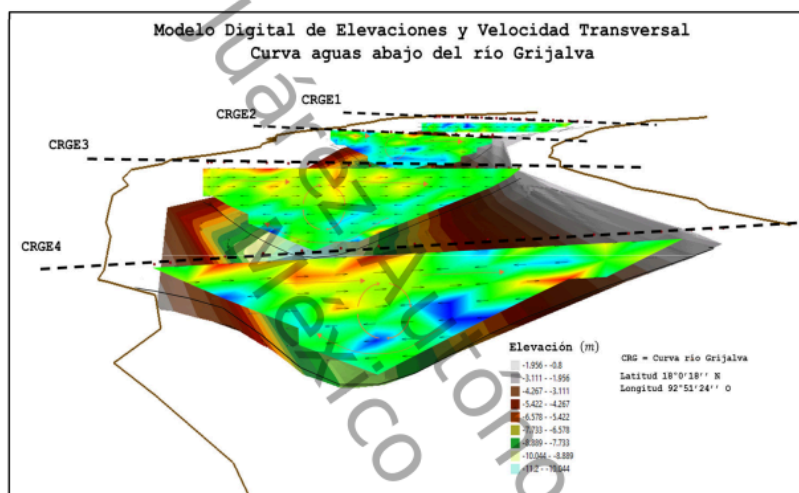


UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

División Académica de Ingeniería y Arquitectura

CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES
SECUNDARIAS EMPLEANDO UN
PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER (ADP)



GASTÓN ALEJANDRO PRIEGO HERNÁNDEZ

Tesis para obtener el grado de Maestro en
Ingeniería Hidráulica

Asesor: Dr. Fabián Rivera Trejo



Agosto de 2013



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**55
ANIVERSARIO
UJAT**



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

"2013, CENTENARIO LUCTUOSO DE FRANCISCO I. MADERO
Y JOSÉ MARÍA PINO SUÁREZ"

OFICIO: DAIA/DIR/1603/13

FECHA: 4 de Julio de 2013

ASUNTO: Autorización de Impresión definitiva.

C. L.FIS. GASTÓN ALEJANDRO PRIEGO HERNÁNDEZ

PASANTE DE LA MAESTRÍA EN
INGENIERÍA HIDRÁULICA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo recepcional para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido asesorado por el DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN RIVERA TREJO Profesor Investigador de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura denominado:

**"CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES SECUNDARIAS EMPLEANDO UN PERFILADOR
ACÚSTICO DOPLER (ADP)"**

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 por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA
DIRECTOR

C.c.p. Archivo.
DR'MHR/M.I. JCRH/apl.

Miembro CUMEX desde 2008

**Consortio de
Universidades
Mexicanas**
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Km.1 Col. La Esmeralda, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México.
• Tel.-(01 914) 33 6 09 40 • Tel. (01 993) 3 58 15 00 Ext.- 6752 • www.daia.ujat.mx • direccion.daia@ujat.mx •



DAIA

MEMORANDUM

DE: COMISIÓN REVISORA
ASUNTO: APROBACIÓN DE TESIS
FECHA: 1º DE JULIO DE 2013
CCP: ARCHIVO
MEM/MIH/007/13

PRESENTE

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo Recepcional denominado:

"CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES SECUNDARIAS EMPLEANDO UN PERFILADOR ACÚSTICO DOPLER (ADP)"

Desarrollado por el C. L.FIS. GASTÓN ALEJANDRO PRIEGO HERNÁNDEZ de la Maestría en Ingeniería Hidráulica bajo la modalidad de "tesis" le comunicamos que aceptamos la impresión de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISION REVISORA

DR. JOSÉ GUADALUPE FABIAN RIVERA TREJO

Revisor

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ

Revisor

DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES

Revisor

DR. JOSÉ MANUEL VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

Revisor

DR. RUBÉN VÁSQUEZ LEÓN

Revisor

Carta de Autorización

Por este medio, tengo a bien conceder mi autorización para que la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado de Maestría en Ingeniería Hidráulica titulada "Caracterización de Corrientes Secundarias Empleando un Perfilador Acústico Doppler (ADP)", del cual soy autor y titular de los derechos de autor.

La universidad Juárez Autónoma de Tabasco podrá hacer uso de la tesis mencionada para propósitos educativos, de difusión y sin fines de lucro; asimismo se autoriza para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID), o a cualquier otra red académica que por conveniencia educativa sea considerada por la Universidad.

Por lo anterior, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco queda liberada de cualquier reclamación legal que se pudiera llegar a ejercer, relativa al uso y manipulación de dicha tesis por los fines ya estipulados en el presente.

Se firma la presente autorización a los 01 días del mes de agosto de 2013, en la ciudad de Cunduacán, Tabasco.

Autoriza

Gastón Alejandro Priego Hernández

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

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Agradecimientos

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

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

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a la División Académica de Ciencias Básicas, por el apoyo otorgado para estudiar la Maestría en Hidráulica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada dentro del proyecto de Ciencias Básicas “¹³ Análisis de las ecuaciones de transporte de sedimentos para la estimación de la carga morfológica del bajo Grijalva” CB-2011-01.

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

Resumen

Esta tesis se realizó con el fin de caracterizar las corrientes secundarias en cauces naturales, utilizando un perfilador acústico Doppler (ADP) marca Sontek M481 de 1500 kHz.

En primer lugar, se presenta una revisión teórica sobre las bases y funcionamiento de equipos Doppler y se describen los procesos de medición y obtención de las velocidades secundarias en confluencias y curvas.

Las mediciones se realizaron en el estado de Tabasco, considerando dos zonas de estudio; una, ubicada en la confluencia de los ríos Mezcalapa y Carrizal y la otra, en una curva aguas abajo de la confluencia en el río Grijalva.

A partir de mediciones obtenidas con el ADP, se describen los análisis que se realizaron para obtener una representación gráfica de las corrientes secundarias. En aquellos se utilizaron los siguientes programas: View ADP, Block de notas, Microsoft Excel y Tecplot 360.

Los resultados obtenidos fueron comparados con las predicciones de modelos teóricos como el propuesto por Rozovskii (1957), obteniéndose una buena concordancia; lo que permitió confirmar que en este tipo de curvas y confluencias sí se generan velocidades secundarias que pueden ser caracterizadas utilizando un equipo ADP.

Estos resultados de campo, son de importancia debido a que ayudaran a entender los fenómenos de erosión de bancos y corrimientos de márgenes, lo que a su vez impacta en el diseño de obras de protección.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	2
1. VELOCIDADES SECUNDARIAS.....	6
1.1 Antecedentes.....	6
1.2 Enfoque de Rozovskii.....	10
1.3 Velocidades secundarias para un confluencia.....	16
2. PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER.....	22
2.1 Antecedentes.....	22
2.2 La física del sonido.....	24
2.3 Efecto Doppler.....	24
2.4 Medición de la velocidad en una embarcación en movimiento.....	29
2.5 Estimación del perfil de velocidad en la superficie del agua.....	34
2.6 Estimación de descarga cerca de la orilla del canal.....	40
2.7 Determinación del gasto total en la sección transversal del río.....	43

3. PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO DOPPLER.....	45
3.1 Configuración del perfilador acústico Doppler.....	45
3.2 Montaje del perfilador acústico.....	46
3.3 Configuración del hardware del perfilador acústico.....	50
3.4 Configuración del software del perfilador acústico.....	54
4. CARACTERIZACIÓN DE LAS CORRIENTES SECUNDARIAS.....	60
4.1 Localización.....	60
4.2 Zona de estudio.....	62
4.3 Metodología de medición.....	62
4.4 Procesamiento de datos.....	64
4.5 Resultados.....	71
CONCLUSIONES.....	88
DISCUSIÓN.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS.....	92
ANEXOS.....	97

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO III:

Tabla 3.1. Se muestran los valores de la frecuencia, así como todos los sensores conectados a la caja electrónica Riverat.....	51
Tabla. 3.2. Frecuencias de operación del RiverSurveyor (Sontek, 2000).....	54

CAPÍTULO IV:

Tabla 4.1a. Resumen de medición que proporciona el software RiverSouvayor para la estación 1 confluencia Grijalva – Carrizal.....	66
Tabla 4.1b. Resumen de medición que proporciona el software RiverSouvayor para la estación 8 del río Carrizal.....	67
Tabla 4.1c. Resumen de medición que proporciona el software RiverSouvayor para la estación 7 del río Mezcalapa.....	68
Tabla 4.2. Componentes en dirección x del vector de velocidad del flujo en diferentes columnas del agua, para la estación de medición 1 de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	70
Tabla 4.3. La primera columna de izquierda a derecha, representa el perfil, mientras que la segunda columna representa las profundidades de las componentes del	

vector velocidad (estación 1, confluencia Grijalva – Carrizal).....	70
---	----

Tabla 4.4. Ejemplo de la posición de medición en coordenadas UTM y su respectiva profundidad.....	71
---	----

Tabla 4.5. La velocidad secundaria se muestra en la columna 13 (v_s) y la velocidad en dirección aguas abajo en la columna 14.....	74
--	----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I:

- Figura 1.1. Velocidad trasversal para una curva de un río (adaptado de: Seo *et al.*, 2008).....8
- Figura 1.2. Distribución vertical de la velocidad transversal (Song *et al.*, 2012).....15
- Figura 1.3. a) Componentes del vector velocidad 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).....19
- Figura 1.4. Ejemplo de la velocidad transversal en tres estaciones medidas el 16 de junio de 2008, en el río Little Wabash, Indiana E.U., utilizando el método de Rozovskii (Riley y Rhoads, 2011).....21

CAPÍTULO 2:

- Figura 2.1. Transmisión de la onda acústica y la reflexión por sedimentos en suspensión (adaptado de Simpson, 2001).....26
- Figura 2.2. Un pulso es emitido por el transductor y reflejado por los sedimentos en suspensión en movimiento (adaptado de Simpson, 1993).....27

Figura 2.3a. Se muestra un Perfilador Acústico Doppler sobre una pequeña embarcación; se ilustra la geometría del haz, el tamaño de la celda y el diámetro de muestreo del perfil en la vertical (Szupiany, 2007).....	28
Figura 2.3b. Componentes vertical (V_V) y horizontal (V_H) del vector velocidad medida en paralelo en la dirección de la trayectoria acústica (adaptado de Muller <i>et al.</i> , 2009).....	29
Figura 2.4. Vector velocidad del agua y el barco en un punto medido por el ADP (adaptado de Simpson, 1993)....	30
Figura 2.5. Recorrido del barco sobre una sección transversal.....	31
Figura 2.6. Medida de la distribución vertical de f , utilizando un perfilador acústico para la medición del gasto en el sistema y los puntos donde se requieren los valores de f (Simpson, 1993).....	35
Figura 2.7. Ejemplo del perfil de velocidad donde se muestran los valores medidos de f , utilizando un perfilador acústico Doppler, el ajuste 1/6 de la curva de potencia y la ubicación de los valores de f estimados (Simpson, 1993).....	39
Figura 2.8. Se muestran las áreas donde los perfiladores acústicos no pueden medir, debido a la frecuencia del perfilador, la forma del fondo y los márgenes del canal (adaptado de Simpson, 1993).....	40
Figura 2.9. Se muestra la forma triangular que se toma para calcular la descarga en las orillas de la sección transversal (adaptado de Simpson, 1993).....	42

CAPÍTULO 3:

Figura 3.1. Sistema RiverSurveyor mini-ADP estándar.....	46
Figura 3.2. Sistema RiverSurveyor mini-ADP en barcos.....	47
Figura 3.3. Sistema RiverSurveyor ADP utilizando un catamarán.....	47
Figura 3.4. Montaje del ADP, la caja electrónica RiverCat y el GPS en el barco.....	48
Figura 3.5. a) Conexión de la caja electrónica RiverCat. b) Generador eléctrico Honda. c) Conexión con batería de automóvil de 12 v e inversor.....	49
Figura 3.6. a) Se muestra el test de medición de los tres haces del ADP b) Test de funcionamiento de los sensores del ADP.....	52
Figura 3.7. Test de la brújula del ADP.....	53
Figura 3.8. a) Calibración de la brújula interna del ADP b) Giro del ADP y rotación sobre su eje del ADP.....	56
Figura 3.9. Esquema de medición de las velocidades con el software RiverSurveyor.....	58

CAPÍTULO 4:

Figura 4.1. Localización y sitio de estudio, de las mediciones de las velocidades secundarias.....	60
Figura 4.2. Se muestran las estaciones de medición en los ríos Mezcalapa y Carrizal, así como en la confluencia Grijalva – Carrizal.....	63

Figura 4.3. Estaciones de medición en una curva escogida aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	64
Figura 4.4. Las celdas validas se muestran en diferentes colores, mientras que las celdas eliminadas se representan en negro (estación 8 Carrizal).....	69
Figura 4.5. Curvas de nivel de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	72
Figura 4.6. Curvas de nivel de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	72
Figura 4.7. a) Archivo de texto con los datos de la sección transversal b) Sección trasversal generada por el software TecPlot 360.....	73
Figura 4.8a Velocidad secundaria en la estación 8 del río Carrizal.....	75
Figura 4.8b. Se muestra la circulación transversal en la estación 8 del río Carrizal.....	76
Figura 4.8c. Perfil de velocidad, estación 8 del río Carrizal.....	76
Figura 4.9a. Velocidades secundarias en margen derecha, estación 7 del río Mezcalapa.....	77
Figura 4.9b Se muestra la circulación secundaria en la margen derecha.....	78
Figura 4.9c. Perfil de velocidad, estación 7 del río Mezcalapa.....	78
Figura 4.10a. Velocidad secundaria estación 1 de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	79
Figura 4.10b. Circulación transversal, estación 1 de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	80

Figura 4.10c. Perfil de velocidad, estación 1 de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	80
Figura 4.11a. Velocidad secundaria, estación 4 de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	81
Figura 4.11b. Circulación secundaria de la estación 4 en la curva aguas debajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	82
Figura 4.11c. Perfil de velocidad de la estación 4 en la curva aguas debajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	82
Figura 4.12. Se muestra la velocidad planta para la confluencia Grijalva – Carrizal.....	83
Figura 4.13. Se muestra la velocidad planta para la curva aguas abajo río Grijalva.....	84
Figura 4.14. Modelo Digital de Elevaciones, generado por las curvas de nivel de la confluencia del río Grijalva – Carrizal.....	85
Figura 4.15. Modelo Digital de elevaciones de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.....	85
Figura 4.16. Representación de las velocidades secundarias sobre el modelo digital de elevaciones, en la confluencia Grijalva – Carrizal.....	86
Figura 4.17. Representación de las velocidades secundarias sobre el modelo digital de elevaciones, en la curva aguas abajo del río Grijalva.....	87

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Introducción

Uno de los problemas de mayor interés en la Mecánica de Fluidos aplicada a los flujos geofísicos, es la representación adecuada del movimiento del agua en cauces naturales (ríos y arroyos). Estos cuerpos de agua se caracterizan por no tener en general, un desarrollo rectilíneo, sino que presentan curvas (también llamados meandros) en su desarrollo.

A medida que el agua se mueve a través de una red de cauces que convergen, aparecen zonas de confluencia hidrodinámica donde el flujo presenta un comportamiento complejo. Ahora bien, en toda curva existe un flujo particular con componentes hacia la orilla debido a la fuerza centrífuga (Vide, 2003). A través de la sección de un río, la velocidad no se distribuye uniformemente (Odgaard, 1982), puesto que en una sección vertical de la curva del río, la velocidad no es uniforme sino logarítmica debido al rozamiento del fondo que se origina al girar sobre un mismo radio, lo cual desarrolla mayor fuerza centrífuga en la superficie, que en el fondo. Por causa de estas fuerzas desiguales, se generan componentes de velocidad en la dirección transversal al flujo, que producen una circulación llamada corriente secundaria. Esta corriente en la transversal, sumada al movimiento longitudinal, provoca un flujo helicoidal que forma o modela la sección en las curvas (Perkins, 1970).

En general, se afirma que no es posible llegar a una adecuada descripción del flujo en curvas o en aguas poco profundas a partir de modelos unidimensionales e incluso, bidimensionales clásicos, como son las ecuaciones de Saint-Venant, debido al carácter esencialmente tridimensional del flujo.

Para la medición de corrientes, tradicionalmente se emplea los molinetes de copas y los molinetes hidrométricos

(Priego *et al*, 2012); sin embargo, estos solo son capaces de medir la magnitud del vector de velocidad en la dirección principal del flujo. En años recientes y con la finalidad de caracterizar experimentalmente el campo de velocidades y la descarga de flujo en los entornos fluviales, se emplean los perfiladores de corriente acústicos Doppler o mejor conocidos como ADCP por sus siglas en inglés.

En este trabajo, se utilizó un perfilador acústico Doppler, para la caracterización de las velocidades transversales; esto se logró aplicando a los datos obtenidos por el perfilador, el método de Rozovskii (1957). Con este fin, se seleccionaron dos sitios de estudio buscando lugares donde estas velocidades transversales estuvieran completamente desarrolladas y fueran de fácil acceso. El primer sitio de estudio, se ubicó sobre la confluencia Grijalva – Carrizal, en la ciudad de Villahermosa, Tabasco; y el segundo, se eligió en una curva aguas abajo de la misma confluencia, sobre el río Grijalva.

En el capítulo I, se hizo un análisis de las ecuaciones que involucran a las velocidades transversales. En el capítulo II, se describe el funcionamiento básico de los perfiladores acústicos Doppler, así como los procedimientos adecuados de medición de las velocidades tridimensionales sobre una sección transversal de un río. En capítulo III, se indica la metodología para realizar la puesta en punto del equipo acústico, la configuración del hardware y el software del equipo de medición. Finalmente, en el capítulo IV, se presentan los resultados de las mediciones realizadas en los sitios de estudio.

Estos resultados aportaran los elementos para sustentar las investigaciones y aplicaciones referentes a protecciones de erosiones marginales y corrimiento de meandros. Será de utilidad para investigadores, Dependencias federales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o la Comisión Federal de

Electricidad (CFE) y empresas particulares dedicadas a la construcción y diseño de obras de protección y estructuras hidráulicas en ríos.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo I. Velocidades secundarias

1.1 Antecedentes

9

Los fluidos desarrollan corrientes secundarias, las cuales ocurren en el plano normal al eje del flujo principal. Estas corrientes aparecen tanto en tramos rectos como en curvas, pero son mucho mayor 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, este caso no se contempla en este trabajo. En los meandros estas corrientes se deben principalmente a la espiralización del flujo y las formas del fondo.

Las corrientes secundarias o transversales son importantes porque (Falcón, 1984): a) son parcialmente responsables de la mayor parte de la topografía del cauce; b) puede interactuar 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 1.1, 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 muestra 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, la fuerza centrífuga es más grande cerca de la superficie del agua y disminuye hacia el fondo. Esta fuerza tiende 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 $\partial p / \partial \vec{r}$, también conocido como el fenómeno de la pendiente transversal en la curva. Si se hace la suposición que la presión se distribuye hidrostáticamente, el gradiente de presión radial es linealmente proporcional a la pendiente local radial de la superficie del agua $\partial H / \partial \vec{r}$. La primera de estas fuerzas indiscutiblemente 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 principalmente por el gradiente vertical del esfuerzo cortante radial $\partial \tau_{zr} / \partial z$, y de la fuerza inercial conectiva $\rho v \partial \vec{u} / \partial s$ (sólo si el flujo secundario no está completamente desarrollado), ambos dependen de cómo se distribuye u . Realmente, la distribución de u evoluciona a lo largo del eje del canal de tal forma que el equilibrio de fuerzas 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, las cuales en ambos casos, conducen a reducir el efecto centrífugo.

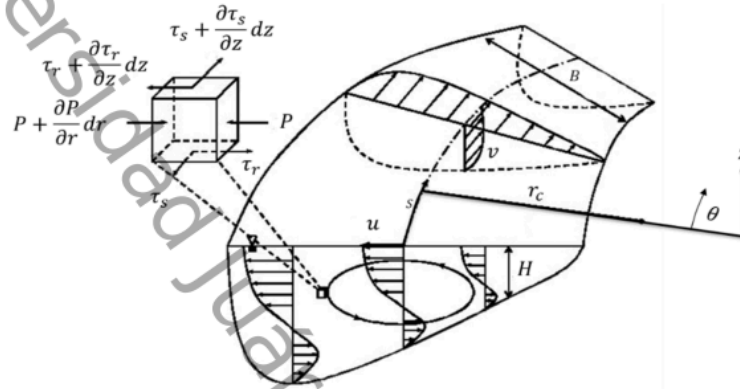


Figura 1.1. Velocidad transversal para una curva de un río (adaptado de: *Seo et al., 2008*)

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 isovelas.

La existencia de un flujo secundario constante ha sido cuestionada por Gotz (1980), donde las oscilaciones de los ejes espirales secundarios indicados por él, sugieren un problema interesante de investigación más amplia.

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 periódicamente reversible, de tal forma que la distribución u en la figura 1.1 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 periódicamente. Además, debido a que el esfuerzo cortante en el fondo, 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 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 principalmente por el término $\rho v \partial \bar{u} / \partial s$, la distribución de u no responde instantáneamente 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 $\rho v \partial \bar{u} / \partial s$, aumenta en relación del término del esfuerzo cortante (por fricción) $\partial \tau_{zr} / \partial z$. De acuerdo a estas consideraciones, se deduce que en corrientes completamente desarrolladas en curvas, la corriente secundaria se dirige radialmente hacia afuera, cercana a las capas superiores de la corriente (véase la figura 1.1), mientras que en corrientes no uniformes, el patrón de la corriente secundaria es variable.

1.2 Enfoque de Rozovskii

La derivación de las ecuaciones de movimiento y continuidad para el análisis del flujo en canales curvos, estuvieron a cargo de Rozovskii (1957). Es importante mencionar que el análisis del flujo de las corrientes secundarias que se presenta en este trabajo es sólo para flujo subcrítico donde la distribución de la presión hidrostática y la profundidad del canal, es generalmente menor que la anchura y el radio de curvatura. Al derivar la ecuación de movimiento, y utilizando un elemento diferencial de fluido en el sistema de coordenadas polar como se muestra en la figura 1.1. La segunda ley de Newton se puede escribir como:

$$d\vec{F} = dm \frac{D\vec{v}}{Dt} \quad (1.1)$$

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

El lado derecho de la ecuación (1.1) es la derivada sustancial. Por lo tanto, las ecuaciones de movimiento para la dirección longitudinal s y en la dirección transversal r cuyo componente en coordenadas cilíndricas polares son (Seo *et al.*, 2008):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} + u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{vu}{r} + gS + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_s}{\partial z} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial s} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{v^2}{r} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (1.3)$$

Donde ρ es la densidad del agua, r es el radio de curvatura, S es la pendiente longitudinal, S_r es la pendiente transversal, τ_s es el esfuerzo cortante longitudinal y τ_r es el esfuerzo cortante transversal.

