

CAPÍTULO 3

Campaña de campo

3. Campaña de campo

La zona de estudio seleccionada para este análisis, contiene la desembocadura del río Tonalá y su llanura de inundación asociada. Sin embargo, antes de realizar la conceptualización del área de estudio en el modelo numérico, es necesario entender el funcionamiento hidráulico de este sistema en condiciones normales de operación. Para ello, como parte de los trabajos asociados a la Tercera Fase del Plan Hídrico Integral de Tabasco, se diseñó una campaña de mediciones intensa con el propósito de caracterizar los flujos, las mareas, y la salinidad en la desembocadura del río (Pedrozo-Acuña et al. 2010). Adicionalmente, se utilizará esta información para la adquisición de un valioso conjunto de datos necesarios para la validación de la herramienta numérica seleccionada.

Las mediciones que se describen en este trabajo incluyen la batimetría y los caudales en puntos clave a lo largo del río. El conocer los gastos y niveles de agua en la desembocadura permiten definir las condiciones iniciales y de frontera en el modelo hidrodinámico. A continuación, se describen brevemente las mediciones realizadas durante dicha campaña.

3.1 Zona de estudio.

El área de estudio contiene la desembocadura del río Tonalá al Golfo de México, tal y como se presenta en la Figura 3.1. El área comprende una laguna litoral al este de la desembocadura, con la presencia del arroyo Chicozapote y amplias zonas de manglares y llanuras de inundación. Dado que el río Tonalá define la frontera natural entre los Estados de Veracruz y Tabasco, existen zonas urbanas de ambos estados localizadas en la región. En Veracruz, estas son Tonalá, Agua dulce y la población de Gavilán norte. Mientras que en Tabasco se encuentran Cuauhtemoczin y Villa la Venta. La región representa un área de aproximadamente 350km². (Pedrozo-Acuña et al., 2010)

Como se observa en la Figura 3.1, el río Tonalá recibe aportes del río Agua dulcita en Veracruz, que cruza la población del mismo nombre y descarga escurrimientos de este estado a través del río Tonalá. A pesar de que en el pasado se han registrado inundaciones en la población de Agua dulce, estas están asociadas a la poca capacidad hidráulica del río Agua dulcita y no a eventos extraordinarios en el río Tonalá.

Sin embargo, es claro que entre ambos sistemas existe interacción, la cual será considerada a través de la definición de un gasto promedio para el río Agua dulcita.

