B.L., Kenworthy, S.T., (1995). Flow structure at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology* 11, 273–293.

- Rhoads, B.L., Kenworthy, S.T., (1998). Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence. *Earth Surface Processes and Landforms* 23 (2), 171–191.
- Riley, J.D., Rhoads, B.L., (2011). Flow structure and channel morphology at a natural confluent meander bend. *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2011.06.011.
- Rozovskii, I. L., (1957). *Dvizhenie Vody na Povorote Otkrytogo Rusla*. Kiev: Izd. Akad. Nauk Ukr. SSR. 188 pp. Transl., 1961, *Flow of Water in Bends of Open Channels*. Jerusalem: Israel Program Sci. Transl. 234 pp.
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Martí-Cardona, B., Díez-Herrero, E. and Bodoque, J., (2014). Two-dimensional numerical modeling of wood transport, *Journal of Hydroinformatics* Sep 2014, 16 (5) 1077-1096; DOI: 10.2166/hydro.2014.026.
- Seo, I.W., Lee, M.E., and Baek, K.O., (2008). 2D modeling of heterogeneous dispersion in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 2, 196–204.
- Seo I.W., Jung, Y.J., (2010). Velocity equation of secondary flow in meandering channel. In: *Proceeding of Korean Society of Civil Engineers*, 36(B):170 (in Korean).
- Shih H.H., Payton C., Sprenke J., Mero T., (2000). Towing basin speed calibration of acoustic Doppler current profiling instruments. *Proceedings, 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, ASCE, Reston, Va.
- Simpson, M.R., and Oltmann, R.N., (1993). Discharge measurement using an acoustic Doppler current profiler: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2395, 34 p.
- Slingerland, R.L., and Smith, N.D., (2004). River avulsions and their deposits, *Annual Rev. Earth Planetary Sciences*, 32, 257-285.
- Song, C.G., Seo, I.W., Kim, Y.D., (2012). Analysis of Secondary Current Effect in the Modeling of Shallow Flow in Open Channels, *Advances in Water Resources*, DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.02.003.
- Sontek, (2007). *RiverSurveyor System Manual Software Version 4.60*: Son-Tek/YSI Inc, Manual, 182 p.

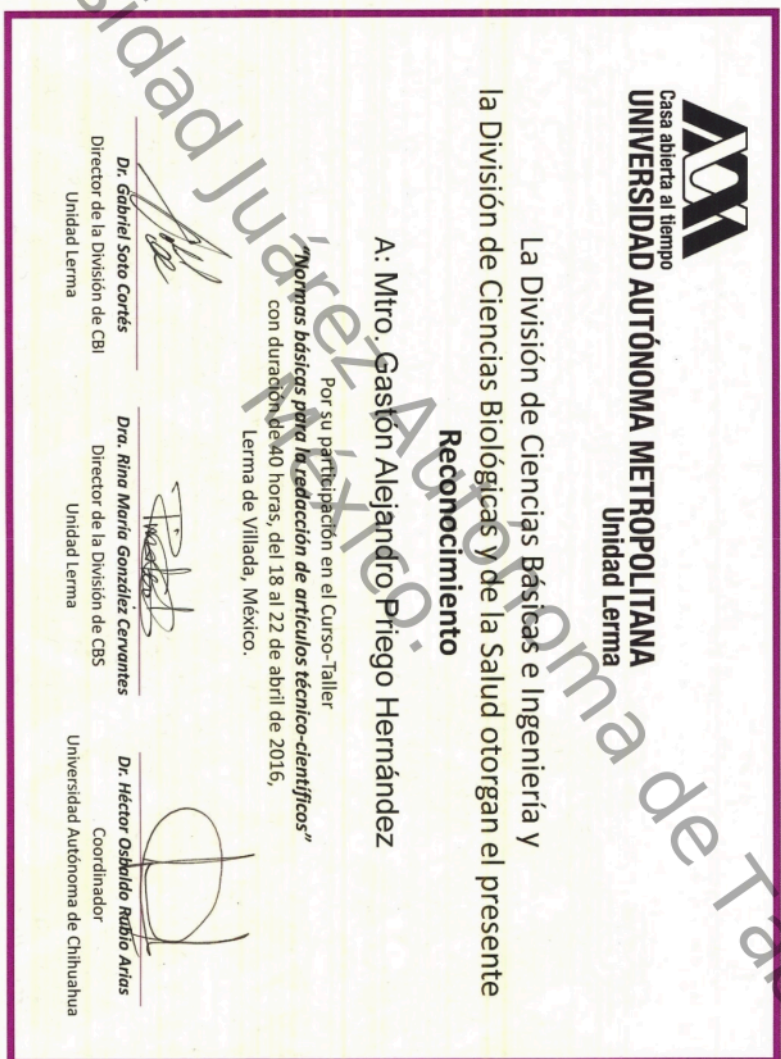
- Stoesser, T., Ruether, N. and Olsen, N. R. B., (2010). Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel. *Advances in Water Resources* 33 (2010) 158–170.
- Szupiany, R.N., Amsler, M.L., Best, J.L., Parsons D.R., (2007). Comparison of fixed-and moving-vessel flow measurements with an aDp in a large river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1299-1309.
- Teledyne RD Instruments, (2014). WinRiver II Software User's Guide: P/N 957-6231-00.
- Venditti, J.G., Church, M., Attard, M.E., Haught, D., (2016). Use of ADCPs for suspended sediment transport monitoring: An empirical approach. *Water Resources Research*, 52(4), 2715-2736.
- Vide, J. P., (2003). *Ingeniería de ríos*. México: Alfaomega.
- Vogt, R.H., Neubauer, W.G., (1976). Relationship between acoustic reflection and vibrational modes of elastic spheres. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60(1), 15-22.
- Winterwerp, J.C., Wang, Z.B., Kaaij, T., Verelst, K., Bijlsma, A., Meersschaut, Y., Sas, m., (2006). Flow velocity profiles in the Lower Scheldt estuary. *Ocean Dynamics*, 56: 284–294.