La inclinación transversal de la superficie libre del agua en una curva de canal se puede obtener con el balance de fuerzas radiales con la profundidad del agua H . 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:

$$\int_0^D \frac{v^2}{r} \rho ds dr dz - \rho g S_r ds dr dz = 0 \quad (1.4)$$

$$S_r = \frac{\int_0^D v^2 dz}{gr} = \frac{C_r}{gr} \bar{v}^2 \quad (1.5)$$

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 (1.1) y ecuación (1.2) 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 expresan en término de la dirección transversal como:

$$v \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{v^2}{r} - g S_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (1.6)$$

El método de desarrollo para el flujo secundario se describe por cada término de la ecuación (1.6); 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 de 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 (1.6), alcancen el equilibrio de la fuerza (la suma de fuerza es igual a cero). En este caso, la magnitud del flujo secundario es máxima, y Rozovskii definió este fenómeno como un flujo completamente desarrollado por medio de la siguiente ecuación (ec. 1.7).

$$\frac{v^2}{r} - gS_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} = 0 \quad (1.7)$$

Rozovskii adoptó la siguiente distribución logarítmica de la velocidad longitudinal

$$\frac{v}{\bar{v}} = 1 + \frac{g^{\frac{1}{2}}}{\kappa C} (1 + \ln \eta) \quad (1.8)$$

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:

$$\tau_r = \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.9)$$

Donde ε es la viscosidad turbulenta. Sustituyendo la ecuación (1.8) y (1.9) en la ecuación (1.7), Rozovskii determinó la fórmula de velocidad transversal completamente desarrollada para los casos de fondo suaves como:

$$u_f = \bar{v} \frac{1}{\kappa^2} \frac{H}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{g^{\frac{1}{2}}}{\kappa C} F_2(\eta) \right] \quad (1.10)$$

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:

$$F_1(\eta) = \int \frac{2\ln(\eta)}{\eta - 1} d\eta, \quad F_2(\eta) = \int \frac{\ln^2(\eta)}{\eta - 1} d\eta \quad (1.11)$$

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 y decaimiento basado en la ecuación de movimiento. La fórmula toma la forma siguiente:

$$u = u_f \left[1 - \exp\left(-\frac{2\kappa\sqrt{g}}{C} \frac{s'}{H}\right) \right] \quad \text{término de crecimiento} \quad (1.12)$$

$$u = u_f \left[\exp\left(-\frac{2\kappa\sqrt{g}}{C} \frac{s''}{H}\right) \right] \quad \text{término de decaimiento} \quad (1.13)$$

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.

Ante este hecho, Kikkawa *et al.* (1976), empleó el promedio de la viscosidad turbulenta a lo largo de la profundidad

con la finalidad de obtener la distribución vertical de la velocidad transversal, lo que podría integrarse fácilmente con la velocidad promedio longitudinal $\bar{U}_1$ en la sección transversal.

$$u = \frac{1}{\kappa} \frac{h}{r_c} \frac{U_1^2}{\bar{U}_1} \left[F_A - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \frac{U_1}{\bar{U}_1} F_B \right] \quad (1.14)$$

$$F_A = -15 \left(\eta^2 \ln \eta - \frac{1}{2} \eta^2 + \frac{15}{54} \right) \quad (1.15)$$

$$F_B = \frac{15}{2} \left(\eta^2 \ln^2 \eta - \eta^2 \ln \eta + \frac{1}{2} \eta^2 - \frac{19}{54} \right) \quad (1.16)$$

Rozovskii (1957) y Kikkawa *et al.* (1976) indicaron que, la magnitud del flujo secundario estaba directamente relacionada con la relación de la profundidad del agua para el radio de curvatura, y los perfiles verticales de velocidad transversal los cuales varían significativamente con la resistencia del fondo.

En la figura 1.2 se muestran los perfiles de la velocidad transversal que se obtuvieron teóricamente y su comparación contra los resultados experimentales obtenidos por Rozovskii (1957) y Guymer (1998).

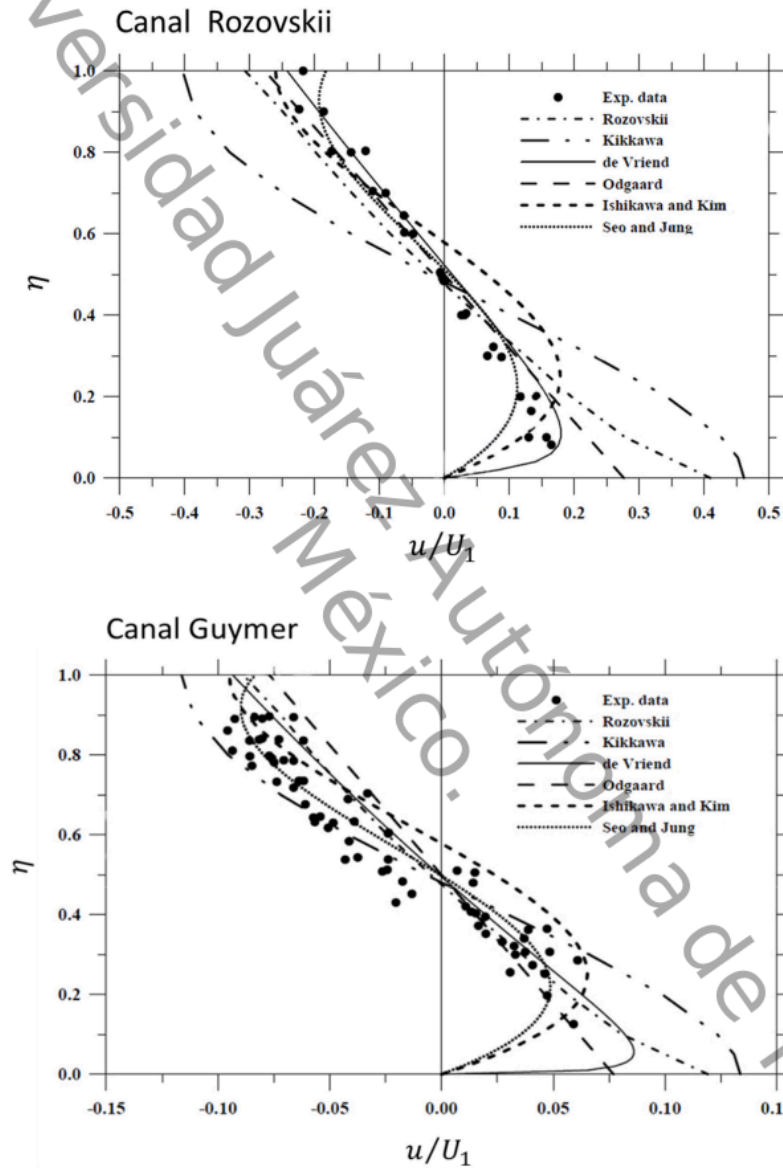


Figura 1.2. Distribución vertical de la velocidad transversal (Song *et al.*, 2012).

1.3 Velocidades secundarias para una confluencia

Las corrientes que se originan en las confluencias se caracterizan por condiciones hidrodinámicas complejas asociadas con la convergencia de flujos por separados. Aunque el conocimiento de estas condiciones es esencial para el desarrollo de una teoría general de la dinámica en una confluencia, en la actualidad, existen pocos datos de campo disponibles para evaluar los conceptos generales (e.g. Best, 1987; Bridge, 1993) o modelos matemáticos (e.g. Weerakoon *et al.*, 1991) de flujos a través de las confluencias. Algunos modelos conceptuales, basado preliminarmente en los resultados de investigación experimental (Lane *et al.*, 1998; Roberts, 2004; Song *et al.*, 2012), indicaron que las características hidrodinámicas de las confluencias incluyen una zona de estancamiento de flujo aguas arriba en la llegada a la confluencia, lo que genera una capa de cizalladura (cambio brusco en la dirección del campo de velocidades) entre la unión de los dos flujos. La superficie de ésta convergencia genera una celda helicoidal a cada lado de la capa de cizalladura, y la separación de flujo de estas celdas se da inmediatamente aguas abajo de la confluencia (Mosley, 1976; Best, 1987). Trabajos experimentales (Best, 1987; Song *et al.*, 2012), han demostrado también que la ubicación, el tamaño y las características hidrodinámicas están en función del ángulo y el flujo de momento de los flujos combinados. Solo unas pocas investigaciones de campo han examinado los patrones de flujo en confluencias y los resultados no han sido completamente consistentes (Bruce *et al.*, 1993; Lane *et al.*, 2000). Recientemente, ha

ha sido confirmada por mediciones de campo del flujo de las velocidades transversales aguas abajo en los ríos trenzados, la existencia de una superficie convergente doble en una celda helicoidal simétrica (en forma de Y) en confluencias (Ashmore *et al.*, 1992; Bridge y Gabel, 1992). Otras investigaciones de campo (Roy y Bergeron, 1990; Bridge y Gabel, 1992), han demostrado que las orientaciones de los vectores de velocidad promedio en las confluencias, generan un cambio en la etapa de flujo, lo que sugiere que el efecto de la morfología en el cauce del río aguas abajo y las velocidades de flujo transversal, varían con los cambios en las condiciones hidrodinámica. En cuanto al trabajo en ríos meándricos, se ha demostrado que la variación espacial en la morfología del cauce puede influir fuertemente en los campos de velocidad descendente y de la corriente transversal, que a su vez determinan los patrones asociados del esfuerzo cortante y del transporte de sedimentos (Dietrich y Smith, 1983,1984).

Para investigar la representación de la circulación secundaria en confluencias fluviales, en este trabajo se adoptó los resultados de Rozovskii (1957), y los resultados de Bathurst *et al.* (1977), quien utilizó medidores de flujo electromagnéticos para determinar las componentes transversales y longitudinales del vector velocidad del flujo.

Bruce *et al.* (1993) propuso identificar las contribuciones por separado de flujo desigual, y el movimiento helicoidal para el campo de velocidades de las corrientes transversales. Con esto se busca determinar cómo estas contribuciones por separado varían con el cambio de las condiciones hidrodinámica. Como primera aproximación se pueden calcular las velocidades primarias y secundarias y luego determinar las componentes de las corrientes transversales de estas velocidades. Las velocidades primarias (V_p) y secundarias (V_s), como definió Bathurst *et al.*

(1977) son componentes de la velocidad resultante V_r a una profundidad en la columna de flujo, que está orientada paralela y ortogonalmente (figura 1.3a) respectivamente en la profundidad promedio del vector velocidad en esa vertical. Estas velocidades se calculan como:

$$v_p = v_r \cos(\varphi - \emptyset) \quad (1.17)$$

$$v_s = v_r \sin(\varphi - \emptyset) \quad (1.18)$$

Donde $v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $\varphi = \tan^{-1}(v_x/v_y)$, $\emptyset = \tan^{-1}(V_x/V_y)$, V_y es la velocidad transversal del flujo promediada en la profundidad de la vertical, y V_x es la velocidad promedio en la dirección aguas abajo. 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, considerando que los valores individuales de v_p para cada vertical, definen la intensidad del flujo desigual en lugares particulares de la columna de agua.

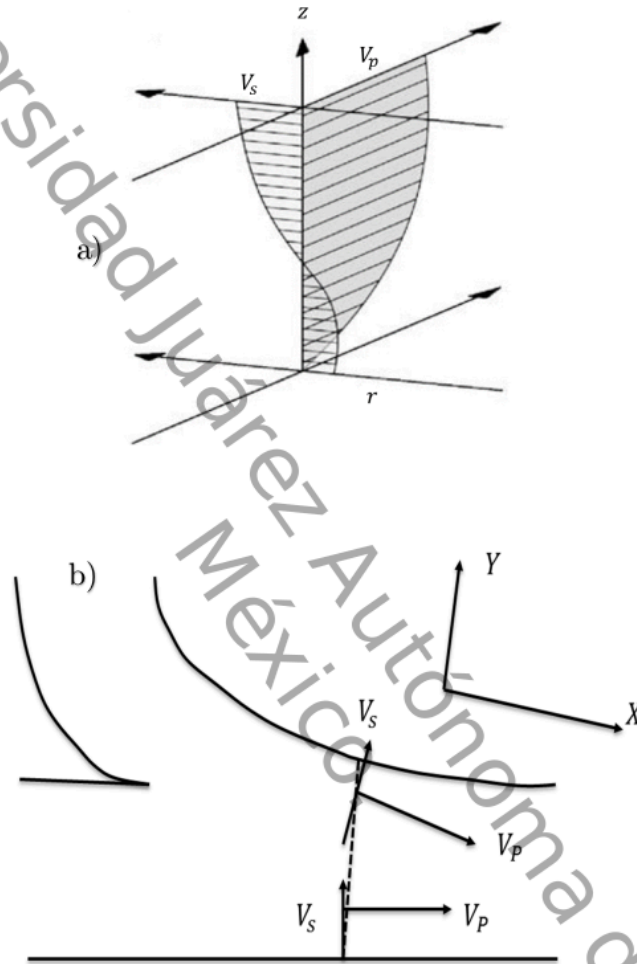


Figura 1.3. a) Componentes del vector velocidad en una columna de agua (adaptación de Winterwerp *et al.*, 2006). b) Velocidad secundaria perpendicular a la velocidad primaria que va en dirección aguas abajo (adaptado de Lane *et al.*, 2000).

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

$$v_{py} = v_p \sin \phi \quad (1.19)$$

$$v_{sy} = v_s \cos \phi \quad (1.20)$$

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 puede utilizar también, para determinar cómo varían los tipos de movimiento de los fluidos que contribuyen a los cambios del campo de velocidad de las líneas de corrientes transversales, así como, las condiciones hidrodinámicas en el cambio de la confluencia del río.

En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de las corrientes secundarias medidas en el río Little Wabash, Indiana E.U., utilizando el software Velocity Mapping Toolbox (VMT), que está basado en el método de Rozovskii.

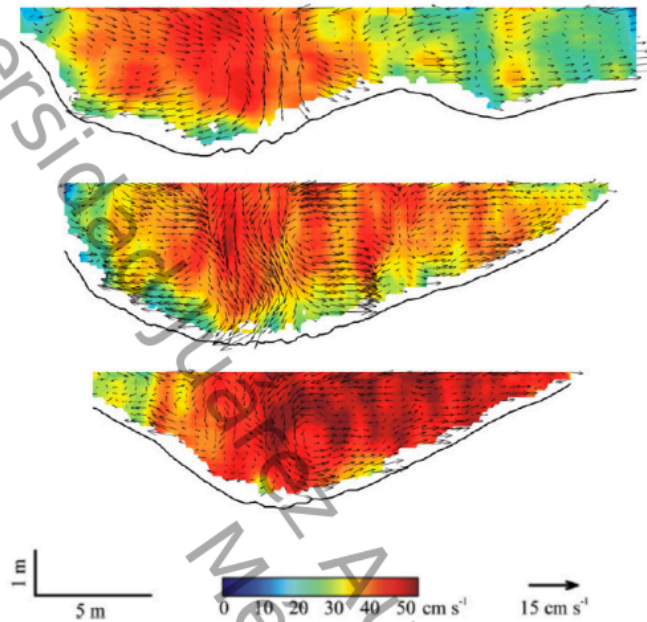


Figura 1.4. Ejemplo de la velocidad transversal en tres estaciones medidas el 16 de junio de 2008, en el río Little Wabash, Indiana E.U., utilizando el método de Rozovskii (Riley y Rhoads, 2011).

En el siguiente capítulo se describen los principios básicos de operación de los perfiladores Doppler, que hacen posible a partir de mediciones de campo y la aplicación del método de Rozovskii, obtener las velocidades secundarias en flujos subcríticos.

Capítulo II. Perfiladores acústicos Doppler

2.1 Antecedentes

Muchos de los equipos utilizados para la medición de velocidades tridimensionales, se basan en tecnología acústica, y se han vuelto cada vez más populares en la comunidad científica y empresarial por la eficiencia y rápida configuración para las mediciones del flujo y velocidades.

Inicialmente su desarrollo fue para estudiar el flujo en el océano y las zonas costeras. A partir de 1992, cuando la frecuencia del Perfilado Acústico Doppler o ADP por sus siglas en inglés se amplió, su popularidad ha ido en aumento, siendo utilizado cada vez más para realizar mediciones en aguas poco profundas, como son los ríos (Muste *et al.*, 2003).

Durante diez años, las técnicas hidro-acústicas han permitido desarrollar dispositivos cada vez más rápidos y precisos para la medición de los parámetros físicos del medio acuático. Sin embargo, existe un mayor interés por ampliar las capacidades de medición del ADP más allá de las mediciones de la descarga (Muste *et al.*, 2003). Por ejemplo, se desean conseguir mediciones de las velocidades promedio y los parámetros de turbulencia en los ríos naturales, las cuales sirven para investigaciones donde la turbulencia juega un papel importante, como son: el transporte de sedimentos, la erosión y la disipación de

energía. También tienen un gran auge para validar datos obtenidos a partir de simulación numérica.

La mayoría de las mediciones que se realizan por medio de ADP en ríos, se llevan a cabo en embarcaciones en movimiento. Donde el dispositivo se remolca de orilla a orilla para obtener los gastos sobre una sección transversal, y fueron originados por investigadores como Barua y Rahman (1998), González-Castro *et al.* (2002), Schemper y Admiraal (2002).

Al realizar un análisis más profundo sobre estas mediciones realizadas sobre embarcaciones, éste indicó que los resultados obtenidos por los ADP en relación con otros instrumentos de medición no eran muy confiables (Muste *et al.*, 2003). Finalmente, luego de realizar una serie de métodos y procedimientos de medición y un análisis más riguroso de los datos, se llegó a obtener procedimientos estándar de medición, los cuales proporcionan datos fiables y campañas de medición de campo más consistentes.

En este capítulo se hace una descripción y un análisis de algunas propiedades físicas del sonido y su propagación a través de los líquidos; además, se mencionan los principios básicos de medición de la velocidad con ADP y algunos problemas asociados con el uso de estos instrumentos. Es importante mencionar que la mayor parte de la información se basó en el manual de Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler (Simpson, 1993), que publicó la United States Geological Survey y el manual de RiverSurveyor publicado por la empresa Sontek (Sontek, 2007).

2.2 La física del sonido

Lo que comúnmente se percibe como sonido, es una vibración de los tímpanos debido a la llegada de las ondas de presión. El tímpano transfiere la información de la onda de presión a las partes interna del oído, donde convierte las ondas de presión de energía mecánica a una señal eléctrica. El cerebro interpreta esta señal eléctrica como sonido.

Las ondas sonoras viajan a través de cualquier medio material con una rapidez que depende de las propiedades físicas del medio. Cuando viajan en el medio, las partículas vibran para producir cambios de densidad y presión a lo largo de la dirección de movimiento de la onda. Estos cambios originan una serie de regiones de alta y baja presión llamadas condensaciones y rarefacciones (disminución de la densidad), respectivamente. Los tonos (frecuencia) de las ondas sonoras aumentan a medida que la longitud de onda (la distancia entre los picos de la onda) se hace más corta. Esta frecuencia o tono, por lo general se expresa en hertz (Hz). Un Hertz es igual a una onda (ciclo) por segundo. El oído humano puede oír frecuencias de aproximadamente 40 Hz a aproximadamente 24 kilohercios (kHz) (24,000 Hz). Estas frecuencias se les conocen como audibles. Las Frecuencias de sonido por debajo de aproximadamente 40 Hz se denominan "subsónico" y las frecuencias de sonido por encima 25,000 Hz, se denominan "ultrasónico" (Simpson, 1993).

2.3 Efecto Doppler

El ADP utiliza el sonido para medir las velocidades de las partículas suspendidas en el agua. El sonido que transmite el ADP es ultrasónico y está por encima del rango que puede

percibir el oído humano. El principio físico para medir estas velocidades fue descubierto por Johann Doppler en 1842. Doppler determinó que las ondas de sonido tendrían una frecuencia más alta si la fuente del sonido se movía en dirección al receptor y una frecuencia más baja, si la fuente del sonido se alejaba del receptor.

En el caso particular de funcionamiento de los ADP., una onda de sonido se emite por el aparato a través de una columna de agua y ésta se refleja en las partículas en suspensión hasta llegar al fondo del cauce. Este cambio de frecuencia se mide por el ADP permitiendo obtener las velocidades de los sedimentos en suspensión.

La frecuencia reflejada se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{F_D}{V_{SO}} = \frac{2F_S}{C} \quad (2.1)$$

Donde

F_D = cambio de frecuencia (Hz)

F_S = frecuencia transmitida por el ADP (Hz)

V_{SO} = velocidad respecto a las partículas (m/s)

C = velocidad del sonido (m/s)

Un diagrama esquemático de un pulso acústico transmitido (ping) y la resultante de energía reflejada acústica, se muestran en la figura 2.1. Se debe tener en cuenta que muy poca energía acústica se refleja de vuelta (backscattered) hacia el transductor de la figura 2.1; la mayor parte de la energía acústica se absorbe o refleja en otras direcciones.

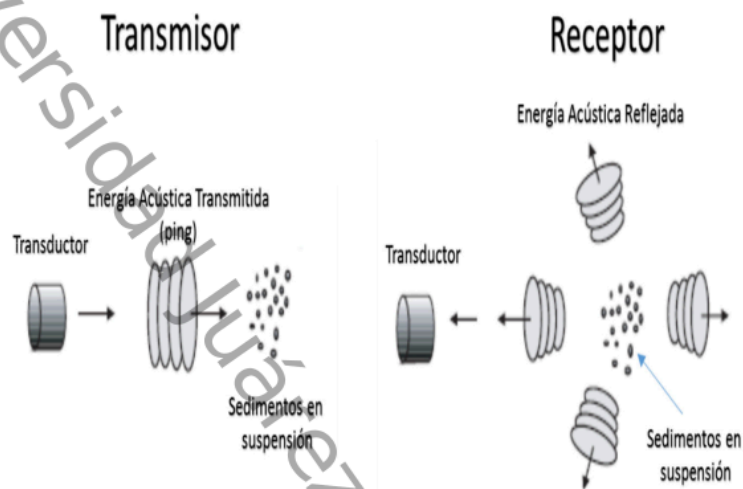


Figura 2.1. Transmisión de la onda acústica y la reflexión por sedimentos en suspensión (adaptado de Simpson, 2001).

El efecto Doppler es direccional y sólo puede medir la velocidad de movimiento paralelo a la trayectoria acústica (figura 2.2), y la distancia entre el transductor y la partícula se mantendrá constante. Además, sólo la componente de la velocidad a lo largo del haz acústico se mide. Por lo tanto, para medir el perfil de velocidad tridimensional se requiere un mínimo de tres haces acústicos que apunten en dirección radial.

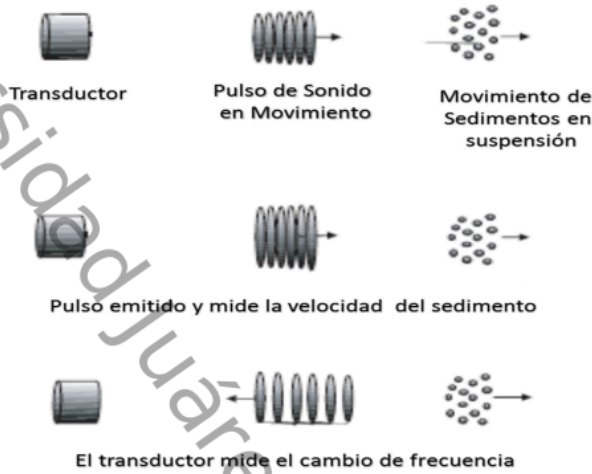


Figura 2.2. Un pulso es emitido por el transductor y reflejado por los sedimentos en suspensión en movimiento (adaptado de Simpson, 1993).