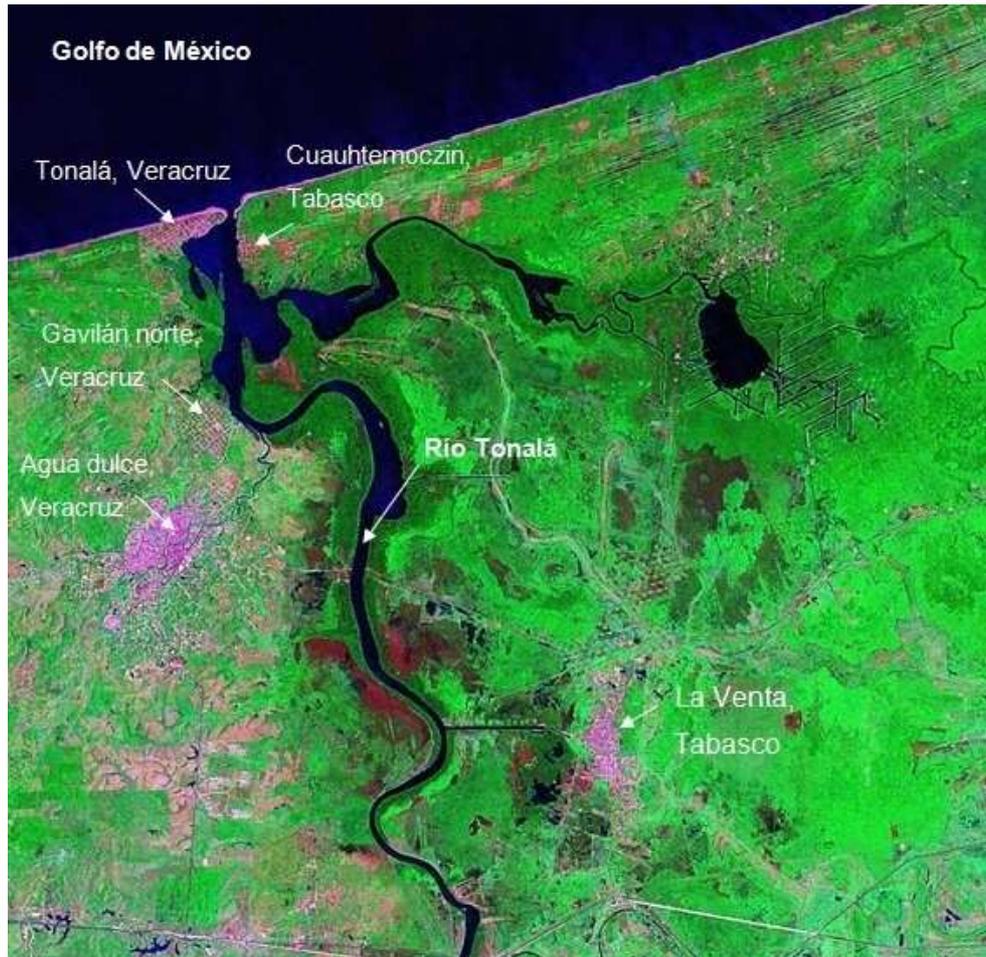


Figura 3.1 Ubicación del Río Tonalá en la costa del Estado de Tabasco, México, con nombres de poblaciones cercanas.

3.2 Mediciones

Es sabido que la correcta modelación de flujos de inundación, requiere de información topográfica y batimétrica precisa y de buena resolución espacial, dado que la calidad de la información condiciona en gran medida los resultados numéricos asociados a la hidrodinámica. Evidentemente, una mayor resolución y precisión de la información reduce la incertidumbre en la identificación de zonas vulnerables ante inundaciones.

Dentro de las mediciones puntuales de flujo y nivel obtenidas, se incluyen aquellas recabadas por medio del anclaje de dos instrumentos distintos (Figura 3.2, panel izquierdo) en los sitios identificados por: 1) la desembocadura y 2) un punto ubicado 12 km aguas arriba de la desembocadura.

Además de estas mediciones estáticas, se realizaron mediciones dinámicas del flujo (caudal) en 4 secciones transversales dentro del sistema (ver Figura 3.2, panel derecho) a fin de evaluar el comportamiento hidráulico del mismo durante condiciones normales de operación.



Figura 3.2 Panel izquierdo: Localización de los instrumentos anclados en el río Tonalá (○). Panel derecho: Ubicación de los transectos recorridos con el corrientímetro ADP (a) en la desembocadura durante un ciclo de 12 horas, (b) en tributario al este del Río Tonalá, (c) en el tributario Agua Dulcita, y (d) en ubicación del corrientímetro vector. [Imagen obtenida de GoogleEarth].

3.2.1 Batimetría

Las mediciones de batimetría en el sistema del Río Tonalá son de suma importancia para lograr una correcta representación numérica de los flujos en este sistema.

Para la adquisición de esta información se utilizó una ecosonda de doble frecuencia sincronizada a un sistema de GPS diferencial (base y móvil) sobre una embarcación. La antena del GPS móvil se colocó en el extremo superior de una varilla de 2m de longitud fijada a la embarcación (Figura 3.3). En el extremo inferior de la varilla se colocó el transductor de la ecosonda, el cual se ubicó algunos centímetros bajo el agua. Los datos que proporcionan la ecosonda y el GPS son complementarios. La ecosonda nos aporta datos de profundidad relativos a la posición del transductor (distancia entre el transductor y el lecho del río/laguna), y el GPS diferencial nos aporta datos de la posición geográfica del transductor respecto al elipsoide. Los datos de elevación resultantes pueden ser referidos posteriormente a distintos niveles de referencia (ej. nivel medio del mar, etc.).



Figura 3.3 Sistema de medición de batimetría. Panel superior: Ecosonda controlada desde una computadora portátil. Panel inferior: antena del GPS diferencial (rover) sujeta a la embarcación y al transductor de la ecosonda por medio de una barra metálica.

En consecuencia, es necesario contar con un nivel de referencia que sea independiente de las variaciones del nivel del agua, debido a que esta puede verse modificada por la crecida de ríos, mareas y gradientes de presión por viento. De tal modo, que los datos obtenidos por la ecosonda, representan la distancia entre el transductor y el fondo de lacustre o marino, según sea el caso.

Para referir los datos de elevación al nivel medio del mar (nmm) se utilizó la información de nivel del agua registrada con el sensor de presión del *CTD diver* que se instaló en la boca del río Tonalá, corregida con presión atmosférica registrada con el baro-diver afuera del agua. El valor promedio de profundidad durante el periodo correspondiente a la campaña de campo en el sitio donde se ancló el *CTD diver* (Figura 3.2) es de 8.12 m. El punto más cercano de batimetría tiene un valor de -20.53 m respecto al elipsoide. Por lo tanto el nivel medio del mar se encuentra 12.41 m por debajo del elipsoide (para el periodo correspondiente a la campaña de campo). De esta manera, los datos batimétricos referidos al elipsoide pueden ser referidos al nivel medio del mar.