Anexos

Anexo A, cursos de actualización nacionales e internacionales

- Participación como asistente al curso – taller de carácter nacional: **Normas básicas para la redacción de artículos técnicos – científicos**, del 18 al 22 de abril de 2016, Lerma de Villada, México.
- Participación como asistente al curso – taller de carácter internacional, **Monitoring flow, discharge, turbulence and suspended sediment from ADCPs**, del 28 al 30 de agosto de 2015, Iquitos, Perú.
- Participación como asistente al curso – taller de carácter nacional, **Recursos hidráulicos y sistemas fluviales**, del 25 – 27 de marzo de 2015, Lerma de Villada, México.
- Participación como asistente a la estancia de carácter internacional: **Ciencia, cultura y tecnología para el conocimiento de la Amazonia**. Lima, Perú. Fecha del 4 al 15 de agosto de 2014.

ANEXO A



ANEXO A



Certificate of Short Courses

This is to certify that;

Gaston Priego

has attended the Short Courses *Monitoring flow, discharge, turbulence and suspended sediment from ADCPs* 9th RCEM Symposium held in Iquitos, Peru from August 28-30, 2015.


Cmdr. Diego Gago
Chief, Section of Hydrography and Navigation of the Amazon (SHNA),
Peruvian Navy


Dr. Jorge D. Abad
Academic Director, Center for Research and Education of the Amazonian Rainforest (CREAR)


Cmdr. Hugo Montoro
Executive Director, Center for Research and Education of the Amazonian Rainforest (CREAR)

ANEXO A



ANEXO A



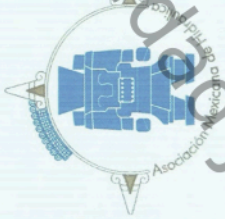
Anexo B, participación como ponente en conferencias nacionales e internacionales

- Participación como ponente en un evento científico de carácter nacional: Congreso nacional de Hidráulica 2017 en la conferencia **Corrientes secundarias en confluencias**. Acapulco, Guerrero. Presentado 24 de marzo de 2017
- Participación como ponente en el curso de capacitación de carácter nacional: Universidad Autónoma Metropolitana con el curso **Simulación hidráulica básica de ríos con modelo Iber 2.4**. Lerma de Villada, México. Presentado 2 al 4 de marzo de 2017.
- Participación como ponente en un evento científico de carácter internacional: The 9th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2015), con el trabajo denominado **Comparison of velocity measurements in natural streams using different frequencies of Doppler equipment**. Iquitos, Perú. Presentado 28 de agosto de 2015
- Participación como ponente en un evento científico de carácter nacional: Recursos hidráulicos y sistemas Fluviales en la conferencia magistral **Medición de corrientes secundarias**. Lerma de Villada, Estado de México. Presentado 26 de marzo 2015