Los ADP tienen tres al menos transductores monoestáticos; los haces divergen a 25° con respecto a la vertical y están espaciados uno con el otro en un ángulo de 120° (figura 2.3a). Los tres haces proporcionan tres vectores de velocidad y normalmente se distribuyen por igual por un ángulo de separación θ conocido para la vertical (figura 2.3b), donde sus componentes en coordenadas ortogonales para un sistema de tres haces son:

$$V_y = \frac{(2B_1 - B_2 - B_3)}{3 \sin \theta} \quad (2.2)$$

$$V_x = \frac{B_3 - B_2}{\sqrt{3} \sin \theta} \quad (2.3)$$

$$V_z = \frac{B_1 + B_2 + B_3}{3 \cos \theta} \quad (2.4)$$

Donde

V_y = Velocidad de líneas de corrientes en dirección aguas abajo

V_x = Velocidad en la sección transversal

V_z = Velocidad en la vertical

B_1 = Velocidad radial medida por el haz 1

B_2 = Velocidad radial medida por el haz 2

B_3 = Velocidad radial medida por el haz 3

θ = Ángulo de inclinación del haz con respecto a la vertical

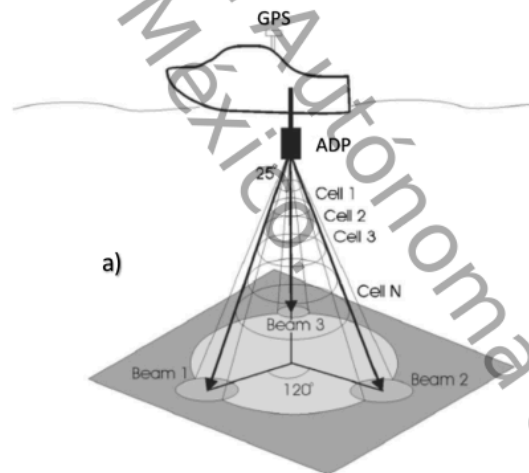


Figura 2.3a. Se muestra un Perfilador Acústico Doppler sobre una pequeña embarcación; se ilustra la geometría del haz, el tamaño de la celda y el diámetro de muestreo del perfil en la vertical (Szupiany, 2007).

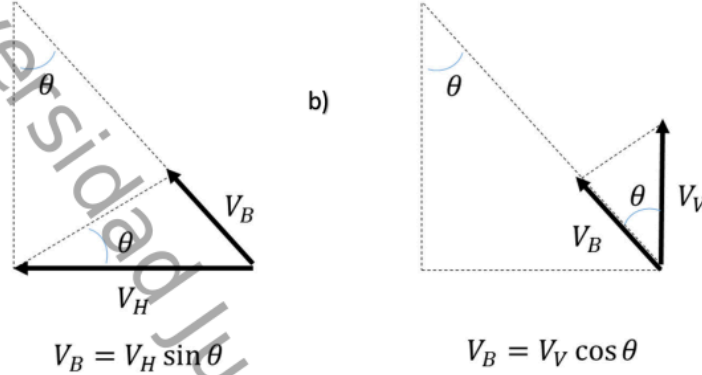


Figura 2.3b. Componentes vertical (V_V) y horizontal (V_H) del vector velocidad medida en paralelo en la dirección de la trayectoria acústica (adaptado de Muller *et al.*, 2009).

2.4 Medición de la velocidad en una embarcación en movimiento

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

$$Q_t = \int_s \vec{V}_f \cdot \hat{n} ds \quad (2.5)$$

Donde

Q_t = descarga total del río, en m^3/s

$\vec{V}_f$ = vector de velocidad del agua, en m/s

$\hat{n}$ = vector unitario perpendicular a ds

ds = elemento diferencial de área, en m^2

Lo anterior es sólo una forma de la conocida ecuación de continuidad $\vec{Q} = A\vec{V}$ sobre una sección transversal. Para medir

el gasto en una embarcación en movimiento utilizando el ADP, el área s se define por la superficie vertical debajo de la trayectoria a lo largo de la cual el barco se desplaza. El producto escalar de $\vec{V}_f \cdot \hat{n}$ será igual a cero cuando la embarcación se está moviendo directamente aguas arriba o aguas abajo, y será igual a $\vec{V}_f$ cuando la embarcación se está moviendo en la dirección del vector normal $\hat{n}$; ambos vectores están en el plano horizontal (figura 2.4).

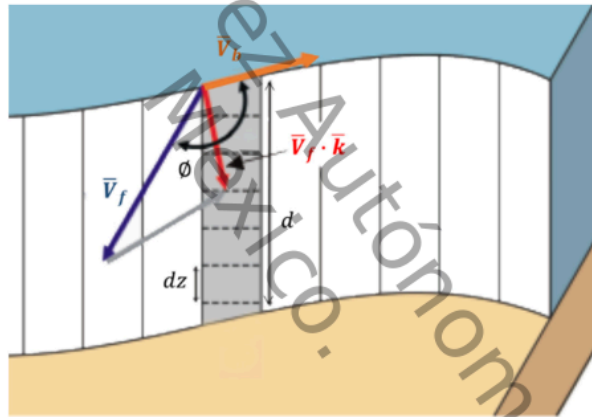


Figura 2.4. Vector velocidad del agua y el barco en un punto medido por el ADP (Adaptado de Simpson, 1993).

Debido a que el ADP 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 geoposicionamiento geográfico (GPS), por lo que se debe reformular la ecuación (2.5) de la siguiente forma (Christensen y Herrick, 1982):

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d [(\vec{V}_f \times \vec{V}_b) \cdot \hat{k}] dz dt \quad (2.6)$$

Donde

T = tiempo de recorrido sobre la sección transversal, en s

d = profundidad total, en m

$\vec{V}_b$ = vector velocidad medida en el barco, en m/s

$\hat{k}$ = 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 (2.6) 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 2.5).

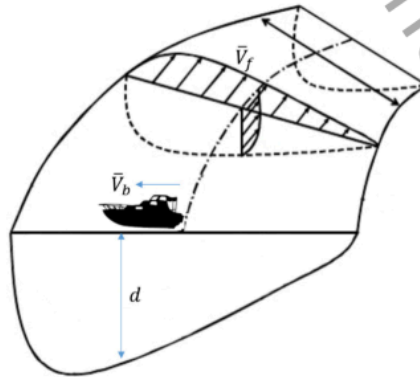


Figura 2.5. Recorrido del barco sobre una sección transversal.

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

$$(\vec{V}_f \times \vec{V}_b) \cdot \hat{k} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad (2.7)$$

Donde

a_1 = componente transversal del vector de velocidad media del agua, en m/s

a_2 = componente del vector velocidad media de agua en dirección aguas abajo, en m/s

b_1 = componente transversal del vector velocidad media del barco, en m/s

b_2 = componente del vector velocidad media del barco en dirección aguas abajo, en m/s

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

$$f = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad (2.8)$$

Donde

f = es el producto vectorial de los vectores de velocidad de agua y la velocidad de barco.

El ADP 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 (2.6) toma la forma:

$$Q_m = \sum_{i=1}^{N_s} \left[\int_0^{d_i} f_i dz \right] t_i \quad (2.9)$$

Donde

Q_m = gasto medido sobre el canal (no incluye el gasto medido en la orilla), en m^3/s

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 la subsecciones, en s

2.5 Estimación del perfil de velocidad en la superficie del agua

Como se muestra en la figura 2.6, los valores de f no se proporcionan en o cerca de la superficie del agua, sino por debajo de un punto igual a 75 a 85 por ciento de la profundidad total de la columna de agua; esto se debe a que no hay datos disponibles en esta área, ya que los transductores y circuitos electrónicos necesitan tiempo para enviar y luego recibir la señal reflejada. Estos valores desconocidos se etiquetan como f_1 en la superficie del agua y f_n en la parte inferior (figura 2.6). El método más simple para estimar estos valores de f es simplemente dejar que f_1 (f en la superficie) igual f_2 y f_n dejarlo (f en la parte inferior) igual f_{n-1} y aproximar la integral en la ecuación (2.9) utilizando el cálculo trapezoidal.

$$g_i = \sum_{j=1}^{n-1} \left[\left(\frac{f_j + f_{j+1}}{2} \right) (z_{j+1} - z_j) \right] \quad (2.10)$$

Donde

g_i = profundidad media ponderada del valor de medición

f en la subsección i

$z_1, \dots, z_j$ = profundidad desde la superficie de agua de los respectivos valores medidos y estimados de f

Uno de los mayores inconvenientes de este método es que no cumple adecuadamente con descripciones aceptadas de la

distribución hidrodinámica en la vertical de las velocidades horizontales del agua en los ríos, particularmente cerca del límite inferior, donde la velocidad desciende a cero.

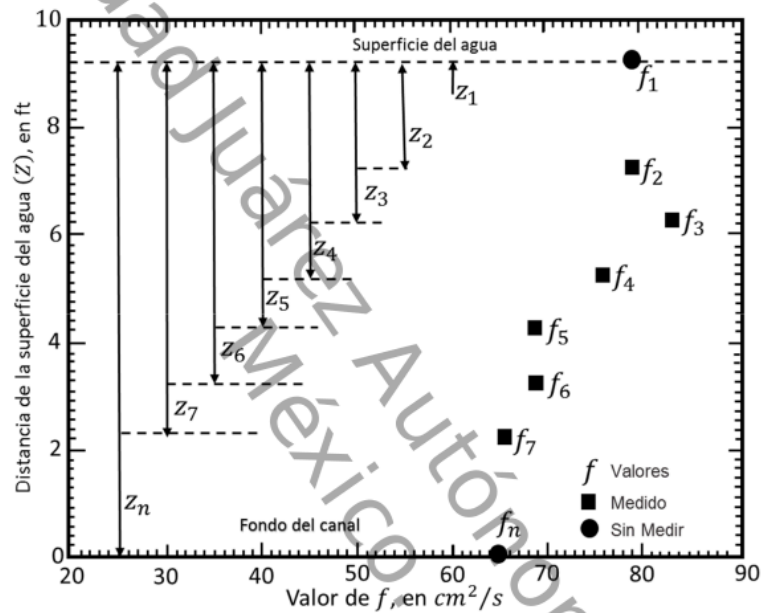


Figura 2.6. Medida de la distribución vertical de f , utilizando un perfilador acústico para la medición del gasto en el sistema y los puntos donde se requieren los valores de f (Simpson, 1993).

La distribución de velocidad en ríos para flujo turbulento completamente desarrollado, ha sido ampliamente estudiada y presentada en la literatura. Existen dos leyes de la distribución de velocidad que son usadas frecuentemente para ríos; La primera se refiere a la ley de distribución velocidad logarítmica, comúnmente conocido como fórmula de distribución de

velocidad Prandtl-von Kármán; y la segunda es la ley de distribución de potencia de velocidad, que se ha utilizado en diversas formas por investigadores (Simpson y Oltmann, 1993).

Inicialmente, ambas leyes se utilizan junto con el ajuste de curvas por mínimos cuadrados, procedimiento necesario para estimar los valores medios de f . Los valores de f medidos por el ADP son funciones logarítmicas, y los valores medios de f se calculan mediante la integración de las curvas generadas. En sus inicios, los resultados eran desalentadores, debido a la variabilidad de los datos pocos realistas generados por la distribución de la velocidad de las curvas, encontrándose que este error se debía principalmente a la ausencia de datos en la parte inferior de la columna de agua.

Un método que permitió resolver estos errores, fue el que propuso Chent (1989): él demostró que la ley de potencias es equivalente a la fórmula de Manning para canales abiertos y se expresa de la forma siguiente:

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/6} \quad (2.11)$$

Donde

z = profundidad, en m

u = velocidad a una distancia z del fondo, en m/s

u^* = velocidad de corte, en m/s

z_0 = rugosidad

La ecuación anterior se puede reescribir como:

$$u = a' z^{\frac{1}{6}} \quad (2.12)$$

$$\text{Siendo } a' = \left[\begin{array}{c} 9.5(u^*) \\ \frac{1}{z_0^6} \end{array} \right]$$

Resolviendo la ecuación (2.12) utilizando los valores medidos por el ADP evaluados en u y z , se determinó un valor para a' . Sin embargo, como se describió anteriormente, los valores de u no se utilizan para calcular directamente la descarga en los ADP. Los valores de f utilizados para calcular la descarga fueron calculados por el producto cruz a partir de los valores de u y la velocidad de la embarcación. Debido a que la velocidad del navío permanece constante para cada subsección, los valores de f se pueden describir como:

$$f = \Phi(u) \quad (2.13)$$

Donde Φ es una función vectorial constante aplicada a cada valor de u que se mide en el perfil. De las ecuaciones (2.12) y (2.13) se observa que, aunque la magnitud de los valores f en un perfil individual, será diferente a la magnitud de los valores de u , las formas de sus respectivas curvas de distribución vertical son idénticas. Debido a que se está interesado en la estimación de los valores medidos de f , basados en una extrapolación hidrodinámicamente aceptable de la curva de distribución vertical, formada por los valores medidos de f , y no en los valores absolutos de las mediciones de la velocidades del agua, la ecuación (2.12) se puede reformular como

$$f = a'' z_0^{\frac{1}{6}} \quad (2.14)$$

Donde a'' es un coeficiente que se calcula a partir de los valores de f en lugar de u .

Para calcular a'' , se realizó un ajuste de curva de mínimos cuadrados utilizando los valores medidos de f y z :

$$a'' = \frac{\sum_{j=1}^n \left[f_j z_j^{\frac{1}{6}} \right]}{\sum_{j=1}^n \left[z_j^{\frac{1}{6}} \right]^2} \quad (2.15)$$

Donde

n = número total de f y z determinados.

Una vez que se determina a'' para un perfil individual, la ecuación (2.14) se utiliza para estimar los valores de f que no pueden ser recogidos por el ADP. En la práctica, se da una estimación de los valores de f en la superficie del agua y en un 90 a 98 por ciento de la profundidad total (figura 7).

Esta estimación, es sólo una aproximación y emula una distribución como la de Manning de las velocidades horizontales en la vertical. Potencias altas como $1/2$ y bajas como $1/10$, se pueden utilizar para ajustar la curva que emula los perfiles medidos en un entorno de estuarios o en áreas que tienen formas de fondo que producen distribuciones de velocidades "no estándar" en las verticales de la sección.

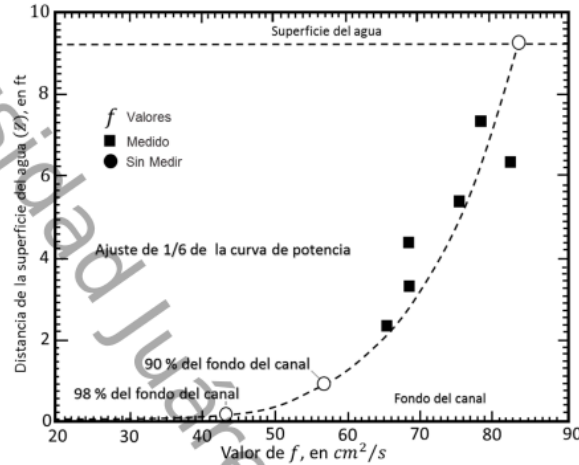


Figura 2.7. Ejemplo del perfil de velocidad donde se muestran los valores medidos de f , utilizando un perfilador acústico Doppler, el ajuste 1/6 de la curva de potencia y la ubicación de los valores de f estimados (Simpson, 1993).

La curva discontinua de la figura 2.7 es un ajuste de 1/6 de la curva de potencia de los datos del ADP usando la ecuación (2.14), y los círculos son los valores de f estimada utilizando la ecuación (2.14). Los tres valores estimados de f se incluyen con los valores medidos sobre toda la profundidad utilizando la ecuación (2.10) para obtener un valor de g_i .

La suma de descarga en la ecuación (2.9) se lleva a cabo utilizando la siguiente relación:

$$q_i = g_i t_i \quad (2.16)$$

Donde

q_i = sección promedio de descarga entre la subsección i y la subsección $i - 1$

g_i = profundidad media de las mediciones de los valores de f en la subsección i

t_i = medición del tiempo de recorrido del barco entre la subsección i y $i - 1$

La descarga total q_m sobre el canal, es la suma de todos los q_i calculados con la ecuación 2.16, y no incluye las estimaciones de la descarga cercanas a la orilla del canal.

2.6 Estimación de descarga cerca de la orilla del canal

A causa de las limitaciones de medición de la descarga utilizando el ADP (figura 2.5), descrita anteriormente, se requiere un algoritmo para la estimación de la descarga en las regiones poco profundas que no se pueden medir, por ejemplo las orillas.



Figura 2.8. Se muestran las áreas donde los perfiladores acústicos no pueden medir, debido a la frecuencia del perfilador, la forma del fondo y los márgenes del canal (adaptado de Simpson, 1993).

Las áreas cerca de la orilla del río se estiman utilizando un método de interpolación presentado por Fulford y Sauer (1986). Para estimar la velocidad desconocida en la orilla del río donde el ADP no puede medir, relacionan la primera o última velocidad media y la profundidad conocida de la sección transversal. La ecuación es:

$$\frac{V_e}{\sqrt{d_e}} = \frac{V_m}{\sqrt{d_m}} \quad (2.17)$$

Donde

e = ubicación entre la orilla del río y la primera o última medición de la subsección.

V_e = velocidad promedio estimada en la ubicación e

V_m = velocidad promedio en la primera o última medición de la subsección

d_e = profundidad en el punto e

d_m = profundidad en la primera o última medición de la subsección

Con este método, la descarga puede ser estimada suponiendo que la zona no medible de descarga tiene la forma triangular entre la subsección m y la orilla del río (figura 2.8), lo que reduce a la ecuación 2.17 en:

$$V_e = 0.707 V_m \quad (2.18)$$

Por lo tanto, de la ecuación de continuidad se determina la descarga para la orilla del río como:

$$Q_e = \frac{0.707 V_m L d_m}{2} \quad (2.19)$$

Donde

Q_m = descarga estimada en la orilla del río

L = distancia de la orilla del río a la primera o última medición de la subsección

La profundidad (d_m) para la subsecciones se obtiene utilizando el sensor de profundidad del ADP. La distancia (L) de la orilla del río a la primera o la última descarga de medición de la subsección es proporcionado por el operador (figura 2.9).

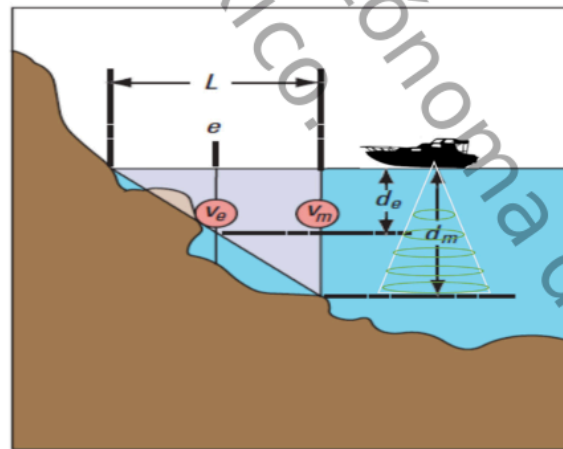


Figura 2.9. Se muestra la forma triangular que se toma para calcular la descarga en las orillas de la sección transversal (adaptado de Simpson, 1993).

El método de interpolación triangular funciona bien en canales naturales que tienen formas parabólicas; sin embargo, no así en canales rectangulares de hormigón o canales naturales con pendientes no convencionales cercanos a la orilla. En estos casos, se puede utilizar un coeficiente de la pendiente de la orilla para representar adecuadamente la geometría de la orilla del canal.

2.7 Determinación del gasto total en la sección transversal del río

Utilizando los métodos y las ecuaciones descritas en el este capítulo, la descarga total del río (Q_t) se calcula por la ecuación:

$$Q_t = Q_m + Q_{el} + Q_{er} \quad (2.20)$$

Donde

Q_m = Es la descarga total del canal [es la suma de todas valores q_i durante las mediciones de descarga (ec. 2.13)]

Q_{el} = Descarga cerca de la orilla en el lado izquierdo del canal

Q_{er} = Descarga cerca de la orilla en el lado derecho del canal

Se puede decir de este capítulo, que los ADP constituyen una herramienta establecida para las mediciones fluviales y son varias las empresas que los fabrican (RDI, 1996; SonTek, 2000).

Actualmente, tanto los medidores acústicos de velocidad en un punto, como los ADP montados en embarcaciones son empleados en aproximadamente el 30 por ciento de las mediciones de caudal que lleva a cabo el USGS (Mueller y Wagner, 2009).

En el caso particular de este trabajo, se contó con un perfilador acústico Doppler (ADP), modelo RiverCat marca Sontek, con una frecuencia de 1500 kHz y un rango de operación de hasta 25m. En el siguiente capítulo se hace una breve descripción del equipo y su puesta a punto.

Capítulo III. Puesta a punto del equipo Doppler

3.1 Configuración del perfilador acústico Doppler

Como se discutió en el capítulo I, las mediciones de las velocidades en tres dimensiones en ríos con equipos acústicos son importantes para la visualización de las velocidades secundarias. En toda medición se necesita empezar con una calibración y verificación del buen funcionamiento de los equipos a utilizar.

Los perfiladores acústicos Doppler cuentan con procedimientos estandarizados para su calibración y puesta a punto muy bien definidos por las compañías de fabricación; y además, proporcionan información sobre los ajustes que se realizan en los datos obtenidos (desviación estándar); esto permitirá obtener resultados precisos que puedan representar gráficamente las componentes transversales del vector velocidad en el área de estudio, con lo que se conseguirán establecer las corrientes secundarias.

Para llevar a cabo las mediciones, se utilizó un Perfilador Acústico Doppler, marca Sontek modelo RiverSurveyor M481 como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Sistema RiverSurveyor mini-ADP estándar

3.2 Montaje del perfilador acústico

El sistema *RiverSurveyor*, permite conectarse de dos formas, dependiendo las condiciones hidráulicas que se encuentren en el área de estudio. La primera, permite montar el ADP en un barco (figura 3.2). Este arreglo se recomienda para ríos y lagunas anchas y profundas, ya que permite mantener en una trayectoria estable el Perfilador Acústico, razón por la cual fue la utilizada para realizar las mediciones de este trabajo; el segundo método consiste en montar el ADP en un *catamarán* de dimensiones pequeñas (figura 3.3). Este arreglo se recomienda para realizar mediciones en ríos y lagunas poco profundas (dependiendo de la frecuencia del ADP) o ríos que no sean muy accesibles a los barcos o bien, que tengan muchos obstáculos para la navegación. El problema que este tipo de montaje presenta es que no mantiene una trayectoria estable, sobre todo en ríos de montaña o en zonas donde hay mucha turbulencia.