Por otra parte es esencial contar con datos de la línea de costa, ya que ésta es la que delimita los cuerpos de agua. La línea de costa se digitalizó a partir de una imagen satelital georeferenciada de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). En la Figura 3.4 se puede observar la imagen satelital y la línea de costa digitalizada, junto con las trayectorias de la embarcación durante el levantamiento batimétrico.

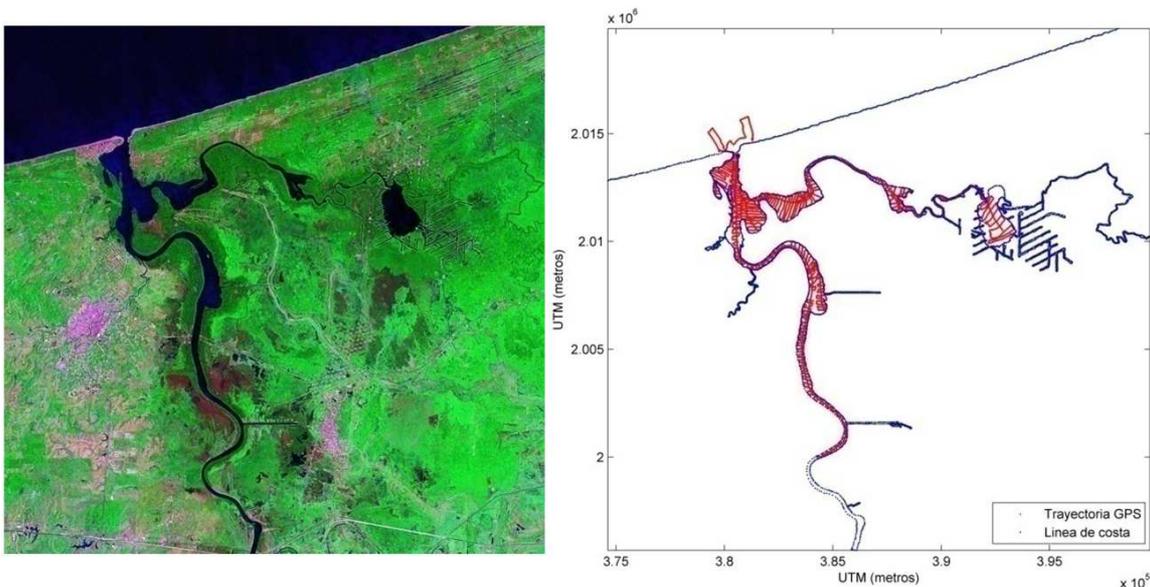


Figura 3.4 Panel izquierdo: Imagen satelital del área de estudio. Panel derecho: línea de costa digitalizada (en azul) indicando las trayectorias de la embarcación registradas con el GPS diferencial (en rojo).

3.2.2 Velocidad del Flujo

3.2.2.1 Flujo en la desembocadura del Río Tonalá (argonauta)

El argonauta es un corrientímetro monostático Doppler, el cual mide la velocidad de la corriente en toda la columna de agua y posee además un sensor giro compás para registrar la dirección de la corriente. Para la instalación del argonauta se utilizó una pirámide metálica (Figura 3.5), en la cual se colocó además un CTD diver. Los instrumentos se anclaron en la desembocadura (Figura 3.2), a una profundidad de aproximadamente 8.12 m.

El CTD diver es un pequeño instrumento (aprox. 15 cm de largo) que mide conductividad, temperatura, y profundidad (**C**onductivity-**T**emperature-**D**epth). Los datos de profundidad CTD diver deben ser corregidos por la presión atmosférica, ya este instrumento mide la presión total (presión atmosférica + presión de la columna de agua). Estos datos, especialmente los de variación en el nivel del agua, son de gran utilidad para calibrar y validar el modelo.