ANEXO B



**Seguridad y Sustentabilidad
Hídricas para México**
XXIV Congreso Nacional de Hidráulica



*La Asociación Mexicana de Hidráulica, A.C.
otorga el presente reconocimiento a*

Priego Hernández Gastón

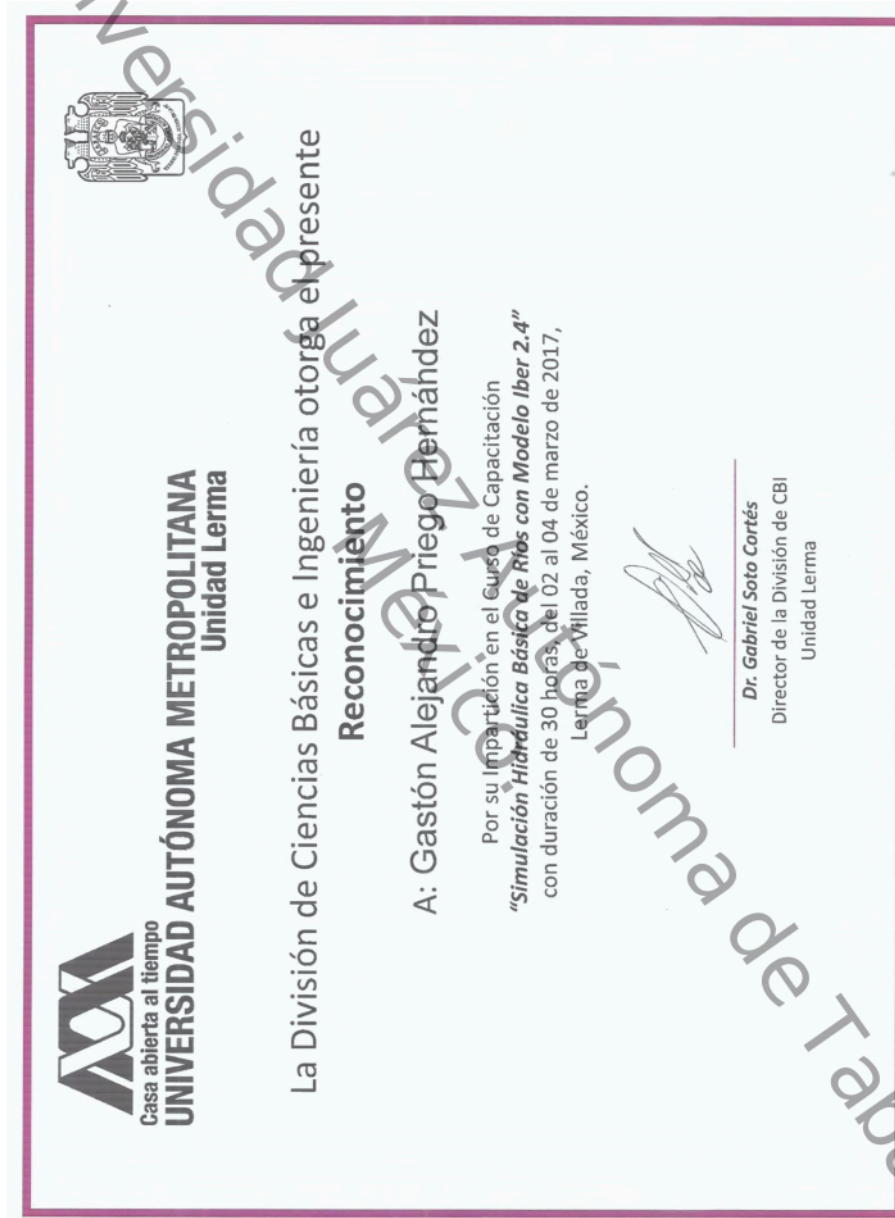
PONENCIA: CORRIENTES SECUNDARIAS EN UNA CONFLUENCIA

*presentada en el Congreso Nacional de Hidráulica,
celebrado en la Riviera Diamante de Acapulco, Guerrero.
Sirva éste, como estímulo a su esfuerzo y dedicación
por la Seguridad y Sustentabilidad Hídricas para México.*