Figura 3.2. Sistema RiverSurveyor mini-ADP en barcos.



Figura 3.3. Sistema RiverSurveyor ADP utilizando un catamarán.

Las conexiones electrónicas del Sistema *RiverSurveyor* en barcos, se realiza según lo indicado en el manual de operación *RiverSurveyor System Manual Software Version 4.60* de la empresa Sontek. El montaje y las conexiones, la caja electrónica RiverCat y el GPS (Global Positioning System) se montaron en un barco de aluminio con motor fuera de borda, como se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4. Montaje del ADP, la caja electrónica RiverCat y el GPS en el barco.

La alimentación del sistema *RiverSurveyor* se puede realizar de dos formas (figura 3.5): la primera, utilizando una batería de automóvil de 12 volts (figura 3.5b) la cual se conecta a un inversor de 800 Watts, que permite mantener un voltaje constante; este tipo de alimentación no se recomienda para mediciones muy prolongadas. La segunda, se logra utilizando un generador eléctrico (figura 3.5c); este tipo de alimentación es el más recomendado pues permite realizar mediciones de larga duración y conectar otros accesorios como el medidor de profundidad y la Laptop.

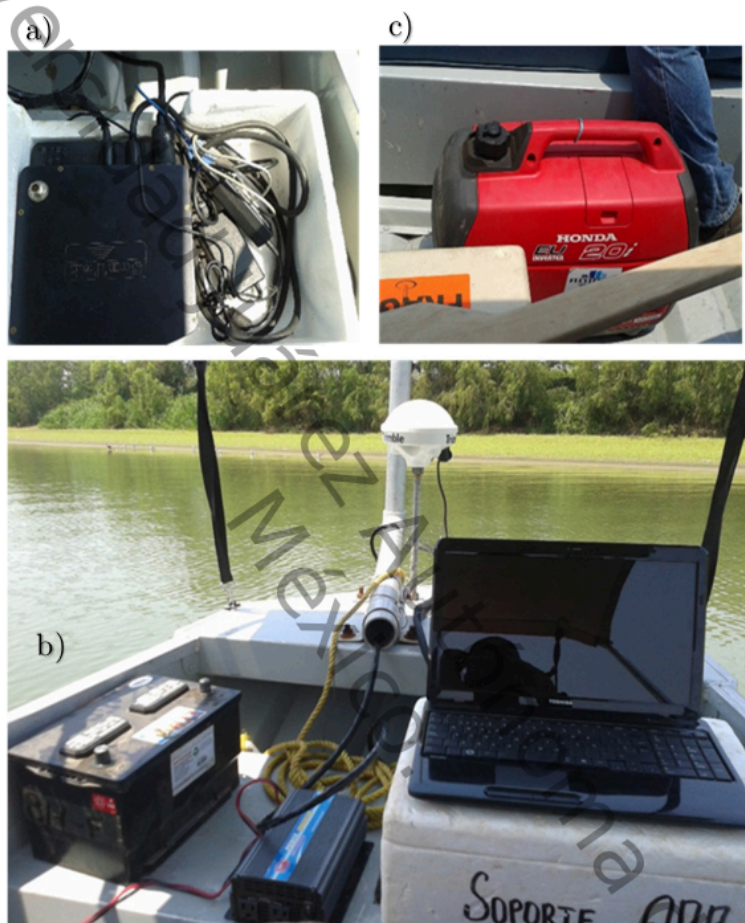


Figura 3.5. a) Conexión de la caja electrónica RiverCat. b) Generador eléctrico Honda. c) Conexión con batería de automóvil de 12 v e inversor.

3.3 Configuración del hardware del perfilador acústico

Como se mencionó en el capítulo previo, los errores de medición son muy frecuentes en todo el proceso de adquisición de datos. Los perfiladores acústicos Doppler pueden presentar errores al momento de realizar las mediciones; por lo tanto, es importante verificar las condiciones del río o laguna para determinar la mejor configuración del hardware del ADP y disminuir estas incertidumbres.

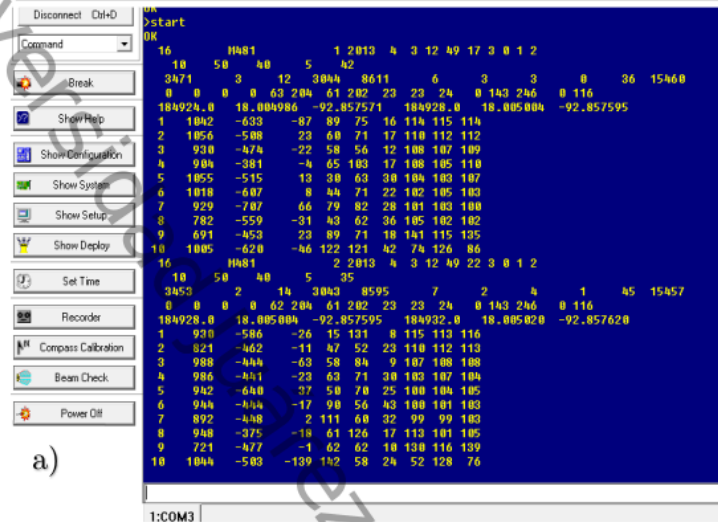
La configuración del hardware se inicia revisando la comunicación entre el sistema RiverSurveyor ADP y la Laptop. Con ayuda del software Sonutils4 (Sontek, 2007), se realiza un test de funcionalidad de todos los sensores que estén conectados a la caja electrónica RiverCat (tabla 3.1). El equipo tiene la posibilidad de ser usado vía remota, empleando un modem de radiofrecuencia que se acopla al equipo, en este tipo de aplicación es muy importante revisar la carga de las baterías de la caja electrónica del RiverCat, ya que con un voltaje menor a 18 volts deja de operar correctamente. La configuración dada al hardware del sistema RiverSurveyor, tal como se ingresa se muestra en la tabla 3.1, sin traducción.

Tabla 3.1. Se muestran los valores de la frecuencia, así como todos los sensores conectados a la caja electrónica RiverCat

ADP Hardware Configuration	
CPUSoftwareVerNum -----> 9.9	Pressure Scale -----> 0.000169
DSPSoftwareVerNum -----> 4.0	dbar/count
BoardRev -----> G	Pressure Scale 2 -----> -
SerialNumber -----> M481	9.000000 pdbar/c ²
AdpType -----> 1500 kHz	Ext Sensor Installed -----> NO
Nbeams -----> 3	Ext Pressure Sensor Installed >
BeamGeometry -----> 3_BEAMS	NONE
Slant Angle -----> 25.0 deg	CTD Sensor Installed -----> NO
Sensor Orientation -----> DOWN	Transformation Matrix
Compass Installed -----> YES	1.577 -0.789 -0.789
Recorder Installed -----> NO	0.000 -1.366 1.366
Temperature Installed -----> YES	0.368 0.368 0.368
Pressure Installed -----> YES	
Pressure Offset -----> -1.499000 dbar	

Cuando se efectúa una primera medición, se puede verificar la funcionabilidad de los tres haces de radiofrecuencia; para ello, se escribe la palabra “START” en la consola del SonUtils4 y el sistema comenzará a recopilar y mostrar datos cada cinco segundos para diez celdas de una distancia separación d (figura 3.6a). Si esta prueba se realiza fuera del agua, algunos datos se mostrarían en cero, lo cual es normal porque se requieren de partículas suspendidas para que el perfilador pueda medir. Por último, se hace una revisión sencilla de la brújula del ADP con el comando COMPASS CONT, y se mostrará en la pantalla del SonUtils4 el Heading, Pitch y Roll de las mediciones que se actualizan cada segundo (figura 3.7).

Caracterización de corrientes secundarias empleando un perfilador acústico Doppler (ADP)



b)

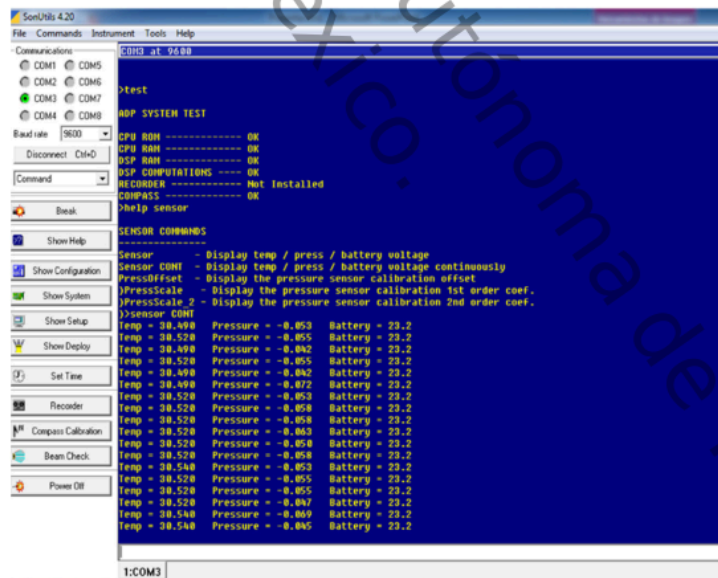


Figura 3.6. a) Se muestra el test de medición de los tres haces del ADP b) Test de funcionalidad de los sensores del ADP.

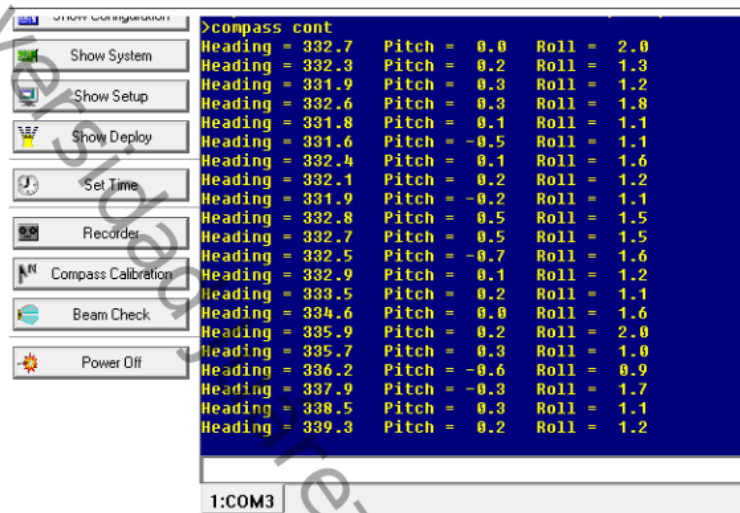


Figura 3.7. Test de la brújula del ADP

3.4 Configuración del software del perfilador acústico

Como se mencionó anteriormente, las condiciones hidrodinámicas de los ríos son muy importantes al momento de realizar las mediciones con el perfilador acústico Doppler.

En época de estiaje puede suceder que la profundidad del río sea muy baja de una sección a otra, afectando así el número de celdas válidas obtenidas al momento de la medición, lo cual dependerá de la configuración del software y el modelo del perfilador acústico; sin embargo, en época de avenidas, se tendrá una mejor profundidad y se podrán obtener un mayor número de celdas válidas. El problema que puede presentarse en estas condiciones, es la cantidad de sedimentos que transporta el río y que impiden que el ADP pueda medir, debido al tiempo (relativamente corto) de exposición en el punto de medición; esto no daría a la caja electrónica RiverCat el margen

suficiente de ajuste al medir el haz que es reflejado al ADP por los cúmulos de sedimentos (capítulo II).

Por lo referido anteriormente, en el software RiverSurveyor se pueden hacer las configuraciones necesarias dependiendo de las condiciones hidrodinámicas de los ríos y la frecuencia del perfilador acústico Doppler.

En la tabla 3.2 siguiente se aprecia las combinaciones de frecuencias y rangos de operación del ADP.

Tabla. 3.2. Frecuencias de operación del RiverSurveyor (Sontek, 2007)

Frecuencia (kHz)	Rango máximo de operación (m)	Mínimo rango de operación (m)	Mínimo tamaño de celda (m)	Zona de Blanking (m)
5000	2 - 2.5	0.3	0.08	0.10
3000	6	0.5	0.15	0.2
1500	25	0.85	0.25	0.4
1000	35 - 40	1.40	0.25	0.5
500	100 - 120	3	1.0	1.0
250	160 - 180	6	2.0	2.0

Inicialmente el software debe detectar de manera automática la conexión con el ADP y el GPS. Posteriormente, se deben proporcionar de manera manual al software una serie de datos que se enlistan a continuación:

- 1.- Información del tamaño de celdas
- 2.- Salinidad del agua
- 3.- Intervalo de tiempo al emitir un pulso acústico
- 4.- Calibración de la brújula del ADP.
- 5.- Declinación magnética
- 6.- Las coordenadas de referencia (ENU y XYZ)

El tamaño de celda que medirá el ADP depende de la profundidad del río o laguna, ya que en un río de 2m de profundidad, al colocar una celda de 1m probablemente obtengamos una celda válida, tomando en cuenta que los ADP tienen una zona de blanco o blankin de 0.40m donde no puede medir; en contraste, si tomamos celdas de 0.25m obtendríamos más celdas válidas y mayor precisión en nuestras medidas. Los tamaños de celda válidas para el ADP Sontek de 1.5 MHz son de 0.25 m – 4 m.

La salinidad del agua es otro parámetro importante debido que la velocidad del sonido depende del medio en el que viaja. El software realiza el ajuste necesario al momento de proporcionar esta información, pero por default el software proporciona una salinidad de 34.50 (treinta y cuatro punto cinco gramos por kilogramo de agua) que equivale a un promedio de las aguas de los océanos.

El intervalo de tiempo al emitir un pulso acústico del ADP, depende de la distancia entre el punto que queremos medir sobre la sección y los cúmulos de sedimentos que se transporten en ese momento. El tiempo mínimo que puede medir la caja de conexión electrónica RiverCat es de 5s; cuando hay un cúmulo de sedimentos densos se puede emplear un intervalo de tiempo mayor, pero se tendría que detener la embarcación casi por completo para que la caja de conexión electrónica RiverCat pueda sacar su promedio de medición de los tres haces que son emitidos en el punto de medición y podamos obtener las mediciones de las velocidades.

Para obtener datos precisos de la brújula interna del ADP, lo primero que se debe hacer es calibrarla para compensar los efectos magnéticos ambientales en la zona de estudio. En el cuadro de diálogo de configuración de usuario aparece una

sección para la calibración de la brújula. Se inicia realizando movimiento circulares y al mismo tiempo se gira el ADP para que el software detecte la funcionalidad del Heading, Pitch y Roll. La configuración es guardada por el software y se puede utilizar posteriormente una vez apagada la laptop. Todo este proceso se muestra en la figura 3.8a y b.

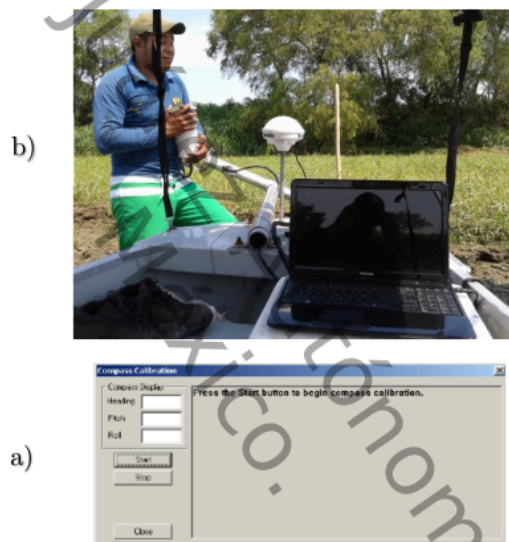


Figura 3.8. a) Calibración de la brújula interna del ADP b) Giro del ADP y rotación sobre su eje del ADP.

La calibración de la brújula interna del ADP se debe realizar en las siguientes condiciones:

- 2 - Siempre que se inicie una medición en una nueva zona de estudio (no confundir con una nueva sección transversal).
- Cada vez que se desmonte todo el sistema RiverSurveyor y,

- Cuando el GPS se use como una referencia para medir la descarga.

Es importante mencionar que la brújula interna del ADP funciona adecuadamente en la mayoría de los ríos y lagunas; sin embargo, en lugares donde hay un cambio de dirección brusco se pueden generar datos erróneos en las mediciones realizadas.

Tomando en cuenta la calibración de la brújula interna del ADP y estableciendo los valores correctos de la declinación magnética, se podrán obtener medidas más precisas de la velocidad del flujo y medidas del gasto.

Cuando se calibra correctamente la brújula sobre la superficie de la Tierra, la brújula apunta al polo norte magnético en lugar del polo norte geográfico; la diferencia angular entre estas dos direcciones se denomina declinación magnética (también conocida como la variación magnética, o variación de la brújula). La declinación magnética varía tanto a través de la superficie de la Tierra como a lo largo del tiempo.

Hay dos maneras de obtener la declinación magnética, la primera es realizarla automáticamente utilizando el GPS integrado en el sistema RiverSurveyor, y la segunda es a través de la página de internet <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/> (Sontek, 2007)

Hay tres sistemas de coordenadas disponibles para la visualización de los vectores de velocidad en RiverSurveyor.

- Beam Coordinates
- XYZ Coordinates
- ENU (East-North-Up) Coordinates

Las coordenadas utilizadas en este trabajo son las ENU o coordenadas geográficas (longitud y latitud) y dependen mucho de la calibración de la brújula interna del ADP, así como de la declinación magnética.

Estableciendo las configuraciones adecuadas mencionadas anteriormente, se puede dar inicio a la medición para obtener el perfil de velocidades tridimensionales como se muestra en la figura 3.9.

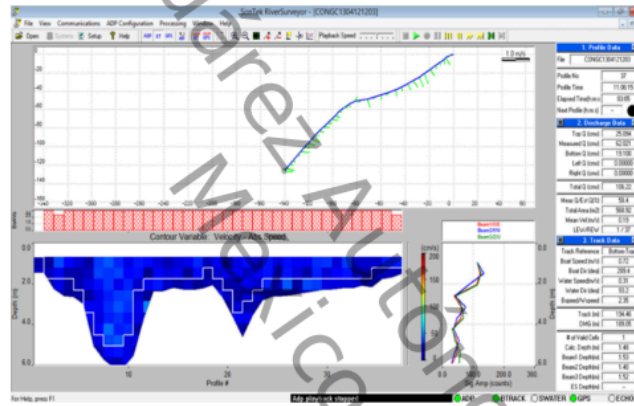


Figura 3.9. Esquema de medición de las velocidades con el software RiverSurveyor.

Finalmente, el software permite obtener las velocidades de tres sistema de referencia. La primera es con respecto al ADP, donde el software considera que se mantiene sin movimiento el perfilador. Esta opción se utiliza como diagnóstico y es poco recomendable. La segunda es utilizando el Bottom-track y toma como referencia el fondo del río para calcular la velocidad del barco, ya que para obtener la velocidad real del agua, el software realiza la suma vectorial de la velocidad del barco con respecto a la velocidad que mide el ADP, y es la más recomendable. Y la tercera, toma como referencia el GPS y elimina la velocidad del barco calculada por el GPS de la velocidad del

agua calculada por el ADP; esta se utiliza cuando el Bottom-track no puede medir debido a movimiento de fondo del río (Alto transporte de sedimentos de fondo).

Fue a partir de estos procedimientos y técnicas de medición que se realizaron las mediciones para obtener las corrientes secundarias tanto en una confluencia como en una curva de un río. En el siguiente capítulo se describen los trabajos realizados en campo.

El río Grijalva forma parte de la región hidrológica Grijalva – Usumacinta dentro de la cuenca Río Grijalva – Villahermosa. Este río tiene sus orígenes en la entidad chiapaneca hasta llegar a la presa Nezahualcóyotl, en el norte de Chiapas; a partir de este sitio sirve como límite entre Chiapas y Tabasco, tramo 2 el que cambia su nombre por el de río Mezcalapa hasta llegar a la ciudad de Villahermosa para denominarse nuevamente, río Grijalva; el volumen de la cuenca en el estado de Tabasco es de $10,586.60 \text{ Mm}^3$ anuales (INEGI, 2001).

El río Mezcalapa al llegar a la zona de planicie se bifurca en dos corrientes, por un lado se encuentra el río Samaria y por el otro se encuentra el río Carrizal. La importancia de este sistema radica en que el río Carrizal atraviesa la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco y es una de las dos corrientes principales que rodean la ciudad y que son las responsables de las inundaciones.

La otra corriente que atraviesa la ciudad de Villahermosa, es la del río Grijalva que se forma debido a la confluencia de una serie de ríos que bajan de la montaña Chiapaneca que al llegar a la planicie se juntan en llamado río Grijalva.

Así se juntan en una confluencia dos corrientes importantes; la del río Carrizal que escurre controlado y la del río Grijalva que escurre libremente. Es por este motivo que se decidió seleccionar este importante sistema para su estudio.

El río Grijalva forma parte de la región hidrológica Grijalva – Usumacinta dentro de la cuenca Río Grijalva – Villahermosa. Este río tiene sus orígenes en la entidad chiapaneca hasta llegar a la presa Nezahualcóyotl, en el norte de Chiapas; a partir de este sitio sirve como límite entre Chiapas y Tabasco, tramo en el que cambia su nombre por el de río Mezcalapa hasta llegar a la ciudad de Villahermosa para denominarse nuevamente, río Grijalva; el volumen de la cuenca en el estado de Tabasco es de 10,586.60 Mm³ anuales (INEGI, 2001).

El río Mezcalapa al llegar a la zona de planicie se bifurca en dos corrientes, por un lado se encuentra el río Samaria y por el otro se encuentra el río Carrizal. La importancia de este sistema radica en que el río Carrizal atraviesa la ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco y es una de las dos corrientes principales que rodean la ciudad y que son las responsables de las inundaciones.

La otra corriente que atraviesa la ciudad de Villahermosa, es la del río Grijalva que se forma debido a la confluencia de una serie de ríos que bajan de la montaña Chiapaneca que al llegar a la planicie se juntan en llamado río Grijalva.

Así se juntan en una confluencia dos corrientes importantes; la del río Carrizal que escurre controlado y la del río Grijalva que escurre libremente. Es por este motivo que se decidió seleccionar este importante sistema para su estudio.

4.2 Zona de estudio

La generación de flujos secundarios, objeto de estudio de este trabajo, ocurre en zonas donde existe un cambio brusco en la dirección que experimenta el flujo, tal como ocurre en las confluencias, bifurcaciones y curvas; por ello, en un primer momento se realizó un trabajo de campo en la zonas del río antes mencionadas. En este caso, se eligió por su importancia la confluencia de los ríos Grijalva y Carrizal, ya que cumple con las características antes descritas; además, tiene la ventaja de ser un lugar cercano y de fácil acceso. Otras mediciones se realizaron aguas abajo de la misma, en zonas curvas del río donde las corrientes secundarias pudieran ser desarrolladas por las fuerzas centrífugas a las que se ve expuesta el flujo en la superficie libre (velocidad helicoidal).