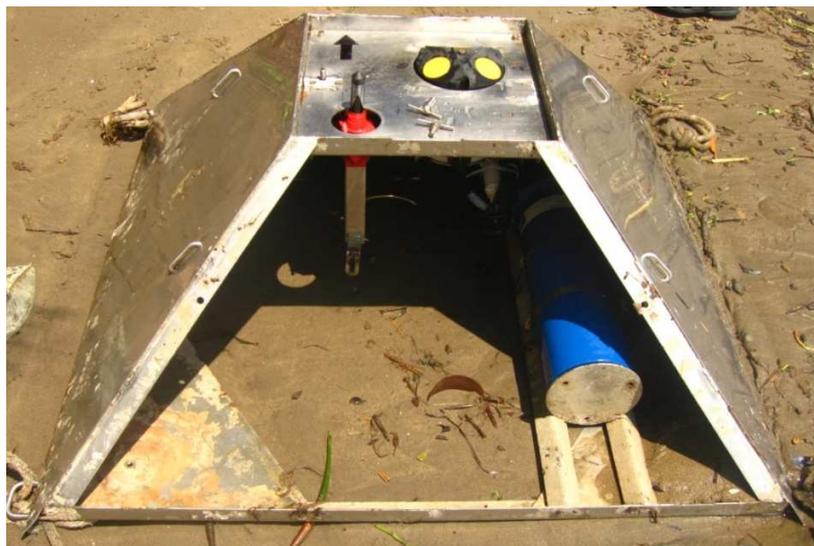


Figura 3.5 Configuración de la estructura utilizada para anclar el corrientímetro (argonauta) en la desembocadura del río Tonalá.

Se obtuvieron series temporales de velocidad y dirección de flujo con el argonauta (Figura 3.6).

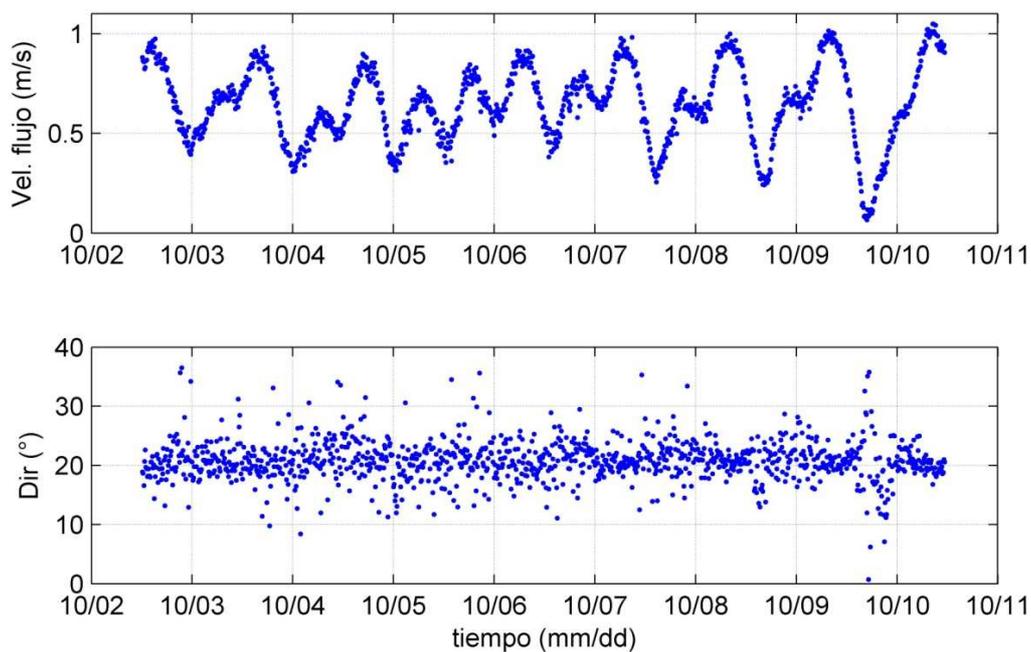


Figura 3.6 Series temporales de velocidad y dirección de flujo medidas con el argonauta en la desembocadura del río Tonalá.

Se observa que la velocidad del flujo (Figura 3.6, panel superior) depende en gran medida de la variación del nivel del mar (Figura 3.7), siendo éstas inversamente proporcionales. Es decir, al aumentar el nivel del mar, disminuye la velocidad de la corriente y viceversa. En algunas ocasiones el flujo disminuye notablemente, llegando incluso a detenerse al final del día 10/09. Durante el periodo correspondiente a la campaña de campo, se observó un valor medio de velocidad de la corriente de 0.65 m/s, un valor mínimo de 0.06 m/s, y un valor máximo de 1.05 m/s.

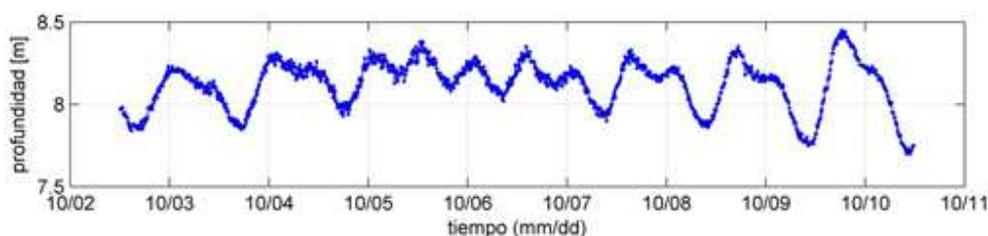


Figura 3.7 Profundidad en la desembocadura del Río Tonalá.