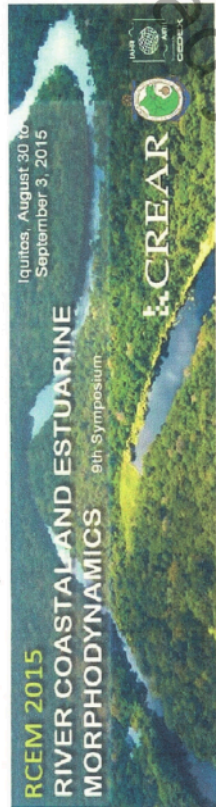
Acapulco, Guerrero a 24 de Marzo de 2017

Ing. Marco Alfredo Murillo Ruiz
PRESIDENTE DEL CONSEJO DIRECTIVO NACIONAL

ANEXO B



ANEXO B



Certificate of Attendance

This is to certify that;

Gaston Alejandro Priego Hernandez

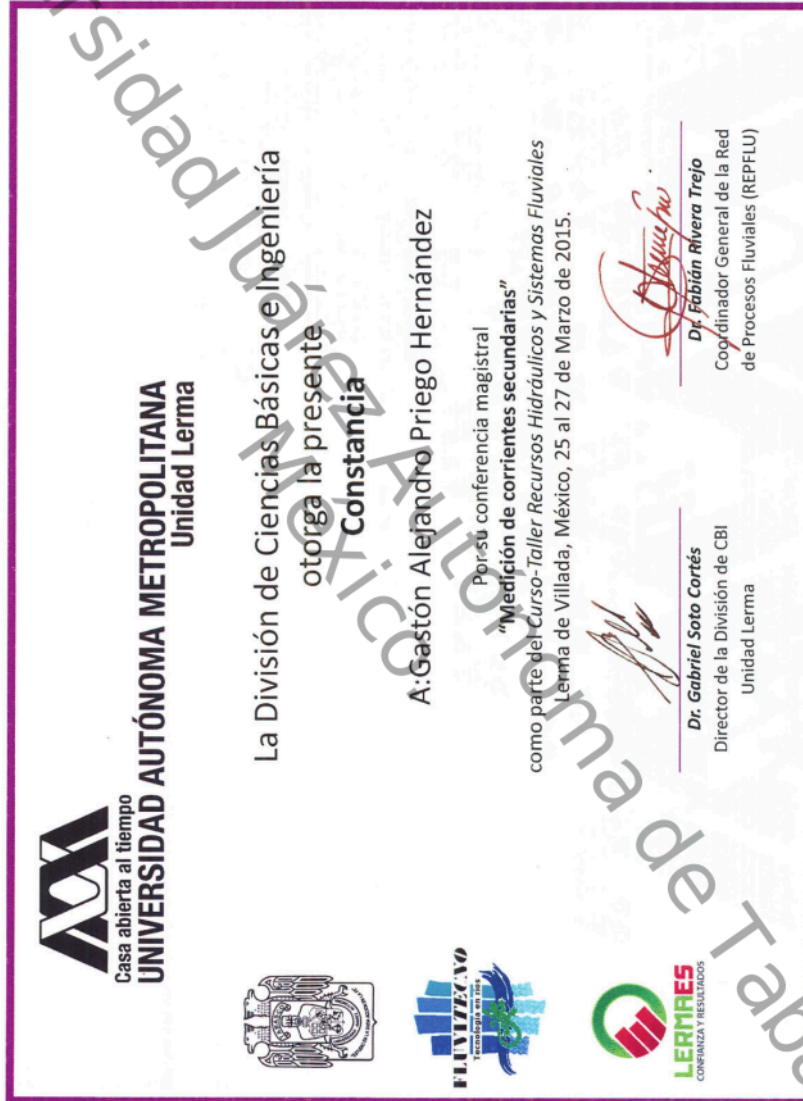
has attended with POSTER titled: Comparison of velocity measurements in natural streams with different frequencies Doppler equipment, at the 9th RCEM Symposium held in Iquitos, Peru from 28 August – 4 September 2015.



Jorge D. Abad
RCEM Local Organizing Committee



ANEXO B



Anexo C, artículos publicados

- Publicación como primer autor del artículo científico **Secondary currents: Measurement and analysis** en la revista *Atmósfera*, indizada en *Journal Citation Reports*. Publicado en enero de 2016
- Publicación como co-autor del artículo científico **Análisis hidrodinámico en un canal de derivación: caso el censo, municipio de Centro, Tabasco** en la revista *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, revista arbitrada. Publicado en agosto de 2017.