4.3 Metodología de medición

Las medidas se realizaron utilizando el perfilador acústico Doppler, conectado al sistema RiverSurveyor ADP, montado sobre una embarcación (capítulo III). El aforo se llevó a cabo en la zona de la confluencia, por convención, se realizó de la margen izquierda a la margen derecha (Pérez y Díaz, 2000) en siete secciones transversales para el río Grijalva; Ocho para el río Carrizal, con una separación aproximada de 20 metros entre cada una y, cinco secciones transversales inmediatamente después de la confluencia con una separación aproximada a 30 metros, como se muestra en la figura 4.2. En la zona de la curva elegida (figura 4.3) se tomaron cuatros secciones transversales

con una separación aproximada de 100 metros. En todos los puntos de medición se realizaron dos recorridos sobre la sección en estudio, esto fue, para obtener el gasto promedio y manejar valores más confiables. Las mediciones en la curva no se tomaron inmediatamente después de la confluencia debido a que al momento de la medición se encontraba una draga trabajando y por seguridad no fue recomendable la adquisición de datos en esa zona.

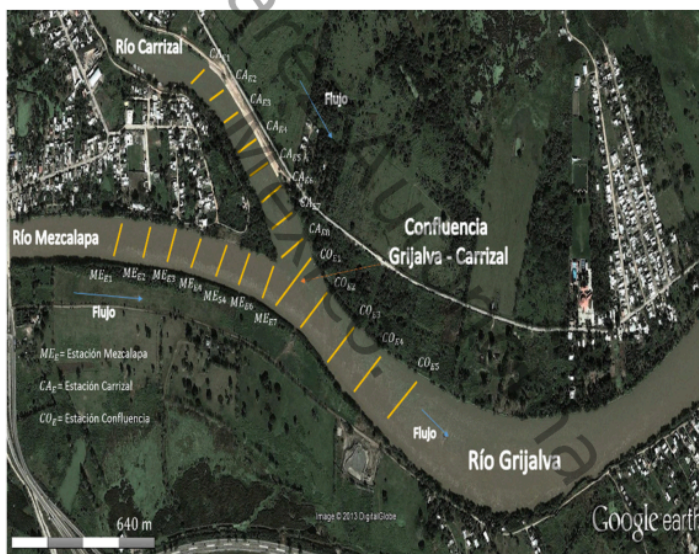


Figura 4.2. Se muestran las estaciones de medición en los ríos Mezcalapa y Carrizal, así como en la confluencia Grijalva - Carrizal.



Figura 4.3. Estaciones de medición en una curva escogida aguas abajo de la confluencia Grijalva - Carrizal.

4.4 Procesamiento de datos

Los datos medidos por el ADP, fueron recopilados por el software RiverSurveyor, el cual generó un archivo con extensión *.adp, que contiene toda la información sobre la batimetría, las velocidades tridimensionales, la posición de la embarcación y el error (desviación estándar) aplicada a cada dato de medición. Este archivo solamente se puede visualizar con este software; sin embargo, el programa RiverSurveyor puede exportar un resumen de las mediciones obtenidas para ser visualizadas por ejemplo con el block de notas de Windows y posteriormente procesarla. En las tablas 4.1a, 4.1b y 4.1c se muestran ejemplos de los resúmenes para cada río en estudio, y la confluencia

donde se realizaron las mediciones. Los datos que se procesaron de estas tablas fueron:

- **Profile** (perfil) que se refiere al nombre de cada punto de medición.
- **Distance** (distancia) es la distancia sobre la sección transversal desde la margen seleccionada en cada punto de medida en m .
- **GPS latitude** y **GPS longitude** es la posición geográfica de la embarcación.
- **AvDepth** es la profundidad promedio medida por los tres haces que emite el ADP en m .
- **StdDev** es la desviación estándar medida en relación a la velocidad del flujo.
- **Q Cumul** es el gasto acumulado en toda la sección transversal, en m^3/s .

Es importante mencionar que en las tablas aparecen valores como 327.67 lo cual indica que esos valores no son válidos, debido a la profundidad donde el ADP no puede medir o las celdas no logran cumplir con el tamaño dado en la configuración del Software.

Tabla 4.1a. Resumen de medición que proporciona el software RiverSourvayor para la estación 1 confluencia Grijalva - Carrizal

Log Path: P:\C\CONC\3411134\144.ap
All Track Excursions use Station Track data
All Station Excursions use Station Track data
All Station Excursions relative to Station Track
MATHC Units

Profile	Distance	DMS	Difference	Difference	GPS Longitude	Depth1	Depth2	Depth3	Depth4	EDDepth	SVES	Drives	Upper	Surface	Stress	DO	# VES	Q	Q/Curve
	[m]	[m]	[m]	[m]	[deg]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		Obs		[m-1/3]
1	12.36.08	5	3	2.3	15.0268117	-62.89372647	1.07	0.98	1.06	1.00	0	0.45	44.3	0	0	100	0	0	0
2	12.36.13	7.9	4.9	6.2	15.0268739	-62.8937142	1.13	1.23	1.2	1.28	0	0.97	34.6	0	0	100	0	0	0
3	12.36.18	13.9	8.6	10.9	15.0269138	-62.8936973	1.79	1.47	1.48	1.62	0	1.11	28.7	104.7	0.08	1.7	1	2.37	3.4
4	12.36.23	19.9	14.6	16.7	15.0269537	-62.8936804	2.45	1.97	1.98	2.12	0	1.25	22.9	104.7	0.08	2.3	1	2.37	3.4
5	12.36.28	25.6	20.6	22.6	15.0269937	-62.8936635	1.99	1.54	1.56	1.69	0	1.39	17.1	100	0.08	4.6	1	3	5.4
6	12.36.33	31.3	26.3	28.3	15.0270336	-62.8936466	2.03	1.58	1.60	1.70	0	1.43	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
7	12.36.38	37.3	32.3	34.3	15.0270735	-62.8936297	2.03	1.58	1.60	1.70	0	1.43	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
8	12.36.43	43.3	38.3	40.3	15.0271134	-62.8936128	2.17	1.70	1.72	1.80	0	1.47	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
9	12.36.48	49.3	44.3	46.3	15.0271533	-62.8935959	2.17	1.70	1.72	1.80	0	1.47	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
10	12.36.53	55.3	50.3	52.3	15.0271932	-62.8935790	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
11	12.36.58	61.3	56.3	58.3	15.0272331	-62.8935621	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
12	12.37.03	67.3	62.3	64.3	15.0272730	-62.8935452	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
13	12.37.08	73.3	68.3	70.3	15.0273129	-62.8935283	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
14	12.37.13	79.3	74.3	76.3	15.0273528	-62.8935114	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
15	12.37.18	85.3	80.3	82.3	15.0273927	-62.8934945	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
16	12.37.23	91.3	86.3	88.3	15.0274326	-62.8934776	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
17	12.37.28	97.3	92.3	94.3	15.0274725	-62.8934607	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
18	12.37.33	103.3	98.3	100.3	15.0275124	-62.8934438	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
19	12.37.38	109.3	104.3	106.3	15.0275523	-62.8934269	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
20	12.37.43	115.3	110.3	112.3	15.0275922	-62.8934100	2.32	1	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
21	12.37.48	121.3	116.3	118.3	15.0276321	-62.8933931	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
22	12.37.53	126.3	121.3	123.3	15.0276720	-62.8933762	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
23	12.37.58	132.3	127.3	129.3	15.0277119	-62.8933593	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
24	12.38.03	138.3	133.3	135.3	15.0277518	-62.8933424	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
25	12.38.08	144.3	139.3	141.3	15.0277917	-62.8933255	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
26	12.38.13	150.3	145.3	147.3	15.0278316	-62.8933086	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
27	12.38.18	156.3	151.3	153.3	15.0278715	-62.8932917	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
28	12.38.23	162.3	157.3	159.3	15.0279114	-62.8932748	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4
29	12.38.28	168.3	163.3	165.3	15.0279513	-62.8932579	2.32	1.82	1.84	1.90	0	1.51	13.4	100	0.08	4.6	1	3	5.4

Discharge Summary
Top Q = 24.832 [cms]
Bottom Q = 11.405 [cms]
Station Q = 11.405 [cms]
Left Q = 0.00000 [cms]
Right Q = 0.00000 [cms]
Time Q = 11.413 [cms]
Mean(Q) = 11.413 [cms]
Stdev(Q) = 0.119 [cms]

Discharge Summary

Top Q = 24.832 (cms)
Measured Q = 84.993 (cms)
Bottom Q = 21.608 (cms)
Left Q = 0.00000 (cms)
Right Q = 0.00000 (cms)
Total Q = 111.43 (cms)
WettedArea/Q = 58.3 (%)
TotalArea = 602.22 (m ²)
WettedArea = 0.19 (m ²)

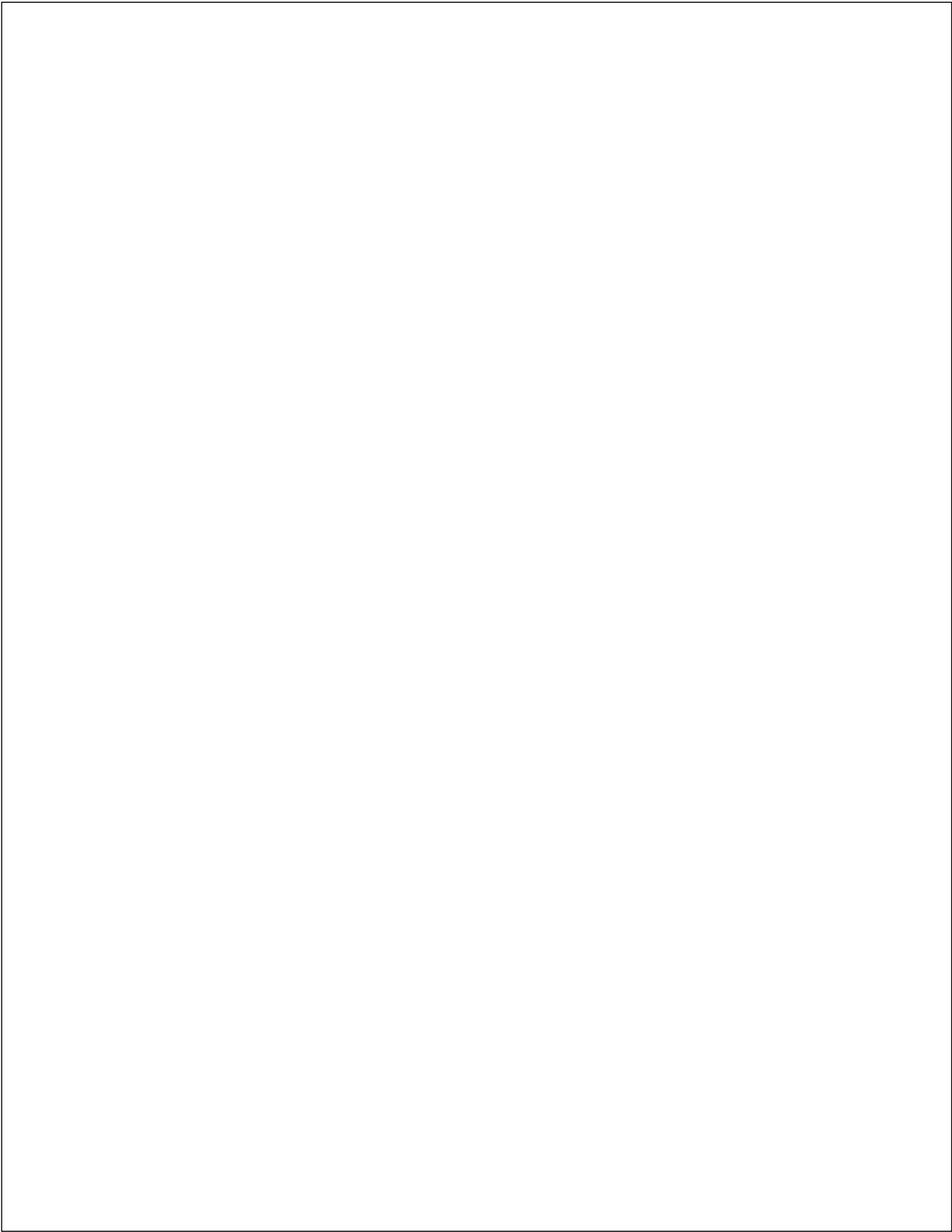


Tabla 4.1c. Resumen de medición que proporciona el software RiverSovayor para la estación 7 del río Mezcalapa

Profile	Time	Distance (m)	DWG	DistEast (m)	DistNorth (m)	GPS Latitude (deg)	GPS Longitude (deg)	Depth1 (m)	Depth2 (m)	Depth3 (m)	AvDepth (m)	EdDepth (m)	uVess (m/s)	DvVess (deg)	uFlow (m/s)	DvFlow (deg)	sdFlow (m/s)	sdv	# Valid Cells	Q (m³/s)	Q Cumul (m³/s)
1	12:20:39	2.9	2.9	2.1	1.9	18.0059252	-92.89402563	1.4	1.31	1.38	1.33	0	0.57	48.4	0.2	126.7	0.07	3.7	2	0.76	1.2
2	12:20:44	6.7	6.4	3.3	5.6	18.00598527	-92.89402563	1.5	1.41	1.39	1.43	0	0.76	17	0.29	126.5	0.09	4.9	2	1.55	2.8
3	12:20:49	11.9	11.6	4.8	10.6	18.00600555	-92.89402563	1.76	1.66	1.65	1.69	0	1.05	16.8	0.43	98	0.05	2.8	3	4	6.8
4	12:20:54	17.3	16.8	5.7	15.8	18.00607257	-92.89402563	1.85	1.77	1.73	1.78	0	1.06	10.1	0.24	27.2	0.06	3	3	0.58	7.4
5	12:20:59	23	22.5	6.7	21.4	18.00612502	-92.89404683	2	1.91	1.91	1.94	0	1.14	9.9	0.31	117.5	0.03	1.5	4	2.22	9.6
6	12:21:04	28.8	28.3	7.7	27.2	18.00618117	-92.89404317	2.2	2.09	2.1	2.14	0	1.18	9.0	0.33	116.4	0.03	1.6	4	3.97	13.6
7	12:21:09	34.8	34.3	8.6	33.2	18.00623395	-92.89403058	2.23	2.19	2.13	2.18	0	1.2	8.2	0.21	126.6	0.04	2.1	4	1.09	14.6
8	12:21:14	40.6	40	9.5	38.9	18.00628395	-92.89401825	2.27	2.26	2.15	2.28	0	1.16	8.4	0.21	96.5	0.02	1.2	4	2.75	17.4
9	12:21:19	46.3	45.7	10.3	44.5	18.00633488	-92.89400623	2.33	2.28	2.18	2.36	0	1.14	8.2	0.25	101.1	0.03	1.4	5	3.28	20.7
10	12:21:24	52.3	51.7	11.3	50.4	18.00638481	-92.89399373	2.46	2.43	2.3	2.38	0	1.14	9.1	0.2	104	0.02	1	5	2.75	23.4
11	12:21:29	58	57.3	12	56.1	18.00643737	-92.89398313	2.53	2.47	2.5	2.5	0	1.14	7.4	0.3	116.3	0.02	1	5	4.08	27.5
12	12:21:34	63.8	63.1	12.3	61.9	18.00648872	-92.8939745	2.58	2.5	2.39	2.49	0	1.16	3.1	0.25	83.3	0.02	1	5	3.49	31
13	12:21:39	69.6	68.9	13.1	67.6	18.00653905	-92.89395646	2.69	2.63	2.57	2.63	0	1.22	8	0.24	86.6	0.02	1	6	3.63	34.6
14	12:21:44	75.7	75	14.1	73.6	18.00659072	-92.89395598	2.81	2.69	2.66	2.74	0	1.17	6	0.21	112.9	0.02	1	7	3.47	41.9
15	12:21:49	81.5	80.8	14.7	79.4	18.00664058	-92.89394503	3.08	2.93	2.89	2.9	0	0.8	9.9	0.18	98	0.03	1	6	1.99	43.9
16	12:21:54	85.5	84.8	15.4	83.3	18.00667737	-92.89394098	2.66	2.98	2.9	2.85	0	0.8	5	0.21	112.9	0.03	1	4	0.98	45.7
17	12:21:59	87.8	87	15.6	85.6	18.00670033	-92.89393843	1.88	2.94	2.2	2.14	0	0.46	5	0.21	112.9	0.03	1	4	0.98	45.7

Discharge Summary
Top Q = 12.218 [cms]
Measured Q = 26.002 [cms]
Bottom Q = 6.2115 [cms]
Left Q = 0.81635 [cms]
Right Q = 0.47482 [cms]
Total Q = 45.722 [cms]
MeanQ/EstQ = 56.9 [%]
TotalArea = 265.92 [m²]
MeanVel = 0.22 [m/s]

Para obtener los datos de las velocidades tridimensionales, se utilizó el software ViewADP de la Sontek, permitiendo realizar un post-procesamiento, que consiste en dejar las celdas validas medidas (figura 4.4). Posteriormente, el software permite exportar los datos ya procesados en cuatro archivos: los primero tres con extensiones *.VE (en dirección x); *.VN (en dirección y); *.VU (en dirección z), que corresponden a las componente del vector velocidad del flujo (tabla 4.2). El cuarto archivo tiene extensión *.ROV, y contiene las profundidades de cada vector velocidad del flujo medido en la columna de agua (tabla 4.3).

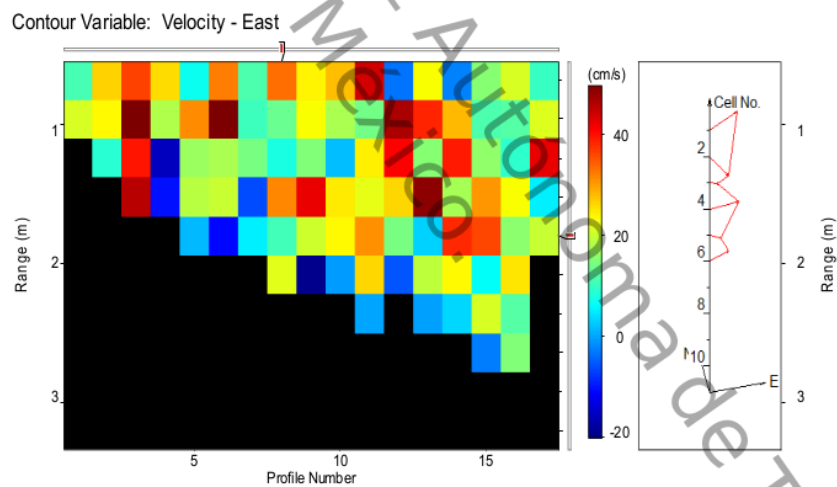


Figura 4.4. Las celdas validas se muestran en diferentes colores, mientras que las celdas eliminadas se representan en negro (estación 8 Carrizal).

Tabla 4.2. Componentes en dirección x del vector de velocidad del flujo en diferentes columnas del agua, para la estación de medición 1 de la confluencia Grijalva - Carrizal

118	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
114	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
115	24	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
116	6.1	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
117	27.5	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
118	38.8	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
119	19.5	13.9	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
120	28.2	25.6	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
121	21.4	18.5	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
122	24.3	18.8	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
123	23.5	22.6	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
124	31.4	28.6	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
125	13	9.6	11.1	-5.8	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
126	22.9	3.9	17.3	14.9	17.1	-1.3	3276.7	3276.7	3276.7
127	15.8	8.5	18.9	13.2	16.9	4.3	-7.1	3276.7	3276.7
128	5.6	12	11.5	16.1	8.3	12.3	0.7	3276.7	3276.7
129	6.1	20.8	14.5	22.4	20.2	12.2	-1.9	3276.7	3276.7
130	19.9	9.8	2.2	2.6	4.6	17.5	10.4	-4	3276.7
131	19.7	12.2	13.1	20.6	5.5	10.2	12.2	11.4	2.3
132	10.2	8.8	5.8	2.7	8.9	6.8	-0.3	4.3	4.4
133	21.6	9.8	12	6.4	15.6	6.5	14.3	0.9	2.9
134	12.1	13.6	17.2	22.6	13	16.6	18.8	19	-9.4
135	7.3	17.2	9.6	3.9	6.2	9.4	3.4	16.3	3276.7
136	31	4.4	14.3	13.9	11.9	9.1	3276.7	3276.7	3276.7
137	17.8	20.3	15.8	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
138	3.9	4.1	20.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
139	3.9	17.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
140	16.7	7.8	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7
141	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7	3276.7

Tabla 4.3. La primera columna de izquierda a derecha, representa el perfil, mientras que la segunda columna representa las profundidades de las componentes del vector velocidad (estación 1, confluencia Grijalva – Carrizal).

⋮			
130	1.05	27.9	134.41
130	1.7	13.57	133.82
130	2.35	17.26	172.8
130	3	9.59	164.36
130	3.65	13.33	159.66
130	4.3	19.17	113.69
130	4.95	13.2	128.07
130	5.6	12.49	198.87
130	6.25	3276.7	3276.7
130	6.9	3276.7	3276.7
131	1.05	27.35	134.01
131	1.7	26.33	152.38
131	2.35	22.96	145.33
131	3	27.5	131.37
131	3.65	8.63	140.44
131	4.3	14.14	134.05
131	4.95	15.56	128.5
131	5.6	13.46	122.4
131	6.25	2.31	99.47
131	6.9	3276.7	3276.7
⋮			

4.5 Resultados

Con los cinco archivos mencionados anteriormente, se generaron tres tablas de datos que contienen la información necesaria para dibujar la batimetría y para graficar la sección transversal, las velocidades transversales, la velocidad de planta y el modelo digital de elevaciones de la confluencia Grijalva – Carrizal; así como de la curva aguas abajo del río Grijalva.

Batimetría: utilizando los campos de GPS latitude, GPS longitude y AvDepth (tabla 4.1), correspondientes a la posición geográfica y la profundidad de las estaciones donde se midió, se generó la tabla 4.4 a partir de la cual se graficaron las curvas de nivel utilizando el software Autocad 2007 (figura 4.5 y 4.6).