En cuanto a la dirección de la corriente, ésta se mantiene más o menos constante alrededor de los 20° azimutal, lo que corresponde a una dirección persistente hacia el NNE (Figura 3.7, panel inferior).

3.2.2.2 Flujo a 12 km de la desembocadura del Río Tonalá (vector)

Para las mediciones de flujo a 12 km de la desembocadura se utilizó un corrientímetro tridimensional en forma de tripié conocido como *vector* (Figura 3.8). Este instrumento, además de aportar datos de la velocidad del flujo en las tres dimensiones, aporta datos del nivel del agua, ya que cuenta con un sensor de presión. Estos datos son de gran utilidad tanto para forzar el modelo (condiciones iniciales y de frontera) como para calibrarlo.

El instrumento se configuró para realizar mediciones cada 10 minutos y durante 1 minuto (a 1 Hz). Las 60 mediciones realizadas cada 10 minutos, se promedian para obtener un solo valor de velocidad cada 10 minutos. El instrumento mide la dirección y magnitud del flujo en u (W-E), v (N-S), y w (\uparrow - \downarrow).



Figura 3.8 Corrientímetro vector utilizado para medir flujo y nivel a 12 km de la desembocadura del río Tonalá.

El instrumento se colocó a una profundidad de aproximadamente 4.8 m y a 12 km de la desembocadura. El instrumento proporciona información del flujo en tres dimensiones, además de datos de nivel del agua a partir de datos de presión. Los datos de presión están dados en decibares (db), y un db equivale aproximadamente a un metro de columna de agua (m.c.a.), por lo que la presión se presenta en unidades de metros. Por otro lado, a partir de las tres componentes de velocidad de flujo, se puede calcular la dirección y magnitud del flujo a cada paso de tiempo.

En la Figura 3.9 se muestran las series temporales de profundidad (variación del nivel, velocidad y dirección de flujo). Se observa que la velocidad de la corriente depende claramente de la variación de nivel del mar aún a 12 km de la desembocadura, siendo estas inversamente proporcionales. La amplitud de la variación de ambas variables aumenta hacia el final del periodo correspondiente a la campaña de campo (mareas vivas). El valor medio observado de velocidad de la corriente fue de 0.53 m/s, el valor mínimo de 0.35 m/s, y el máximo de 0.69 m/s.

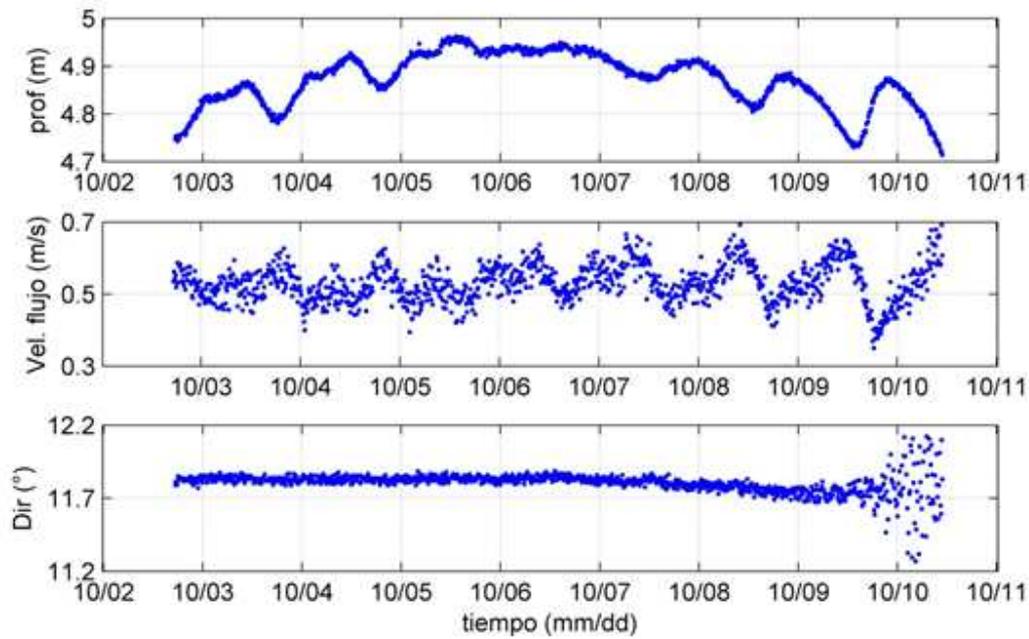


Figura 3.9 Series temporales de nivel, velocidad, y dirección de la corriente, medidas con el corrientímetro vector a 12 km de la desembocadura del río Tonalá.