ANEXO C



Mexico City, October 28, 2015.

Dr. Fabián Rivera Trejo
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez
Km. 1, Col. Esmeralda
C. P. 86690, Cunduacán, Tabasco
México

Dear Dr. Rivera Trejo:

I have the pleasure to inform you that your manuscript SECONDARY CURRENTS: MEASUREMENT AND ANALYSIS by Gastón A. Priego Hernández and Fabián Rivera Trejo, has been accepted for publication in ATMOSFERA.

On behalf of the Editorial Committee, I appreciate you have considered ATMOSFERA to present your scientific work.

Sincerely yours

Dr. Carlos Gay
Editor

www.revistas.unam.mx/index.php/atm

ANEXO C

Atmósfera 29(1), 23-34 (2016)

Secondary currents: Measurement and analysis

GASTÓN A. PRIEGO-HERNÁNDEZ

*División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,
carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km 1, Col. La Esmeralda, 86690 Cunduacán,
Tabasco, México*

FABIÁN RIVERA-TREJO

*División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,
carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km 1, Col. La Esmeralda, 86690 Cunduacán,
Tabasco, México*

Corresponding author, email: jgfabianrivera@gmail.com

Received: May 8, 2015; accepted: October 28, 2015

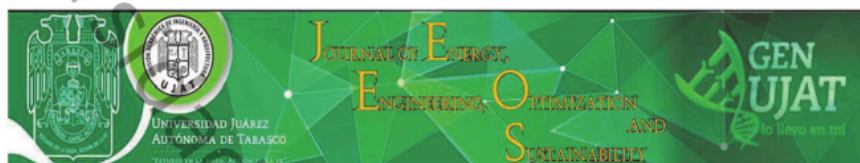
RESUMEN

La dinámica de fluidos tiene como propósito entender el movimiento de líquidos y gases por medio de funciones que describen la distribución de velocidades. Algunos fenómenos naturales que presentan estas funciones son los huracanes, los cuales son generados por las diferencias de presión, los ciclones, cuya fuente primaria de energía es el gradiente horizontal de temperatura, y los remolinos, que están ligados al gradiente de presión hidrostático. En el caso particular de los remolinos, éstos generan velocidades secundarias, las cuales son flujos que se forman por la existencia de fuerzas desiguales entre el gradiente de presión hidrostático y las fuerzas centrífugas, o debido a esfuerzos cortantes tal como sucede en la unión de dos o más flujos. Este fenómeno también se observa en tornados, donde la fuerza centrífuga es mayor en la parte superior y luego va disminuyendo hacia el fondo, mientras que en los ríos se detecta particularmente en curvas y uniones (confluencias). Entender cómo se desarrollan estas velocidades secundarias es de interés, debido a que el comportamiento de los flujos está en función de la magnitud de dichas velocidades, de modo que su caracterización es fundamental. El objetivo de este estudio fue estimar las velocidades secundarias en la unión de dos ríos, a partir de mediciones de campo realizadas con medidores acústicos Doppler. Un segundo objetivo fue graficar las velocidades secundarias y, en consecuencia, apreciar las líneas de corriente y los mecanismos de rotación de flujo. Estos mecanismos están relacionados con los procesos de erosión y sedimentación, por lo que su entendimiento ayudará a pronosticar cambios morfológicos en los ríos.

ABSTRACT

Fluid dynamics has the purpose of understanding the movement of liquids and gases by functions that describe the distribution of velocities. Some natural phenomena that present these functions are hurricanes, generated by pressure differences, cyclones, developed by the horizontal temperature gradient, and eddies, associated with a hydrostatic pressure gradient. In the particular case of eddies, they generate the so-called secondary velocities, which are flows formed by the presence of unequal forces between a hydrostatic pressure gradient and centrifugal forces, or by shear stresses at the joining of two flows. In addition, this phenomenon is observed in tornados, where the centrifugal force is greater in the upper layer and decreases towards the bottom, whereas the pressure gradient moves from a high to a low pressure, while in rivers it is detected particularly in bends or joins. Understanding the development of secondary currents is important for the reason that flow behavior is a function of the magnitude of these currents, hence their characterization is fundamental. The objective of this study was to obtain the secondary velocities developed as an effect of the union of two water currents, based on data acquired from Doppler acoustic recorders. A second objective was to draw the secondary velocities and to show the rotation flow

ANEXO C



Asunto: Carta de Aceptación de artículo

REF JEEOS 02/03

Cunduacán Tabasco 27 de Marzo de 2017

Dr. Fabián Rivera Trejo

PRESENTE:

De conformidad con el trabajo titulado "ANÁLISIS HIDRODINAMICO EN UN CANAL DE DERIVACIÓN: CASO EL CENSO, MUNICIPIO DE CENTRO, TABASCO"

De los autores:

García-Reyes M., Priego-Hernández G., Soto-Cortes G., y Rivera-Trejo F.