Tabla 4.4. Ejemplo de la posición de medición en coordenadas UTM y su respectiva profundidad

Puntos	X	Y	Z
	CE1		
1	510895.4094	1991384.579	-1.00
2	510894.8399	1991384.648	-1.07
3	510894.5329	1991384.612	-1.11
4	510894.0379	1991383.778	-1.30
5	510893.2728	1991381.469	-1.75
6	510891.8558	1991378.61	-2.48
7	510890.1118	1991373.753	-3.30
8	510888.3574	1991368.535	-4.56
9	510887.0849	1991362.861	-5.04
10	510885.8433	1991356.984	-5.06
11	510884.5021	1991351.075	-5.43
12	510882.9522	1991345.509	-5.72
13	510881.1945	1991340.55	-5.98
14	510880.102	1991336.722	-5.79
	CE2		
16	510878.2927	1991333.143	-4.18
17	510876.6523	1991334.237	-5.27
18	510876.8105	1991335.399	-5.70
19	510877.1465	1991338.477	-6.15
20	510878.777	1991343.733	-5.99
21	510881.2597	1991349.062	-5.54
22	510884.2721	1991355.394	-5.24
23	510886.2758	1991359.75	-4.93
24	510888.9256	1991365.195	-5.01
25	510891.6316	1991370.629	-4.29
26	510893.7248	1991375.741	-3.02
27	510895.4654	1991379.15	-2.22
28	510896.8847	1991381.49	-1.66
29	510897.9085	1991383.145	-1.33
:			
:			

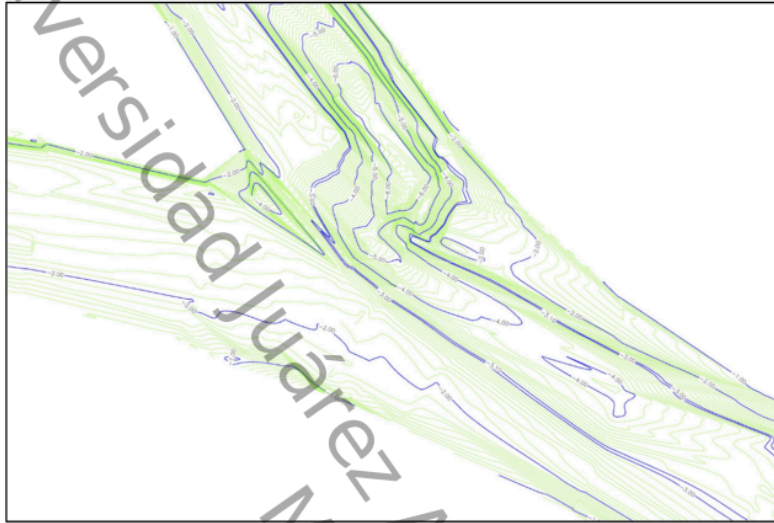


Figura 4.5. Curvas de nivel de la confluencia Grijalva - Carrizal

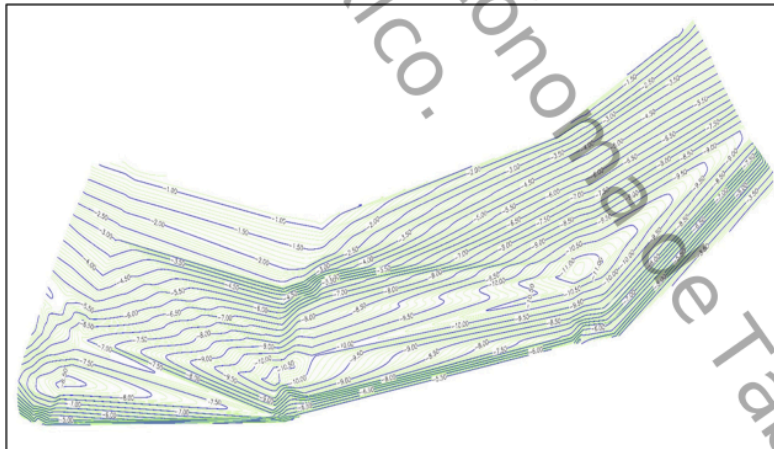


Figura 4.6. Curvas de nivel de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.

Sección transversal: tomando los campos de **distance** y **avDepth** del archivo *.dis, correspondientes a la sección transversal medida y considerando que la margen izquierda tiene como referencia el cero del eje de la distancia, se generó una tabla que se exportó a un archivo de texto que contenía una sencilla programación para que el software TecPlot 360 pudiera graficar la sección transversal (figura 4.7). Este software es el utilizado para graficar las velocidades secundarias que se superponen a las secciones transversales donde se midieron.

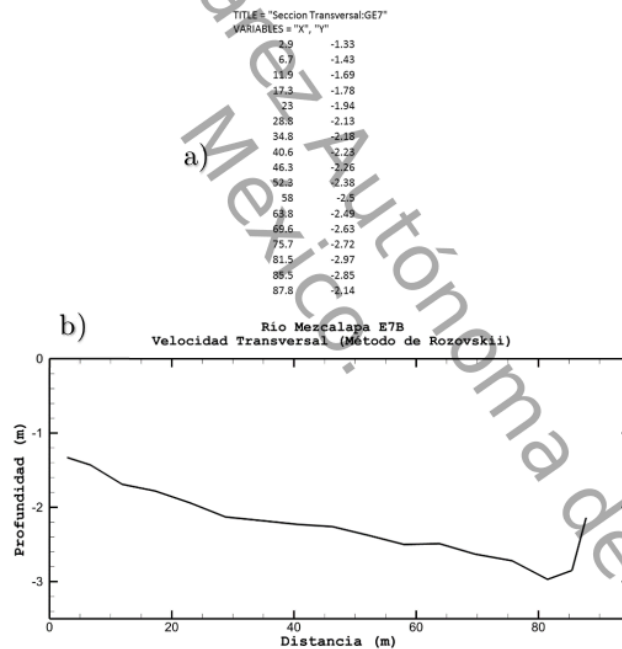


Figura 4.7. a) Archivo de texto con los datos de la sección transversal
b) Sección trasversal generada por el software TecPlot 360.

Velocidad Transversal: como ya se ha discutido en el capítulo I, las velocidades transversales se presentan en el plano perpendicular de la dirección del movimiento de la velocidad primaria y es originado por la aceleración centrífuga. Para su caracterización, es necesario crear una tabla a partir de los archivos que contienen la información de las componentes del vector velocidad y tomando el campo de **distance** del archivo *.dis. A partir de las ecuaciones 1.17 y 1.18 del capítulo I, podemos determinar las velocidades secundarias y velocidades primarias que es el objetivo de este trabajo. En la tabla 4.5 se muestra el formato que se exportó al software Tecplot 360 para graficar las velocidades secundarias.

Tabla 4.5. La velocidad secundaria se muestra en la columna 13 (v_s) y la velocidad en dirección aguas abajo en la columna 14.

PROFILE	X	Y	v_x	v_y	v_z	$ V $	(V_x)	(V_y)	φ	θ	v_s	v_p
115	13.9	-1.09	0.24	-0.063	-0.008	0.248	0.240	-0.063	-1.314	-1.314	0.000	0.248
116	20.1	-1.092	0.061	-0.001	-0.012	0.061	0.061	-0.001	-1.554	-1.554	0.000	0.061
117	26.6	-1.096	0.275	-0.049	-0.002	0.279	0.275	-0.049	-1.394	-1.394	0.000	0.279
118	33.3	-1.112	0.383	0.008	0.007	0.383	0.383	0.008	-1.550	-1.550	0.000	0.383
119	40	-1.05	0.195	-0.023	0.004	0.196	0.167	-0.084	-1.453	-1.107	-0.067	0.185
119	40	-1.7	0.139	-0.144	-0.014	0.200	0.167	-0.084	-0.758	-1.107	0.067	0.189
120	46.8	-1.05	0.282	-0.056	0.002	0.288	0.269	-0.030	-1.375	-1.462	0.025	0.286
120	46.8	-1.7	0.256	-0.003	0.001	0.256	0.269	-0.030	-1.559	-1.462	-0.025	0.255
121	53.7	-1.147	0.214	-0.12	0.006	0.245	0.200	-0.107	-1.060	-1.060	0.005	0.245
121	53.7	-1.797	0.185	-0.093	0.051	0.207	0.200	-0.107	-1.105	-1.080	-0.005	0.207
122	60.5	-1.146	0.243	-0.115	0.01	0.269	0.216	-0.079	-1.129	-1.221	0.025	0.268
122	60.5	-1.796	0.188	-0.042	0.021	0.193	0.216	-0.079	-1.351	-1.221	-0.025	0.191
123	67	-1.193	0.235	-0.049	-0.012	0.240	0.231	-0.066	-1.365	-1.294	-0.017	0.239
123	67	-1.843	0.226	-0.082	0.032	0.240	0.231	-0.066	-1.223	-1.294	0.017	0.240
124	73.5	-1.068	0.314	-0.14	-0.024	0.344	0.300	-0.086	-1.151	-1.292	0.048	0.340
124	73.5	-1.718	0.286	-0.032	-0.048	0.288	0.300	-0.086	-1.459	-1.292	-0.048	0.284
125	80.1	-1.052	0.13	0.057	0.002	0.142	0.070	0.018	1.158	1.318	-0.023	0.140
125	80.1	-1.702	0.096	-0.048	-0.016	0.107	0.070	0.018	-1.107	1.318	-0.070	-0.081
125	80.1	-2.352	0.111	-0.009	0.016	0.111	0.070	0.018	-1.490	1.318	-0.036	-0.105
125	80.1	-3.002	-0.058	0.072	-0.008	0.092	0.070	0.018	-0.678	1.318	-0.084	-0.038
:												

En las figuras 4.8a, b y c, se muestra la generación de las velocidades secundarias en una sección anterior a la confluencia sobre el río Carrizal (CE8). Se observa que en la margen derecha (distancia 0) las velocidades secundarias no están completamente desarrolladas, mientras que en la margen izquierda estas velocidades sí están desarrolladas, esto se debe a la fuerza de presión hidráulica que se ejerce sobre la margen. En la figura 4.8b se muestra la circulación secundaria (flechas de naranja) más detalladamente, así como la socavación que realizan estas velocidades sobre el cauce del río. En la figura 4.8c se presenta el perfil de velocidades que se pueden comparar con las obtenidas por la formulación de Rozovskii.

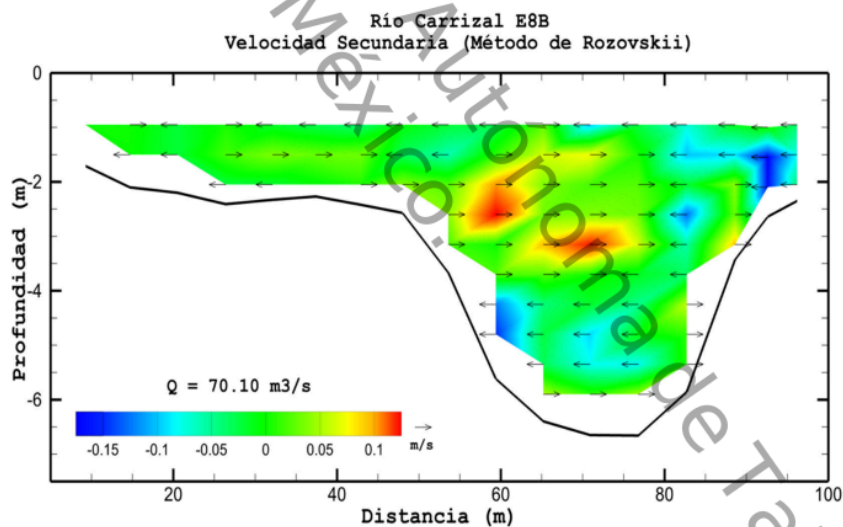


Figura 4.8a Velocidad secundaria en la estación 8 del río Carrizal.

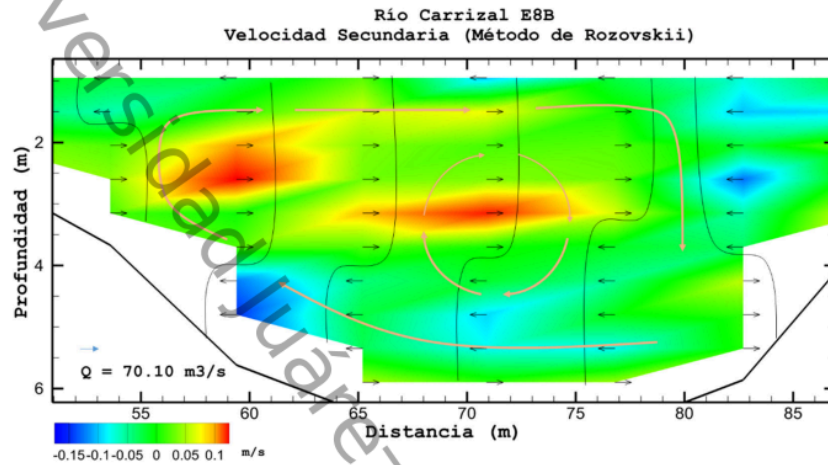


Figura 4.8b. Se muestra la circulación transversal en la estación 8 del río Carrizal.

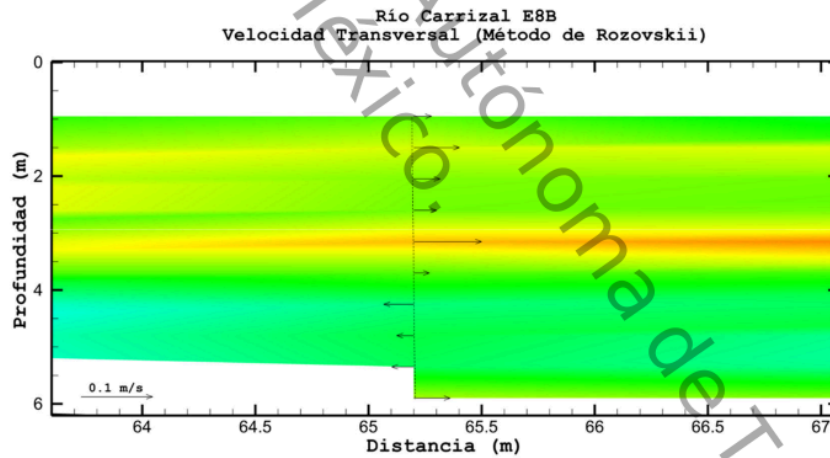


Figura 4.8c. Perfil de velocidad, estación 8 del río Carrizal.

Las velocidades secundarias correspondientes a la estación 7 del río Mezcalapa se muestran en la figura 4.9a, b, y c. En la figura 4.9a podemos apreciar que las velocidades secundarias de esta sección se desarrollan en la margen derecha y son originadas por la capa de cizalladura (cambio brusco en dirección de las velocidades) entre la unión de los dos flujos. La figura 4.9b muestra que la circulación secundaria solo está presente en la margen derecha de la sección. En la figura 4.9c se distingue que las velocidades secundarias están desarrolladas y que hay una sobre-elevación del espejo del agua, debido a la fuerza de presión radial que se manifiesta como un gradiente hidráulico local en dirección radial, $\partial p / \partial r$, también conocido como el fenómeno de la pendiente transversal en la curva (Falcón, 1984).

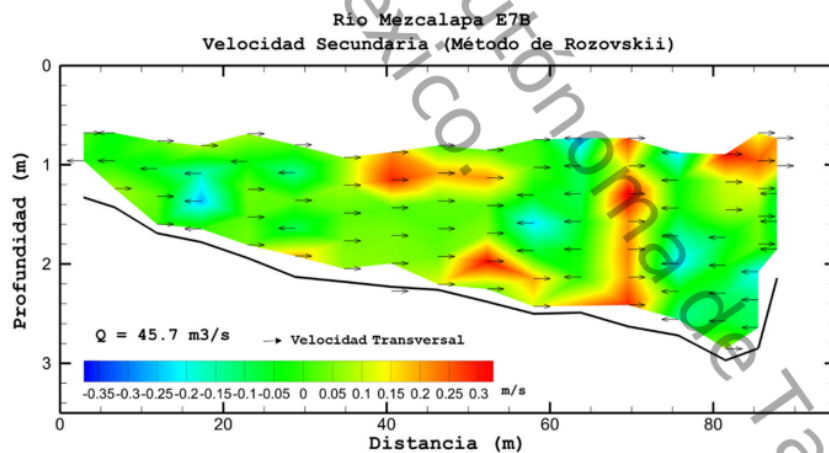


Figura 4.9a. Velocidades secundarias en margen derecha, estación 7 del río Mezcalapa.

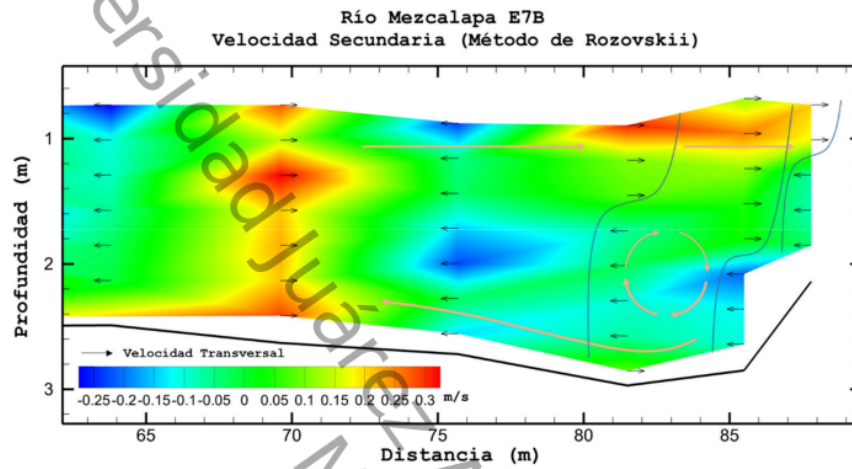


Figura 4.9b Se muestra la circulación secundaria en la margen derecha.

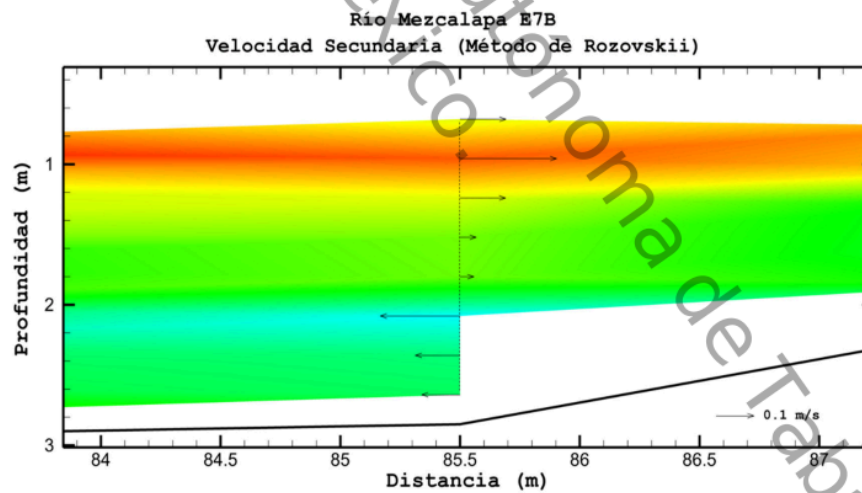


Figura 4.9c. Perfil de velocidad, estación 7 del río Mezcalapa.

En las figuras 4.10a, b, y c podemos observar las corrientes secundarias totalmente desarrolladas y que se ubican sobre la confluencia Grijalva – Carrizal de la estación 1. La figura 4.10a muestra las velocidades secundarias totalmente desarrolladas en toda la sección transversal de la confluencia; además, el fenómeno de la pendiente transversal también puede ser observado. La figura 4.10b presenta la circulación secundaria, originada por la capa de cizalladura. En la figura 4.10c se aprecia el perfil de velocidades, que concuerda con los modelos teóricos.

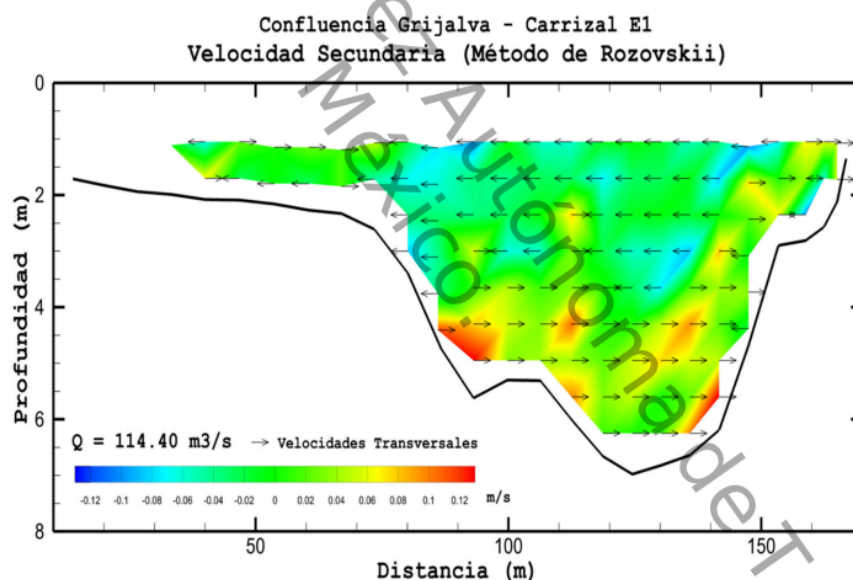


Figura 4.10a. Velocidad secundaria estación 1 de la confluencia Grijalva – Carrizal.

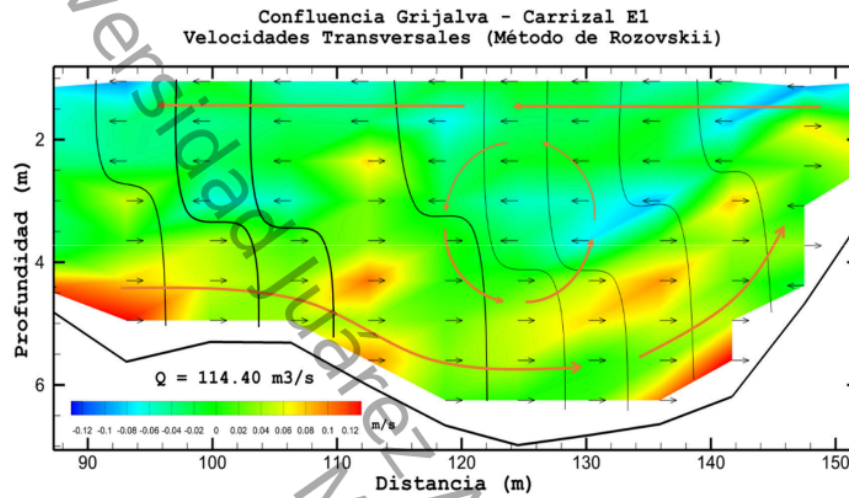


Figura 4.10b. Circulación transversal, estación 1 de la confluencia Grijalva - Carrizal.

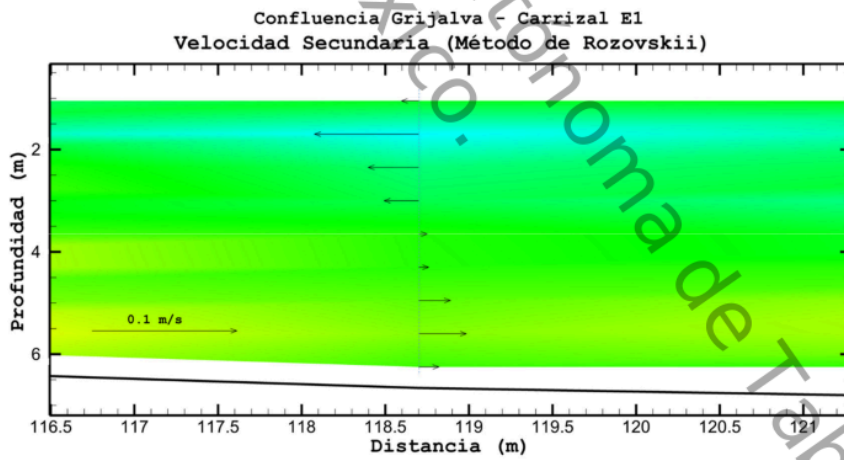


Figura 4.10c. Perfil de velocidad, estación 1 de la confluencia Grijalva - Carrizal

Las velocidades secundarias para una estación de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal, se muestran en las figuras 4.11a, b y c. La figura 4.11a presenta las velocidades secundarias originadas por la aceleración centrífuga debido a la curvatura del canal. En la figura 4.11b se observa la circulación secundaria bien desarrollada en la margen izquierda donde se encuentra la socavación. En la figura 4.11c está representado el perfil de velocidades.