3.2.3 Caudales

Es de suma importancia el conocer la cantidad de agua que entra y sale por la desembocadura en cuestión y su interacción con las corrientes generadas por los cambios en el nivel del mar. En este caso se analiza el caudal en 4 transectos del sistema del río Tonalá (Figura 3.2): (a) en la desembocadura del Río Tonalá, (b) en tributario al este del canal principal (c) en Agua Dulcita, y (d) a 12 km de la desembocadura del río Tonalá coincidente con la ubicación del corrientímetro *vector*.

Sistema de medición

Se utilizó un correntómetro acústico ADP (Acoustic Doppler Profiler) de la marca Sontek con el propósito de obtener perfiles de velocidad a lo largo de la columna de agua y a través de cada transecto. La ubicación de los transectos recorridos se señala en la Figura 3.2. El ADP se instaló en una embarcación (Figura 3.10) con la cual se recorrió los transectos señalados.



Figura 3.10 Perfilador de corrientes (ADP) instalado en la embarcación utilizada para recorrer los 4 transectos señalados.

A partir de los datos de velocidad medidos con el ADP, es posible conocer la magnitud y dirección del caudal en la sección transversal indicada en cada caso. Estos datos son de gran utilidad para validar el modelo numérico y garantizar la obtención de buenos resultados a partir de las simulaciones.

Los transectos mencionados se recorrieron varias veces seguidas por hora (Figura 3.11), para así obtener varios valores de caudal por hora. A partir de estos datos es posible contar con un valor de caudal más confiable al poder calcular un caudal promedio y máximo por cada hora durante el ciclo de 12 hrs en el transecto de la desembocadura del canal principal, lo que se traduce en una serie temporal de caudal promedio (Figura 3.12) y otra de caudal máximo (Figura 3.13). En el resto de los transectos se cuenta con un solo valor de caudal promedio y caudal máximo.

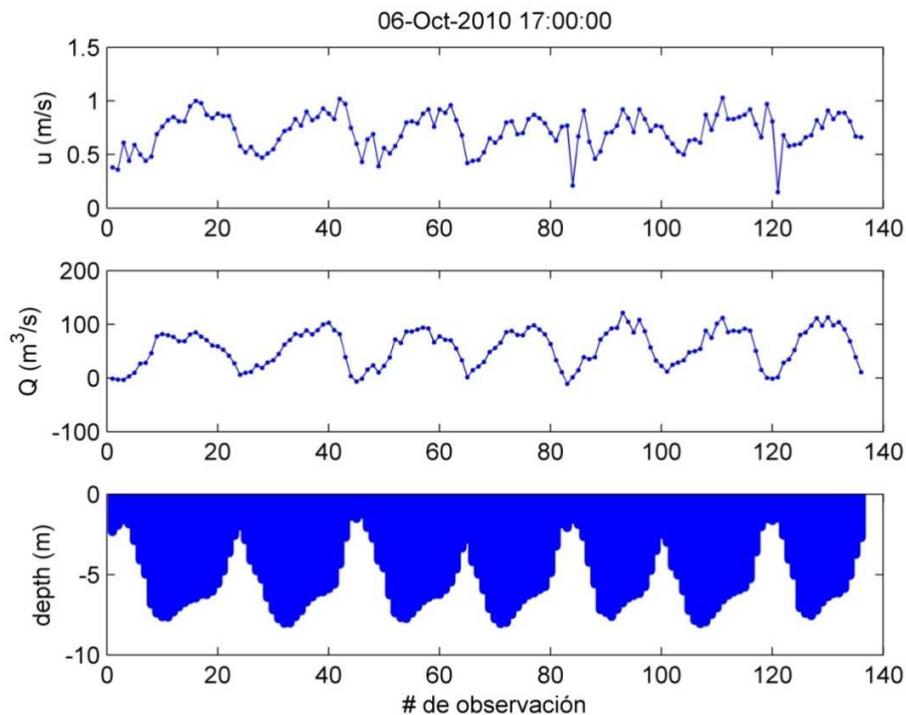


Figura 3.11 Ejemplo de datos obtenidos con el corrientímetro ADP a lo largo del transecto ubicado en la desembocadura del río Tonalá para una hora (17 hrs) durante el ciclo de 12 h. Se muestran series temporales de flujo, gasto, y profundidad de los 7 recorridos que corresponden a las 17 hrs.

3.2.3.1 Caudal en la desembocadura del Río Tonalá

El comportamiento del caudal medio, Q_{prom} , y el caudal máximo, Q_{max} , en la desembocadura del Río Tonalá en relación con la variación del nivel del mar se ilustra en las Figuras 3.13 y 3.14. En la parte superior de cada figura se muestra la magnitud del caudal cada hora durante medio ciclo de marea (12 hrs aproximadamente), y en la parte inferior de la figura se muestra la variación del nivel del mar para el mismo periodo. Tanto para Q_{prom} como para Q_{max} se observa que la magnitud y dirección del flujo que pasa por la desembocadura está condicionada en gran medida por la variación de nivel del mar, η , medida con el CTD diver en la desembocadura.