Tengo el agrado de notificarle que **ha sido aceptado** para su publicación en el Volumen 2 (Mayo-Agosto) número 1 2017, de la *Revista Arbitrada* Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability con ISSN **2448-8186**.

Sin más por el momento, le agradezco su participación

Atentamente


Dra. Laura Lorena Díaz Flores
Editora en Jefe
Revista JEEOS

Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco-División Académica de Ingeniería y
Arquitectura

ANEXO C

2017-6-22

Vol. 1, Núm. 2 (2017)

Tabla de contenidos

ARTÍCULO CIENTÍFICO

TÍTULO	AUTORES	PÁGINAS
CARACTERIZACIÓN RUSCANTAL DE DIVERSOS TIPOS DE ARQUITECTURA DE MICROPROCESADOR ELÉCTRONICO DE RADIACIÓN	J. Torres-Díaz, J. C. Solís-Cortez, M. L. Ruiz-Peralta, E. Ramírez-Morales, G. Pérez-Hernández, L. Rojas-Blanco	1-10
CO-ELECTRODEPOSITO GALVANOSTÁTICO DE PELÍCULAS DE CUIZ Y ZN PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS	R. Torres-Ricárdez, G. Pérez-Hernández, M. F. García-Mendoza, E. Ramírez-Morales	11-22
ANÁLISIS HIDRODINAMICO EN UN CANAL DE DERIVACIÓN: CASO EL CENSO, MUNICIPIO DE CENTRO TABASCO	M. García-Reyes, F. Rivera-Trejo, G. Priego-Hernández, G. Soto-Cortés	23-42
DISTRIBUCIÓN Y CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN CURVAS CON ESPERIONES, RÍO SAN JUAN, COAHUILA	R. García-García, F. Quiroz-Ramírez, J. E. León-Jiménez, R. S. Flowers-Cano, M. A. Balladares-Sánchez, J. A. Nungaray-Núñez	43-58
REDISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE SEDIMENTOS Y HIDRODINAMICA EN CURVAS, RÍO SAN JUAN, COAHUILA	A. M. Fuentes-Aguilar, J. E. León-Jiménez, R. S. Flowers-Cano, M. A. Balladares-Sánchez, J. A. Nungaray-Núñez	59-72
CORRIENTES SECUNDARIAS EN CURVAS DE RÍOS CON ESPERIONES, USANDO TÉCNICAS ACÚSTICAS	F. A. Guzmán-Montejó, R. S. Flowers-Cano, J. E. León-Jiménez, M. A. Balladares-Sánchez, J. A. Nungaray-Núñez	73-90
DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS Y HIDRODINAMICA EN CURVAS NATURALES DE RÍOS MEDIANOS (CENSO, RÍO SAN JUAN, COAHUILA)	J. C. Rodríguez-Gómez, J. E. León-Jiménez, R. S. Flowers-Cano, M. A. Balladares-Sánchez, J. A. Nungaray-Núñez	91-104

Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability, Año 1, No. 2, Mayo-Agosto 2017, es una Publicación cuatrimestral. Arreglada y editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Villahermosa, Centro, Tabasco, CP. 86040, Tel (993) 358 15 00. <http://revistas.ujat.mx/index.php/JEEOS/index>, correo: jeeos@gmail.com. Editor responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2016-050909471400-203, ISSN: 2448-9166, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Asistente Editorial de la Revista Pauly González Mayo, Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Vissa, Centro, Tabasco, Mex. C.P. 86040, fecha de última modificación, 22 de febrero de 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin la previa autorización de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

<http://revistas.ujat.mx/index.php/JEEOS/susueview/252/showToc>

191

ANEXO C



¹ García-Reyes M.
Vol 1 Núm 2. 2017 pág.23-42

ANÁLISIS HIDRODINAMICO EN UN CANAL DE DERIVACIÓN: CASO EL CENSO, MUNICIPIO DE CENTRO, TABASCO

HYDRODYNAMIC ANALYSIS IN A DERIVATION CHANNEL: CASE CENSO, CENTRO MUNICIPALITY, TABASCO

¹ García-Reyes M., ²Priego-Hernández G., ³Soto-Cortes G. y ^{1*}Rivera-Trejo F.