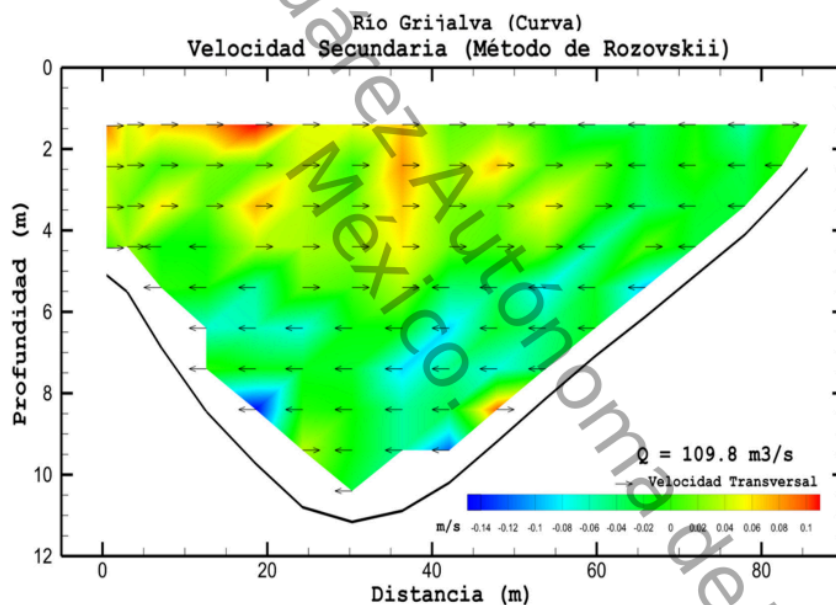


Figura 4.11a. Velocidad secundaria, estación 4 de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal

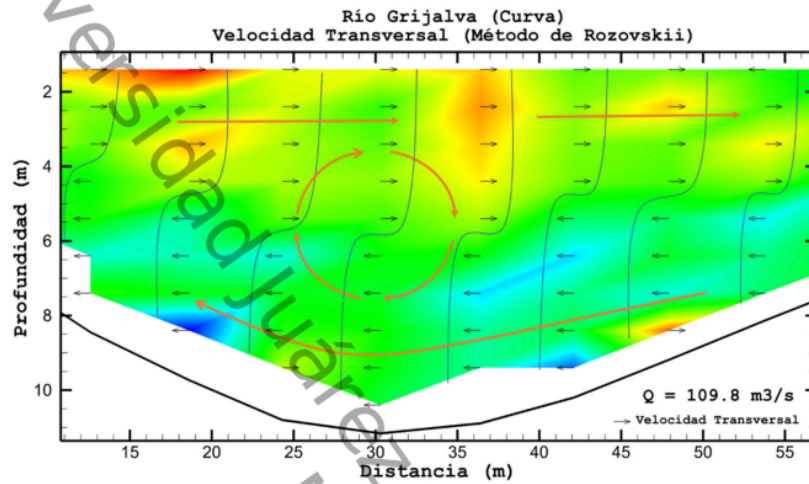


Figura 4.11b. Circulación secundaria de la estación 4 en la curva aguas debajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.

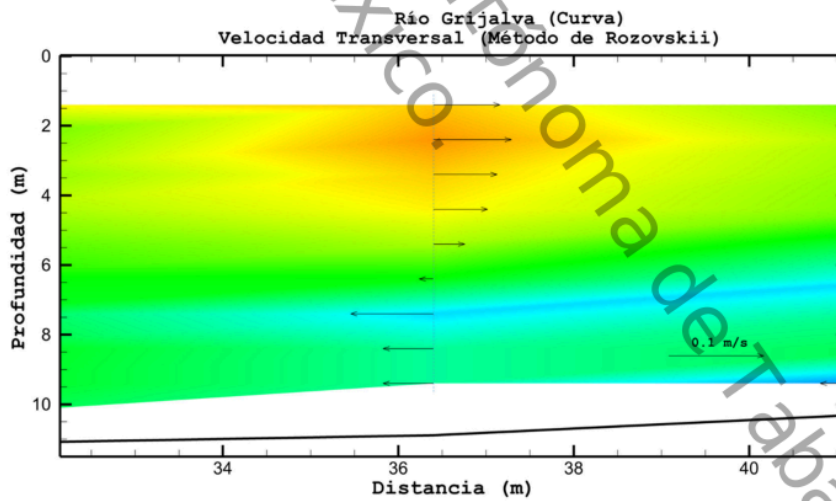


Figura 4.11c. Perfil de velocidad de la estación 4 en la curva aguas debajo de la confluencia Grijalva – Carrizal.

Velocidad de Planta: Una representación del campo de velocidades en la dirección principal del flujo, es importante para identificar patrones de flujo que ayuden a explicar junto con las corrientes secundarias, el funcionamiento hidrodinámico de la confluencia. En este sentido, el ADP en sus capacidades básicas, permite generar de forma casi directa estos vectores de velocidad, que al ser interpolados permiten generar líneas de corriente principales, las cuales van ligadas con procesos complejos; por ejemplo, el de transporte de sedimentos (figura 4.12 y 4.13)

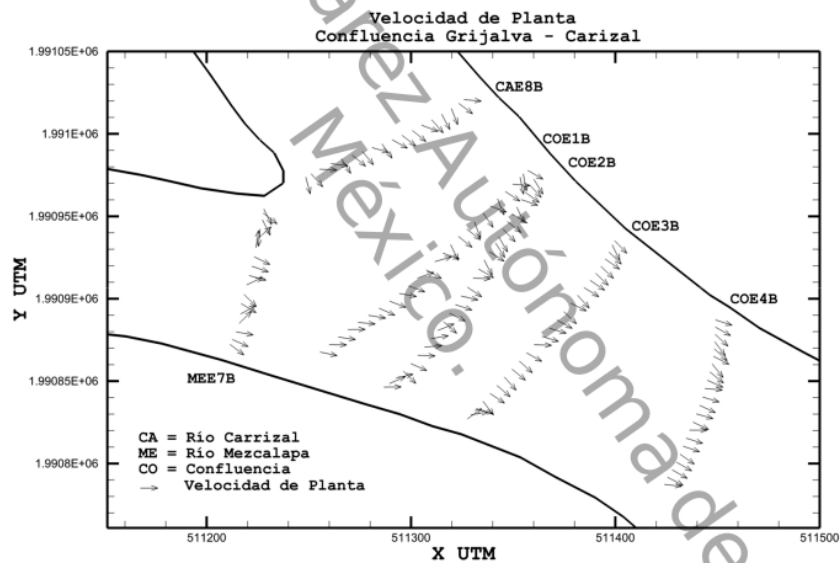


Figura 4.12. Se muestra la velocidad planta para la confluencia Grijalva - Carrizal.

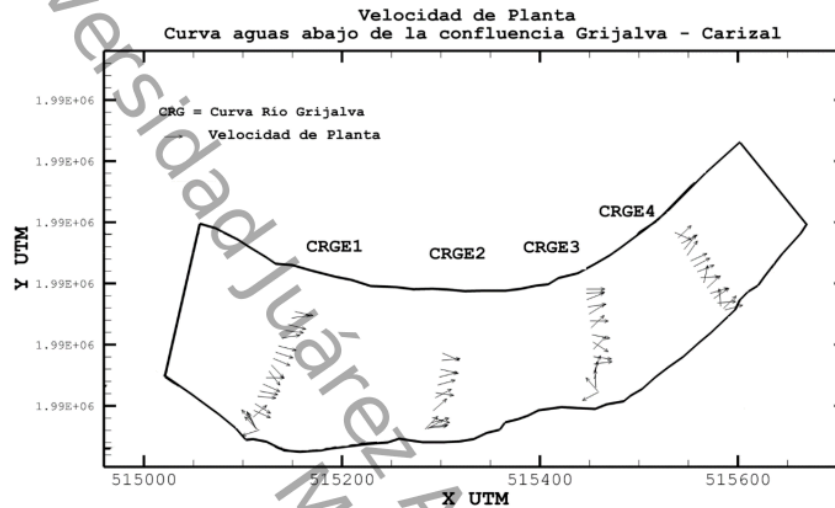


Figura 4.13. Se muestra la velocidad planta para la curva aguas abajo río Grijalva

Modelo Digital de Elevaciones: es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, a partir de las curvas de nivel generadas por la batimetría. Con ayuda del software ArcMap 10.1 se creó un modelo vectorial (redes de triángulo irregulares, TIN) que se adaptó a la superficie con diferentes grados de detalles, en función de la complejidad del relieve para tener una clara idea de la forma del cauce del río. En la figura 4.14 y 4.15 se muestran los MDE de la confluencia Grijalva - Carrizal y de la curva aguas abajo del río Grijalva.

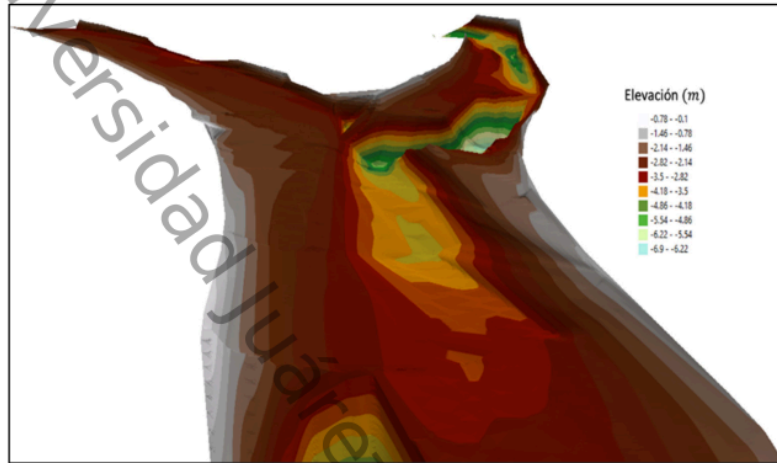


Figura 4.14. Modelo Digital de Elevaciones, generado por las curvas de nivel de la confluencia del río Grijalva – Carrizal

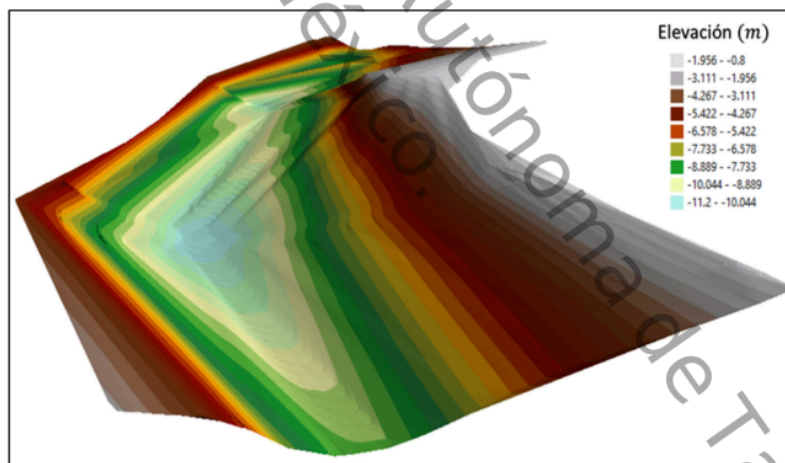


Figura 4.15. Modelo Digital de elevaciones de la curva aguas abajo de la confluencia Grijalva – Carrizal

Finalmente, en las figuras 4.16 y 4.17 se combinan las velocidades secundarias obtenidas por el software TecPlot 360 y el modelo digital de elevaciones generadas por el ArcMap 10.1, para un análisis más completo de cómo afectan estas velocidades al cauce de río.

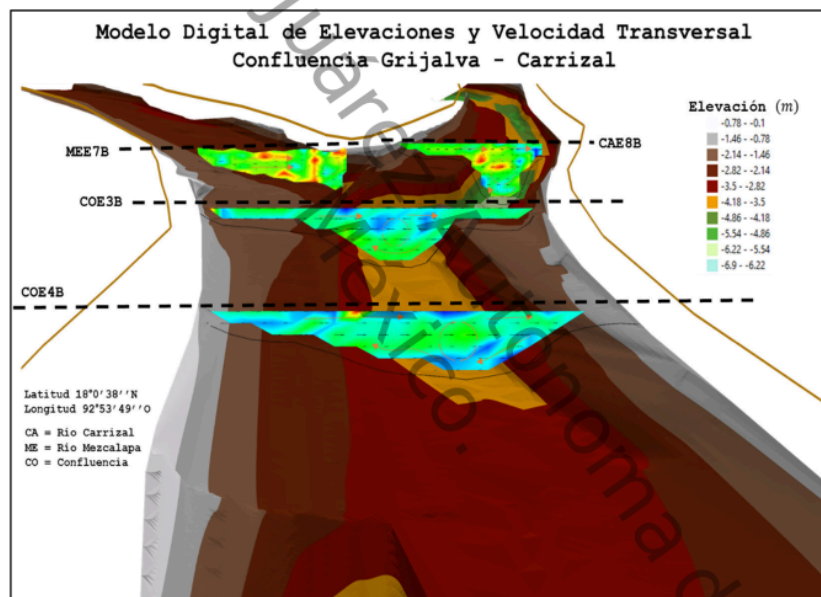


Figura 4.16. Representación de las velocidades secundarias sobre el modelo digital de elevaciones, en la confluencia Grijalva – Carrizal.

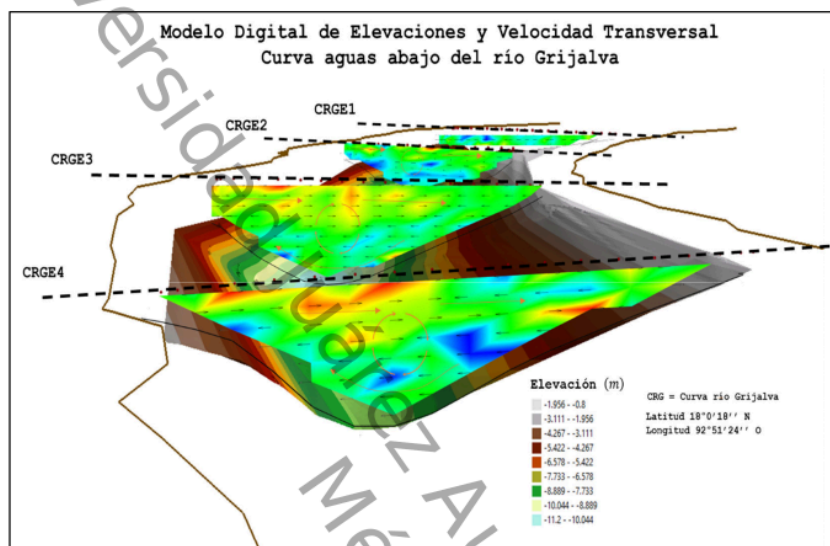


Figura 4.17. Representación de las velocidades secundarias sobre el modelo digital de elevaciones, en la curva aguas abajo del río Grijalva.

El uso de los perfiladores acústicos Doppler como herramienta de medición de las velocidades tridimensionales, permiten una mejor comprensión de las velocidades secundarias, lo que a su vez ayuda a explicar la forma del cauce de los ríos, así como el movimiento de meandros.

Conclusiones

Las velocidades secundarias en los ríos se generan principalmente en zonas donde existe un cambio brusco en la dirección que experimenta el flujo, tal como sucede en las confluencias, bifurcaciones y curvas, socavando la margen externa o cóncava.

Para determinar la hidrodinámica e identificar corrientes secundarias, es importante el uso de Perfiladores Acústicos Doppler (ADP); no obstante, en México aún es incipiente su uso para tales fines; esto se piensa que se debe principalmente a la falta de conocimiento sobre su uso y capacidades, pues actualmente solo se le da uso para aforo de corrientes, lo que en términos generales resulta costoso pues estos equipos no son baratos y su empleo requiere personal calificado. Existen algunos Centros de investigación, Universidades y Dependencias federales como la CONAGUA o la CFE, que cuentan con este tipo de equipos; sin embargo, ello no significa que se explote del todo sus capacidades.

En este trabajo, se hizo una revisión teórica profunda de las bases y principios de funcionamiento de los equipos Doppler (capítulo I), y se enfatizó sobre todo en lo que respecta a la generación de velocidades secundarias y su obtención en confluencias y curvas. Partiendo de desarrollos como el de Rozovskii, fue posible determinar a partir de los datos de un perfilador acústico Doppler la caracterización de las velocidades secundarias en ríos de la planicie tabasqueña. Obteniendo resul-

tados comparables con las predicciones de modelos teóricos propuestos en la literatura como los de: Rozovskii (1957); Blanckaert y DE Vriend (2004); Dinehart y Burau (2005); Riley y Rhoads (2011).

Si bien se consideró utilizar el software Velocity Mapping Toolbox (VMT) que también realiza una visualización de las corrientes secundarias pero basándose en el lenguaje que utiliza el software Matlab, se desestimó esta idea debido a que el VMT fue creado para trabajar en otros equipos (Teledyne) empleados por la United States Geological Survey, en E.U. y, por lo tanto, no es compatible con el ADP de la Sontek, utilizado en este trabajo. Por lo tanto, debido a que el Software RiverSuveryor genera una gran cantidad de datos en crudo de las velocidades tridimensionales por cada sección transversal, se tuvieron que utilizar diversos procedimientos de cálculo como los descritos en el capítulo cuatro junto con varios programas de cómputo, con la finalidad de obtener los gráficos que representaran adecuadamente las velocidades secundarias.

Así que otra aportación fue el procedimiento para la caracterización de las velocidades secundarias y su comparación contra la formulación de Rozovskii (1957).

Discusión

Una observación importante que surgió después de procesar los datos y graficarlos, fue la presencia del fenómeno de elevación transversal de la superficie libre, reportado en la literatura recientemente (Gallego *et al*, 2011) tal y como se observa en las gráficas 4.10 y 4.12 (capítulo 4). Estas sobrelevaciones pueden estar ligadas a dos tipos de fenómenos; por una parte, a la resistencia del fondo y por otra, a los choques de los chorros que originan una resistencia hidráulica. Por lo que este tipo de información, sumada con una batimetría a detalle, puede ayudar a dar una posible explicación de la presencia de los llamados tapones hidráulicos en las confluencias.

Recomendaciones

Para que el ADP se maneje de forma eficiente y su potencial pueda ser explotado en su totalidad, se recomienda que las personas encargadas de su manipulación y del procesamiento y análisis de los datos, sean capacitados por personal experto, de tal modo que posean un conocimiento amplio y puedan aprovechar al máximo las capacidades del equipo.

En este trabajo se conjugaron áreas afines e importantes como son: la física, la hidráulica, los modelos matemáticos y la programación.

No se recomienda utilizar el ADP M481 en ríos poco profundos (de 1m a 1.5m) porque las características de su Hardware y la frecuencia con la que este equipo trabaja no permiten al sistema electrónico medir las velocidades tridimensionales. Para este tipo de ríos, se tendría que disponer de equipos acústicos que trabajen con frecuencias más altas (por ejemplo, a 3 MHz) porque al ser más corta su longitud de onda, se puede disminuir el tamaño de las celdas permitiendo que el transductor mida la señal reflejada sobre las áreas poco profundas y que sea posible determinar las velocidades tridimensionales.

La información recabada en las mediciones hechas antes de la confluencia (estaciones 7 y 6 ubicadas en los ríos Carrizal y Mezcalapa, respectivamente) fue desestimada debido a que en el análisis del procesamiento de datos se detectó que las velocidades secundarias no estaban totalmente desarrolladas; por lo tanto, no fueron empleados; sin embargo, se recomienda que en este tipo de zonas se lleve a futuro un análisis más detallado.

Referencias

- Ashworth, 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.
- Bathurst, J. C., Thorne, C. R., Hey, R. D. 1979. Secondary flow and shear stress at river bends. *J. Hydraul. Div. ASCE* 105: 1277-95.
- 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., 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, pp. 27–35.
- 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, pp. 27–35.
- Bridge, J.S., Gabel, S.L., 1992. Flow and sediment dynamics in a low sinuosity, braided river: Calamus River, Nebraska Sandhills. *Sedimentology* 39 (1), 125–142.
- Bridge, J.S., 1993. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. In: Best, J.L., Britton, C.S. (Eds.), *Braided rivers: Geological Society of London, Special Publication*, 75, pp. 13–71.

- Bruce L. R., Stephen T. K. 1993. Flow structure at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology II*, 273 – 293.
- Chen, Cheng-Lung, 1989. Power law of flow resistance in open channels. Manning's formula revisited: International Conference on Channel Flow and Catchment Runoff. Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula, May 22–26, 1989, Charlottesville, Virginia, (Proc.), v. 8, p. 17–48.
- 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, p. A5–A10.
- Barua, D.K., Rahman, K.H., 1998. Some aspects of turbulent flow structure in large alluvial rivers. *J. Hydr. Res.* 36 (2), 235–252.
- 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.
- Fulford, J.M., and Sauer, V.B., 1986. Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge in S.Y. Subitsky (ed.) *Selected papers in the hydrologic sciences: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2290*, 154 p.
- Gallgo, M.G., Morell, M.I., Ocampo, C. J., Tarrab, L. y. Vionnet, C. A., 2009. Medición del fenómeno de super-elevación en coincidencia con corrientes secundarias inducidas por efectos centrifugos. *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Salta, Argentina.
- González-Castro, J., Ansar, M., and Kellman, O., 2002. Comparison of Discharge Estimates from ADCP Transect Data with Estimates from Fixed ADCP Mean Velocity Data. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002*: pp. 1–10.

- Gotz, W., 1980. Discussion of secondary flow and shear stress at river bends by Bathurst, J., Thorne, C, Hey, R. J. Hydraul. Div. ASCE 106; 1710-13.
- Guymet L., 1998. Longitudinal dispersion in a sinuous channel with changes in shape. J Hydraul Eng. 124(1):33-40.
- Kennedy Pérez A., Fragoza Díaz F., 2000. "Manual de Aforos", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 137 pp.
- Kikkawa, H., Ikeda, S., Kitagawa, A., 1976. Flow and bed topography in curved open channels. J. Hydraul. Div. ASCE 102: 1327—42.
- INEGI, 2001. Síntesis de Información Geográfica del Estado de Tabasco. 89 pp.
- Lane S.N., Biron P.M., Bradbrook K.F., Butler J.B., Chandler J.H., Crowell M.D., McLelland S.J., Roy A.G., 1998. Integrated three-dimensional measurement of river channel topography and flow processes using acoustic Doppler velocimetry. Earth Surface Processes and Landforms 23: 1247 – 1267.
- Lane 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.
- Miyabe, M., Yu, K., Spasojevic, M., 2003. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. Flow Measurement and Instrumentation 15 (2004), 1–16.
- Müller, D.S. and Wagner, C.R., 2009. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 3A-22, 72 p.
- Mosley, M.P., 1976. An experimental study of channel confluences. Journal of Geology 84, 535–562.