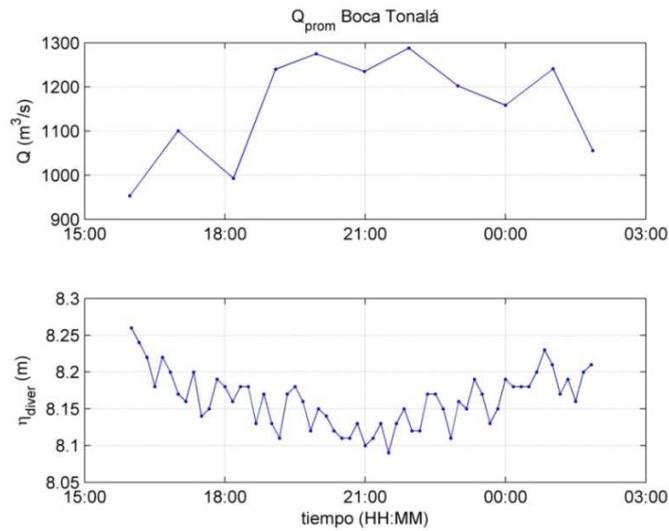


Figura 3.12 Serie temporal de caudal promedio, Q_{prom} , en la desembocadura del Río Tonalá (panel superior), y nivel del mar, η , (panel inferior).

El valor del caudal en la desembocadura del río (Q_{prom} y Q_{max}) es siempre positivo, es decir, el flujo dominante es siempre en dirección hacia el mar. En cuanto a la magnitud del caudal, ésta es máxima durante la bajamar, cuando el flujo del río es dominante y encuentra menor resistencia. Asimismo, durante la pleamar, el valor del caudal disminuye, cuando las corrientes del río y de la marea se oponen.

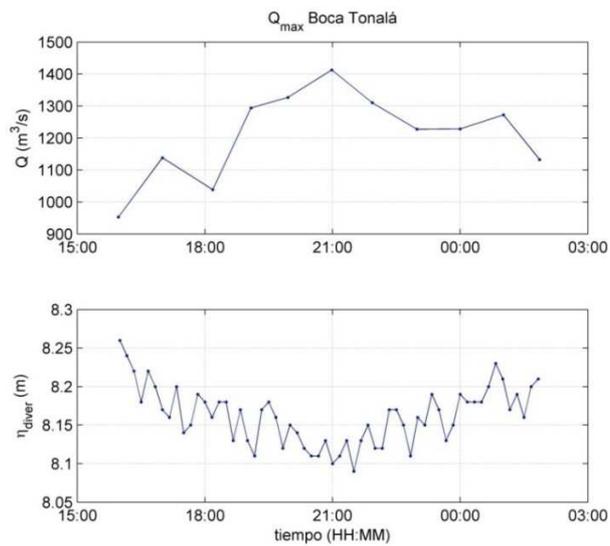


Figura 3.13 Serie temporal de caudal máximo, Q_{max} , en la desembocadura del Río Tonalá (panel superior), y nivel del mar, η , (panel inferior).

El valor máximo de caudal promedio medido durante el ciclo de 12 horas fue de 1288 m³/s, el mínimo de 953.1 m³/s, y el valor medio de 1158.4 m³/s (Figura 3.14). Para la serie temporal del caudal máximo registrado cada hora, se encontró un valor máximo de 1413 m³/s, mínimo de 953.1 m³/s y medio de 1212.3 m³/s (Figura 3.13).

3.2.3.2 Caudal en pequeños tributarios

Se realizaron mediciones de flujo a lo largo de dos transectos en tributarios del Río Tonalá, uno ubicado al este del canal principal del río y otro al suroeste denominado Agua Dulcita (Figura 3.2, panel derecho, (b) y (c)).

En el tributario al este del canal principal el caudal promedio es de 112.24 m³/s, y el caudal máximo es de 199.2524 m³/s. Mientras que en el tribuario Agua Dulcita los caudales son mucho menores, siendo el caudal promedio de 22.46 m³/s, y el caudal máximo de 33.91 m³/s.

3.2.3.3 Caudal a 12 km de la desembocadura del Río Tonalá

Adicionalmente, se realizó un transecto de mediciones con el ADP coincidente a la ubicación del vector, señalado con una línea amarilla en la Figura 3.3. El valor promedio de caudal en este punto resultó de 894.65 m³/s y el valor máximo de 939.71 m³/s. El valor promedio (Q_{ADP} de aquí en adelante) se utilizará posteriormente para obtener una serie temporal de Q en el transecto ubicado a 12 km de la desembocadura.