¹División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

²División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

³División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: jgfabianrivera@gmail.com

RESUMEN

Los canales derivadores son estructuras hidráulicas, que desvían parte del agua que circula sobre un río y la envían hacia una zona de almacenamiento o descarga. Cumple funciones variadas por ejemplo: control de inundaciones, suministro de agua municipal, o con fines consuntivos. Sin embargo, muchas de estas obras son grandes aportadoras de sedimentos, los cuales en la mayoría de los casos no son tomados en cuenta durante su diseño y afectan desde la geometría del canal, hasta las zonas de descarga. Este proceso de transporte de sedimentos va íntimamente ligado con la hidrodinámica del sistema, por lo que, si se quiere cuantificarlo es esencial conocer cómo se desarrollan los campos de velocidad dentro de la geometría del canal derivador.

En este trabajo y como parte de la estimación de la tasa de transporte de sedimentos en una obra derivadora, se presentan: las mediciones de campo y la modelación numérica realizada en una estructura derivadora que actualmente se encuentra en

Anexo D, artículos sometidos a proceso de arbitraje

- Publicación como primer autor en el artículo científico **Medición de corrientes naturales e hidrodinámica empleando equipos acústicos Doppler** en la revista *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica. Aceptado en revisión.
- Publicación como primer autor en el artículo científico **ADCP, Multi-Frequency Analysis for Flow Measurements in Rivers** en la revista *Flow Measurement and Instrumentation*, indizada en *Journal Citation Reports*. En proceso de arbitraje.

ANEXO D



INICIO ACERCA DE ÁREA PERSONAL BUSCAR ACTUAL ARCHIVOS AVISOS ARTICULOS EN PRENSA

Inicio > Usuario/a > Autor/a > Envíos > #1515 > Revisión

#1515 Revisión

RESUMEN REVISIÓN EDICIÓN

Envío

Autores/as Gaston Alejandro Priego-Hernández, Hector Osvaldo Rubio-Arias, José Guadalupe Fabián Rivera-Trejo
 Título Hidrodinámica y medición de corrientes naturales en un río de planicie utilizando equipos acústicos
 Sección ARTÍCULOS CIENTÍFICOS
 Editor/a Rufo Sánchez Hernández (Revisión)

Evaluación por pares

Ronda 1

Versión de la revisión 1515-8862-2-RV.DOCX 2017-11-14
 Iniciado 2017-11-14
 Modificado por última vez 2017-12-11
 Archivo cargado Revisor/a A 1515-8970-1-RV.DOCX 2017-11-30

Decisión del editor/a

Decisión Publicar con modificaciones 2017-12-12
 Notificar al editor/a Registro de correo electrónico del editor/a o Autor/a 2017-12-12
 Versión del editor/a 1515-8912-1-ED.DOCX 2017-11-14
 Versión del autor/a Ninguno
 Cargar la versión del autor/a Seleccionar archivo Ningún archivo seleccionado Cargar

ECOSISTEMAS Y RECURSOS AGROPECUARIOS, Año 4, No. 12, septiembre-diciembre 2017, es una Publicación cuatrimestral editada, publicada y distribuida por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Villahermosa, Centro, Tabasco, CP. 86040, Tel (993) 358 15 00, www.ujat.mx, era@ujat.mx. Editor responsable: Efraín de la Cruz Lázaro. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-120514213600-203, ISSN: 2007-901X, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Con certificado de licitud de título y contenido No. 16540 otorgado por la Secretaría de Gobernación. Responsable de la última actualización de este Número, Asistente Editorial de la Revista Lic. Misael Hernández Martínez, Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Vhsa, Centro, Tabasco, Mex. C.P. 86040, fecha de última modificación, 30 de agosto de 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Se autoriza la reproducción parcial de los artículos, siempre y cuando se mencione o se cite al autor y a la revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

Esta revista se encuentra indexada en:

CONACYT <http://www.revistascyconacyt.mx/index.php/revistas/area/6>

REDALYC



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

OPEN JOURNAL SYSTEMS

GUÍA PARA EL AUTOR

Servicio de ayuda de la revista

USUARIO/A

Ha iniciado sesión como...
fabiart
 • Mi perfil
 • Cerrar sesión

AUTOR/A

Envíos
 • Activo/a (1)
 • Archivar (2)
 • Nuevo envío

NOTIFICACIONES

• Vista
 • Gestionar

CONTENIDO DE LA REVISTA

Buscar
 Ambito de la búsqueda
 Todo
 Buscar

Examinar

• Por número
 • Por año
 • Por título

TAMAÑO DE FUENTE

ANEXO D



Fabian Rivera <jgfabianrivera@gmail.com>

Successfully received: submission ADCP, Multi-Frequency Analysis for Flow Measurements in Rivers for Flow Measurement and Instrumentation

Flow Measurement and Instrumentation <EvisSupport@elsevier.com>

28 de noviembre de 2017, 12:51

Responder a: jfmi@elsevier.com

Para: jgfabianrivera@gmail.com

This message was sent automatically. Please do not reply.

Ref: FLOWMEASINST_2017_354

Title: ADCP, Multi-Frequency Analysis for Flow Measurements in Rivers

Journal: Flow Measurement and Instrumentation

Dear Professor Rivera-Trejo,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Flow Measurement and Instrumentation. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE® at: http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?_afRNL_ACR=FLOWMEASINST and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Flow Measurement and Instrumentation

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our [Customer Support](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

Copyright ©2017 Elsevier B.V. | [Privacy Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.

Desarrollo de corrientes secundarias en confluencias

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	upcommons.upc.edu Internet	201 palabras — 1%
2	revistas.ujat.mx Internet	187 palabras — 1%
3	idoc.pub Internet	127 palabras — 1%
4	hdl.handle.net Internet	122 palabras — 1%
5	ocw.camins.upc.edu Internet	93 palabras — < 1%
6	repositorioinstitucional.uson.mx Internet	72 palabras — < 1%
7	www.smf.mx Internet	54 palabras — < 1%
8	repositorio.unc.edu.pe Internet	47 palabras — < 1%
9	era.ujat.mx Internet	45 palabras — < 1%
10	www.coursehero.com Internet	

42 palabras — < 1 %

11 repositorio.lamolina.edu.pe
Internet

36 palabras — < 1 %

12 docplayer.com.br
Internet

26 palabras — < 1 %

13 wsdot.wa.gov
Internet

25 palabras — < 1 %

14 hydroacoustics.usgs.gov
Internet

23 palabras — < 1 %

15 www.koreascience.or.kr
Internet

22 palabras — < 1 %

16 repositorio.unsch.edu.pe
Internet

21 palabras — < 1 %

17 hal.archives-ouvertes.fr
Internet

19 palabras — < 1 %

18 iberaula.es
Internet

18 palabras — < 1 %

19 José Manuel Vázquez Rodríguez, Deneb Elí Magaña Medina, Norma Aguilar Morales. "El reto de la formación en investigación para el área de ingenierías: un acercamiento a través del programa de Verano Científico / The Challenge of Training in the Area of Engineering Research: an Approach through the Summer Science Program", Revista Internacional de Aprendizaje en Ciencia, Matemáticas y Tecnología, 2014
Crossref

15 palabras — < 1 %

20	vsip.info Internet	12 palabras — < 1 %
21	Claudine Boyer. "Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology", Journal of Geophysical Research, 11/22/2006 Crossref	11 palabras — < 1 %
22	cybertesis.uni.edu.pe Internet	11 palabras — < 1 %
23	fr.slideshare.net Internet	11 palabras — < 1 %
24	repositorio.umsa.bo Internet	11 palabras — < 1 %
25	www.grafiati.com Internet	11 palabras — < 1 %
26	www.slideshare.net Internet	11 palabras — < 1 %
27	bdigital.unal.edu.co Internet	10 palabras — < 1 %
28	digibug.ugr.es Internet	10 palabras — < 1 %
29	doku.pub Internet	10 palabras — < 1 %
30	nanopdf.com Internet	10 palabras — < 1 %

31

Internet

10 palabras — < 1%

32

siar.minam.gob.pe
Internet

10 palabras — < 1%

33

www.cacic2016.unsl.edu.ar
Internet

10 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS

< 10 PALABRAS