Odgaard, J., 1982. Bed characteristic in alluvial channel bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1268-1281.

Priego G., Hernández A., Gamboa V., Rivera F., 2012. Determinación del tiempo de muestreo y puntos de aforo en una corriente natural. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, noviembre de 2012

11 R.D.I., Inc., 1996, *Principals of operation. A practical primer for broadband acoustic Doppler current profilers* (2nd ed.): R.D. Instruments, Inc., San Diego, California, 61 p.

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

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.

Roberts, M.V.T., 2004. Flow dynamics at open channel confluent-meander bends. Ph.D. Thesis, University of Leeds, Leeds, UK.

Roy, A.G., Bergeron, N., 1990. Flow and particle paths in a natural river confluence with coarse bed material. *Geomorphology* 3, 99–112.

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.

Schemper, T. and Admiraal, D., 2002. An Examination of the Application of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements in a Wide Channel of Uniform Depth for Turbulence Calculations. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002*: pp. 1-9.

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, pp. 196–204.

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.

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.

14 Sontek, 2007. RiverSurveyor System Manual Software Version 4.60: Sontek/YSI Inc, Manual, 182 p.

Szupiany, R.N., Amsler, M.L., Best J.L. and Parsons, D.R., 2007. Comparison of Fixed- and Moving-Vessel Flow Measurements with an aDp in a Large River. *Journal of Hydraulic Engineering*, DOI: 10.1061/ASCE0733-94292007133:121299.

Vide, J. P., 2003. Ingeniería de ríos. México: Alfaomega.

Winterwerp, J.C., Wang, Z.B., Kaaij, T., Verelst, K., Bijlsma, A., Meersschart, Y., Sas, m., 2006. Flow velocity profiles in the Lower Scheldt estuary. *Ocean Dynamics*, 56: 284–294.

3 Wakoon, S.B., Kawahara, Y., Tamai, N., 1991. Three-dimensional flow structure in channel confluences of rectangular section. *Proceedings XXIV Congress. International Association for Hydraulic Research*, Madrid, Spain, pp. A373–A380.

Anexos

1. Artículo derivado de esta tesis: "Determinación del tiempo de muestreo y puntos de aforo en una corriente natural"

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE MUESTREO Y PUNTOS DE AFORO EN UNA CORRIENTE NATURAL

Priego Gastón¹, Hernández Ayuxi¹, Gamboa Víctor¹ y Rivera Fabián¹

¹ DAIA, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán Jalpa de Méndez, Col. La Esmeralda, C.P. 86690, Cunduacán, Tabasco, México.

E-mail: gastonph@hotmail.com, anhc28@hotmail.com, ing_victor_gamboag@hotmail.com, jgfabianrivera@gmail.com.

Resumen

Se describe el procedimiento de aforo de una corriente natural, empleando un molinete hidrométrico de hélice. El aforo se realizó sobre un puente tubular localizado en un tramo recto del cauce. Se realizó un análisis estadístico con la finalidad de determinar el tiempo de muestreo y el número de puntos de aforo óptimos en cada vertical de la sección transversal del río. Se probaron 3 tiempos de muestreo: 30, 60 y 120s; y 10, 5 y 3 puntos de muestreo en cada vertical. A partir de los resultados obtenidos del análisis estadístico, se determinó que la opción óptima fue: utilizar un tiempo de integración de 60 segundos y con 3 puntos en la vertical (20, 60 y 80% de la profundidad). El caudal contra el que se compararon las mediciones se obtuvo del reportado en el Boletín de Información Hidrométrica, Climatológica y de Presas que la Comisión Nacional del Agua emitió en esa misma fecha.

Introducción

El aforo de corrientes naturales es una práctica común en el mundo; sin embargo, en muchas ocasiones se ha mecanizado y se aplica por igual en cualquier tipo de corriente, a pesar de que cada una de ellas presenta características propias. En este trabajo, se muestra el procedimiento y resultados obtenidos al aforo sobre un puente de una sección de un río, ubicada en el río Samaria, en el estado de Tabasco, México (Figura 1). En la medición se empleó un molinete hidrométrico marca SIAP, modelo MH11 (INSTARG SIAP, 2011) y se aplicaron las recomendaciones de aforo establecidas por la Organización Meteorológica Mundial en su Manual Guía de Prácticas Hidrológicas (OMM, 1994).

Existen diferentes maneras de realizar aforo con molinete (BASÁN, 2002):

- Método por vadeo
- Método desde puentes
- Método del teleférico o cable vagoneta
- Método desde bote o con doble torno

En este caso en particular se empleó el método de aforo en puentes. La recomendación es que las mediciones deben realizarse sobre puentes de un solo claro (APARICIO, 2009); sin embargo, en el estado de Tabasco, como en algunos otros, es muy común encontrar este tipo de estructuras dada la amplitud de los ríos. Debido a esto, se debe poner especial cuidado en la realización del aforo, especialmente al centro de los claros entre las pilas del puente. Con el objetivo de disminuir errores producidos por las distorsiones en las líneas de corriente por efecto de las pilas, se construyó un contrapeso (escandallo) con un estabilizador de flujo (PRIEGO, 2012).

Además, se realizó un análisis estadístico con el propósito de determinar el tiempo de muestreo óptimo, y seleccionar el mejor método de aforo de acuerdo al número de puntos de medición en cada vertical, lográndose resultados estadísticos aceptables. Los resultados obtenidos, fueron comparados con los resultados reportados en la Estación Hidrométrica Samaria de la Comisión Nacional del Agua, organismo encargado del manejo de la información hidrométrica en el país.



Figura 1. Sitio del aforo

Metodología

El puente tubular mide 163 metros de largo y consta de 10 claros entre apoyos con separaciones promedio de 15 metros. Se puso especial cuidado en seleccionar un puente que se encontrara en un tramo recto del río, de tal manera que las líneas de corriente fueran perpendiculares a la sección de aforo. Se realizó el levantamiento batimétrico de la sección transversal sobre la que se llevaron a cabo las mediciones. Para ello se empleó un sensor de profundidad marca Fish Finder y se tomó como referencia la lámina de agua que se tuvo durante la medición.

El equipo de aforo consistió en: un molinete hidrométrico con contador digital para obtener el número de revoluciones, escandallo, sistema mecánico para facilitar el ascenso y descenso del equipo mediante un cable de sujeción de acero (Figura 2).

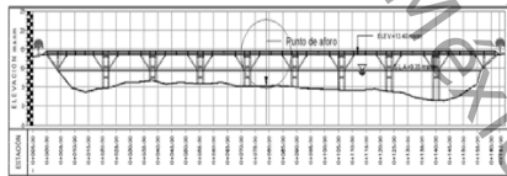


1 **Figura 2. a) Escandallo, b) Molinete MHT1, c) Sistema mecánico de ascenso y descenso del escandallo y molinete, d) Sensor de profundidad, e) Contador digital**

Tareas preliminares

Determinación de tiempo de muestreo.

Se seleccionó un punto arbitrario hacia el centro de la sección transversal, cuidando que este punto quedara entre uno de los claros del puente, estación 0+079 (Figura 3).



1 **Figura 3. Ubicación de estación de aforo**

Con el sensor de profundidad se midió el tirante y se bajó el equipo para realizar las mediciones tomando 10 puntos equidistantes sobre la vertical (Figura 4), en cada punto se registraron 10 medidas considerando tres distintos tiempos de medición: 30, 60 y 120 segundos (Tabla 1).

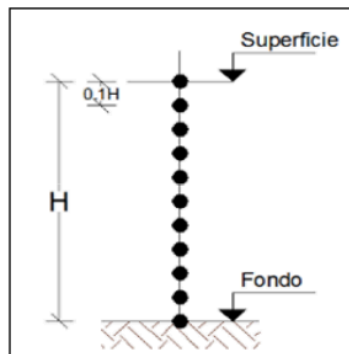


Figura 4. Puntos medidos sobre la vertical

1 La velocidad en cada punto se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$v = \frac{an}{t} \quad (1)$$

En donde:

v = velocidad en m/s

a = paso geométrico de la hélice, 0.25.

n = número de revoluciones

1 t = tiempo de medición en segundos.

A partir de un análisis estadístico de las velocidades obtenidas (HOLMAN, 1990), y su desviación estándar, se calculó la velocidad media por el método de puntos reducidos para uno, dos, tres, cinco y diez puntos (Tabla 2). Después de comparar estos resultados se determinó el número óptimo de puntos de medición de la velocidad por cada vertical.

Puntos de aforo

1 En la determinación del número de verticales en la sección, la Organización Meteorológica Mundial recomienda que el espacio entre dos verticales sucesivas no debe superar el 1/20 del ancho total y que el caudal entre esas dos verticales no deberá ser superior al 10% del caudal total (OMM, 1994). Sin embargo, ya que el aforo se realizó desde un puente tubular con más de un claro libre, la determinación del espaciamiento entre verticales estuvo en función de los claros del puente, tratando de ubicar cada vertical lo más alejada posible de las pilas del puente, para de esta manera reducir los efectos de turbulencia originados por las mismas. Se realizó el aforo en 10 verticales, tal y como se recomienda en la literatura (BASAN, 2002). En la Figura 5, se muestra un esquema de la sección transversal.

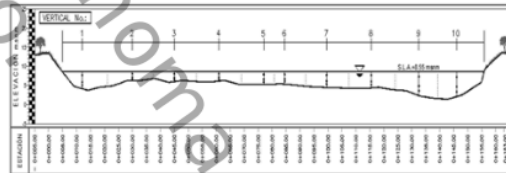


Figura 5. Señalamiento de verticales en la sección transversal

1 Una vez identificadas las verticales se inició el aforo, siguiendo la convención de margen izquierda a margen derecha (PÉREZ & DÍAZ, 2000). Se dividió el ancho de la sección transversal en dovelas para posteriormente con el software AutoCad medir el área hidráulica de cada una de ellas (Figura 9). Se decidió considerar un tiempo de muestreo de 60 segundos y calcular la velocidad media con el método de tres puntos, tal como se detalla más adelante en el apartado de resultados. Por lo tanto, se midió la velocidad a 20%, 60% y 80% de la altura (H), medida a partir de la superficie libre del agua; además, se midió la velocidad en la superficie y en el fondo para completar el perfil de velocidades y dibujar la curvas isotáquicas con el software CivilCad. La Figura 6 esquematiza los puntos de medición.

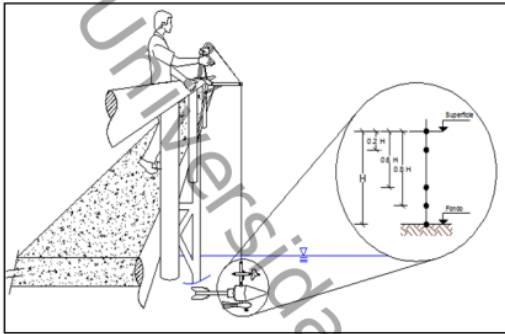


Figura 6. Puntos de medición de la velocidad

En cada punto se realizaron cinco mediciones de velocidad, las cuales se promediaron para reducir los errores de medición y generar mejores resultados.

Se calculó la velocidad media con la siguiente expresión correspondiente al método de tres puntos. (OMN, 1994):

$$\bar{v} = 0.25(v_{0.2} + 2v_{0.6} + v_{0.8}) \quad (2)$$

Además, se obtuvo la velocidad media con el método de dos puntos, para poder comparar los resultados con los reportados en la Estación Hidrométrica Samaria.

$$\bar{v} = 0.50(v_{0.2} + v_{0.8}) \quad (3)$$

Se calculó el caudal que circula por cada dovela, luego de aplicar la ecuación de continuidad:

$$q_i = A_i v_i \quad (4)$$

En donde:

q_i = caudal líquido en cada dovela, en m^3/s

A_i = área hidráulica de la dovela, en m^2

v_i = velocidad media de la corriente medida en la dovela, en m/s

Se sumaron los gastos de todas las dovelas, para obtener así el gasto total que circula por la sección transversal del río Samaria. El caudal obtenido se comparó con el caudal reportado en el Boletín de Información Hidrométrica, Climatológica y de Presas que emite el personal de la CONAGUA (Organismo operador y rector en materia de aguas nacionales en México), en la misma fecha en la que se realizaron las mediciones.

Resultados

La Tabla 1 muestra las velocidades obtenidas en los diez puntos tomados sobre la vertical seleccionada, para los tres distintos tiempos de integración, así como las respectivas desviaciones estándar de cada conjunto de mediciones.

Tabla 1. Velocidades promedio y desviación estándar

h m	VELOCIDADES PROMEDIO (m/s)					
	T=30 s		T=60 s		T=120 s	
	VELOCIDAD	DES. STD	VELOCIDAD	DES. STD	VELOCIDAD	DES. STD
1	1.664	0.016	1.683	0.018	1.686	0.009
0.9	1.758	0.031	1.773	0.030	1.687	0.012
0.8	1.736	0.068	1.759	0.028	1.755	0.030
0.7	1.653	0.070	1.672	0.038	1.700	0.020
0.6	1.613	0.098	1.587	0.036	1.619	0.026
0.5	1.570	0.058	1.587	0.021	1.484	0.025
0.4	1.435	0.038	1.413	0.042	1.524	0.020
0.3	1.545	0.037	1.484	0.033	1.474	0.023
0.2	1.353	0.031	1.363	0.016	1.340	0.008
0.1	1.258	0.048	1.238	0.042	1.300	0.014
PROMEDIO =	1.559	0.049	1.556	0.030	1.557	0.019

En las Figuras 7,8 y 9, se muestran los perfiles de velocidades obtenidos en distintos intervalos de tiempo (30, 60 y 120 segundos) para una misma vertical.

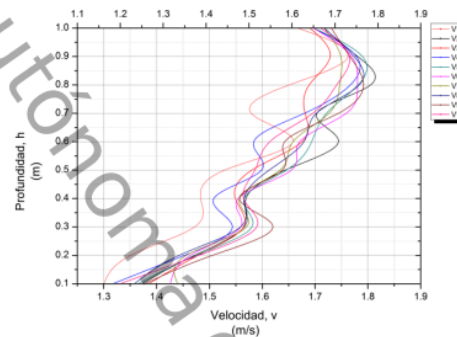


Figura 7. Perfil de velocidades (t=30 s).

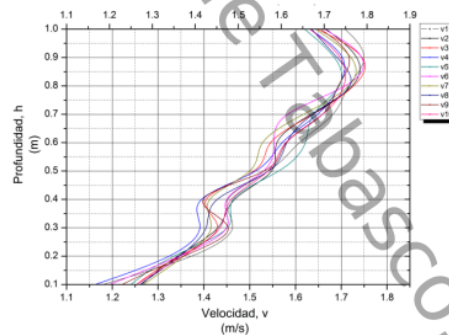


Figura 8. Perfil de velocidades (t=60 s).

1

1

1

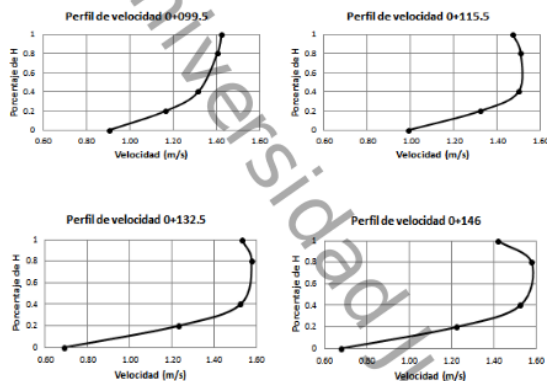


Figura 12. Perfiles de Velocidad

Se muestran en la Figura 13, las curvas isotáquicas de la sección transversal del Río Samaria.

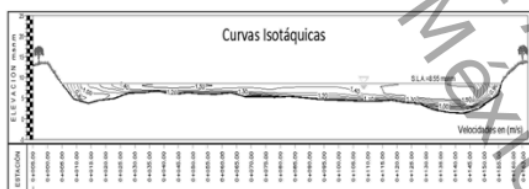


Figura 13. Curvas isotáquicas

El aforo medido fue de 777.58 m³/s, mientras que en la Estación Hidrométrica Samaria se reportó un caudal de 917 m³/s en el Río Samaria, en el mismo día en el que se realizó el aforo sobre el puente tubular, ver Figura 14.

ORGANISMO DE CUENCA FRONTERA SUR DIRECCIÓN TÉCNICA Sistema de Información de Cuenca (SIC) del Río Samaria						
Boletín de Caudal						
No.	ESTACION	ESC	GASTO (m ³ /s)	Precipitación (mm)	NAM0	NAM1
1	Platanar	0	0.0	0.0	32.28	34.65
2	Samaria	13.15	917.00	0.0	14.90	18.50

FUENTE: CONAGUA

Figura 14. Boletín Hidrométrico

1 Conclusiones

La zona del río Samaria, en donde se llevó a cabo el aforo, tiene un ancho de 163 m, por lo que, con este proyecto, se buscó optimizar no sólo el tiempo de medición, sino también la cantidad de puntos a medir.

En la Tabla 1 se observa que la velocidad media obtenida usando diez puntos es muy similar para los tres intervalos de tiempo considerados. Sin embargo, considerando la desviación estándar y con base en las gráficas presentadas en las Figuras 7, 8 y 9, se observa que hay mayor uniformidad en los perfiles de velocidad conforme se incrementa el tiempo de medición, es decir, para un tiempo de 120 segundos se presentan un comportamiento más uniforme que el que se presenta para 30 y 60 segundos.

Después de aplicar el método de puntos reducidos (Tabla 2), se tiene una desviación estándar menor para tres y cinco puntos. Además se observó que no existen variaciones significativas entre los intervalos de medición de 60 y 120 segundos, por lo que el aforo a lo largo de la sección transversal seleccionada se realizó considerando un tiempo de medición de 60 segundos, a 0.20, 0.60 y 0.80 del fondo a partir de la superficie libre del agua. Este método permite validar estadísticamente el tiempo de integración y el número de puntos en la vertical. No se puede aplicar de manera general para otras corrientes, por lo que cada una deberá seguir el procedimiento descrito con el fin de validar los métodos.

Después de realizar el aforo de velocidades a lo largo de las 10 verticales marcadas en la sección transversal se puede ver que el perfil de velocidades obtenido en cada una de ellas es muy similar al que se muestra en la literatura, salvo el caso de las verticales correspondientes a las estaciones 0+011.40, 0+077 y 0+084.50; esta diferencia se atribuye al efecto local de las pilas sobre las líneas de corriente ya que la primera sección se encuentra cercana al enfoque del puente y la 0+077 y 0+084.50 se encuentran al centro del cauce, en el mismo claro y ambas cercanas a las pilas.

El caudal total calculado con el método de tres puntos es de 777.58 m³/s, el cual resulta 139.42 m³/s menor que el registrado en la Estación Samaria, y aunque ambos puntos de aforo se encuentran en el mismo río, la distancia entre ellos es de 14.80 Kilómetros, existe aguas abajo de la Estación Hidrométrica una bifurcación del río Samaria el cual vuelve a formar uno solo cauce a 5 km aguas arriba del puente de tubos, por lo que se esperaba ver reflejadas pérdidas en el caudal. Aunado a ello, no existe precisión en la manera en que el personal de la Estación mide la profundidad total en cada punto de sondeo y la profundidad de medición de cada punto, lo cual ocasiona que se reporten caudales con variaciones en mas o en menos al que circula realmente por la sección transversal establecida.

Se estimó además el caudal total con el método de dos puntos, el cual fue de 758.41 m³/s, ya que este método es el empleado por la CONAGUA; sin embargo el método para la determinación de la velocidad media debe ser seleccionado en función de la precisión que se desee obtener en el aforo y del tiempo disponible para realizarlo. En cuanto a las curvas isotáquicas dibujadas, se tienen las mayores velocidades hacia el centro de la sección y decrecen hacia las orillas y el fondo.

Referencias

- 1.- Kennedy Pérez A., Fragoza Díaz F. (2000). *Manual de Aforos*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 137 pp.
- 2.- Velázquez Villegas G. (1994), *Los recursos Hidráulicos del estado de Tabasco*. Cap 1. Características Geográficas del Estado de Tabasco, pp. 242.
- 3.- Ochoa Alejo L. (2007). *Métodos y Sistemas de Medición de Gasto*, Comisión Nacional del Agua, pp. 39.
- 4.- Holman Jack P. (1990). *Métodos Experimentales para Ingenieros*. Cuarta edición, McGraw-Hill. pp. 553.
- 5.- OMM-Nº 168. (1994). *Guías de Prácticas Hidráulicas*. Quinta Edición, Organización Meteorológica Mundial. pp. 818.
- 6.- Basán Nickisch, Mario (2002). *Aforadores de Corriente de Agua*, sitio web Instituto Nacional de Tecnología del Agua, entrada 2002, consultado el 5/11/2011. URL: www.inta.gov.ar/santiago/info/documentos/agua/0006.pdf
- 7.- INSTARG SIAP S.A. (2011). Recuperado el 13 de diciembre de 2011. URL: www.instarg-siap.com.ar/M11%20MOLINTE%20HIDROMETRICO.html
- 8.- CONAGUA (2011). *Boletín de Información Hidrométrica, Climatológica y de Presas*. Consultado el 5/12/2011.
- 9.- Priego G., Gamboa V., Rivera F., Méndez S. (2012). *Diseño y construcción de un contrapeso para molinete universal*, Aprobado para su publicación en la AMH XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, México.

CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTES SECUNDARIAS EMPLEANDO UN PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER (ADP)

ORIGINALITY REPORT

10%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	id.scribd.com Internet	964 words — 6%
2	documen.site Internet	107 words — 1%
3	www.ideals.illinois.edu Internet	102 words — 1%
4	repositorioinstitucional.uson.mx Internet	101 words — 1%
5	pubs.usgs.gov Internet	85 words — 1%
6	www.researchgate.net Internet	63 words — < 1%
7	es.wikipedia.org Internet	45 words — < 1%
8	docplayer.es Internet	37 words — < 1%
9	www.scribd.com Internet	31 words — < 1%
10	coek.info Internet	26 words — < 1%

11 fdocuments.ec 26 words — < 1%
Internet

12 Riley, J. D., B. L. Rhoads, D. R. Parsons, and K. K. Johnson. "Influence of junction angle on three-dimensional flow structure and bed morphology at confluent meander bends during different hydrological conditions : INFLUENCE OF JUNCTION ANGLE AT CONFLUENT MEANDER BENDS", Earth Surface Processes and Landforms, 2014. 20 words — < 1%
Crossref

13 archivos.ujat.mx 18 words — < 1%
Internet

14 Gastón Priego-Hernández, Héctor Rubio-Arias, Fabian Rivera-Trejo. "ADCP, MULTI-FREQUENCY ANALYSIS FOR FLOW MEASUREMENTS IN RIVERS", Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus, 2019 16 words — < 1%
Crossref

EXCLUDE QUOTES ON

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES

EXCLUDE MATCHES

OFF

< 15 WORDS