El ADP también registra datos de profundidad y distancia entre los perfiles de velocidad. A partir de esta información se puede calcular el área total de la sección transversal de la cuenca del río frente a la ubicación del vector, A . Conociendo ese dato, es posible hacer un cálculo aproximado del caudal a partir de la serie temporal de velocidad medida con el vector, Q_v . Ya que el vector se encuentra cerca del lecho y de la margen del río, la velocidad medida es menor que la que existe cerca de la superficie. En consecuencia, el cálculo de Q estará subestimado. Este error podría disminuir al utilizar un factor de corrección, $f_c = Q_{ADP}/Q_v$, en base al cálculo de caudal a partir de las mediciones con el ADP frente a la posición del vector, Q_{ADP} . El valor de Q_{ADP} corresponde a una sola medición del vector.

En la Figura 3.14 se muestra la serie temporal de Q calculada en base a la velocidad del vector ($Q_v = U_v \cdot A$), el cálculo de Q con las mediciones del ADP (Q_{ADP}), el cual es mayor que Q_v en ese paso de tiempo, indicando que Q_v subestima el valor de caudal. Por último se muestra la serie temporal de Q una vez aplicado el factor de corrección ($Q = Q_v \cdot f_c$). Adicionalmente, se muestra la serie temporal de caudal observada en la desembocadura del río durante el ciclo de 12 horas. Se observa que la magnitud de Q en la desembocadura es mayor al estimado con el factor de corrección, lo que tiene sentido ya que se suman otros caudales al caudal principal del río antes de llegar a la desembocadura.

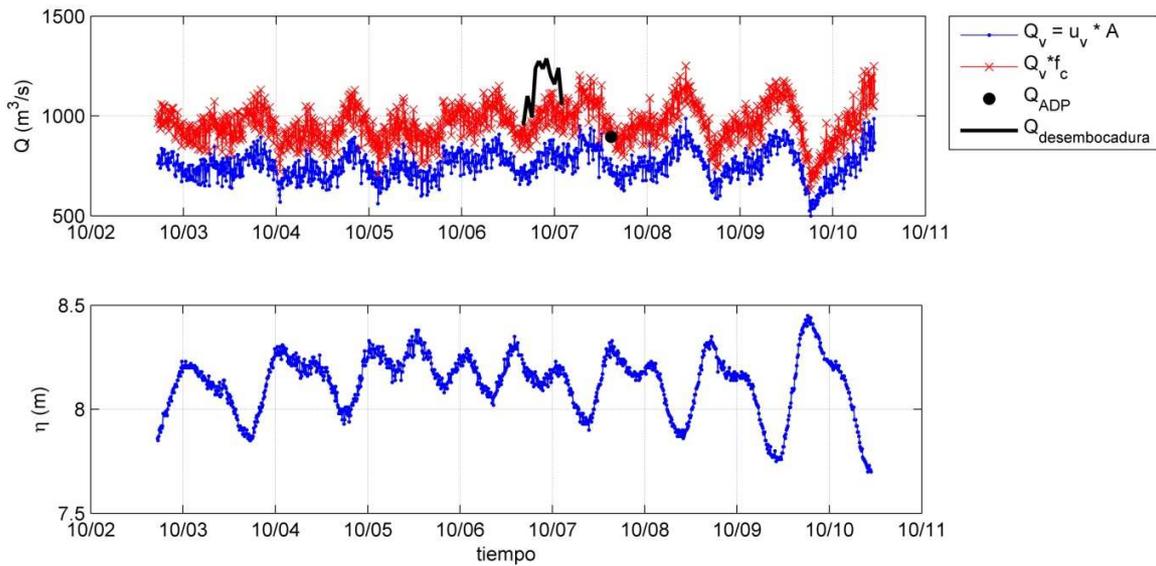


Figura 3.14 Series de tiempo de caudal, Q , en el Río Tonalá, calculado sólo a partir de las velocidades medidas con el vector (Q_v , línea azul), calculado a partir de las mediciones con el ADP en un paso de tiempo (Q_{ADP} , punto negro), aplicando un factor de corrección al Q_v (línea roja con cruces), y en la desembocadura del río (ciclo de 12 horas, línea negra). La variación del nivel del mar se muestra en el panel inferior.

Esta información resulta muy valiosa, tanto para calibrar/validar el modelo en ese punto del río con la serie temporal de nivel, como para obtener un valor de caudal medio ($\approx 957.77 \text{ m}^3/\text{s}$) durante toda la campaña de campo que sirva como forzamiento para las modelaciones.