

0162



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LA  
HIDRODINÁMICA DE CUERPOS DE AGUA  
(FLUJO BIDIMENSIONAL)

TESIS

Como requisito para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería  
(Hidráulica)

Presenta

Juan Javier Carrillo Sosa

DIRECTOR DE TESIS

DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES



MÉXICO, D.F.

JULIO DE 2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Dedico este trabajo,*

*Con respeto y cariño a mis padres y a mi hermano, por quererme siempre incondicionalmente.*

*Con profundo amor a mi esposa Claudia Patricia, porque después de diez años de matrimonio, sigue siendo mi amiga y compañera en las buenas y en las malas y he sido muy feliz a su lado.*

*A mis hijos, Luis Gustavo y Carlos Eduardo, porque su amor ha hecho mis cargas más ligeras y mantiene vivo mi deseo de superarme.*

*Con gran admiración y agradecimiento al Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, porque además de su ayuda para hacer posible este trabajo, me ha dado su amistad y el mejor ejemplo con su excelente calidad como ser humano.*

*Al maestro Faustino De Luna, por ser hoy mi mejor amigo.*

*Al profesor José Luis Sánchez Bribiesca y al Dr. Enzo Levi Lates (†), por ser mis modelos a seguir como ingeniero hidráulico.*

*Al Ingeniero Víctor Franco, no necesito decir porqué.*

INDICE

	1
	3
as y	4
	6
	7
	11
	11
	15
	18
	8
2.3	
2.4	
2.5	
.	
2	
2	
<b>3 Método</b>	
3.1 Ecuaci	
3.2 Ecuaci	
3.3 Condici	
3.3.1 Co	
3.3.2 Con	14
3.3.3 Condi	45
3.3.4 Comur	45
3.3.5 Condi	46
	Agua
	Área inundable

## 4 Caso de aplicación 1:Estero El Salado

4.1	Descripción del problema a resolver.	48
4.2	Recopilación de información	49
4.2.1	Características de la marea local	50
4.2.2	Archivos de la batimetría de la zona	50
4.3	Pruebas de campo	51
4.3.1	Niveles del agua	51
4.3.2	Velocidades en el estero	56
4.4	Calibración del modelo	62
4.5	Resultados obtenidos	64
4.5.1	Condiciones actuales	64
4.5.1.1	Módulos de velocidad de flujo	64
4.5.1.2	Profundidades del agua	66
4.5.1.3	Gastos de agua que salen o entran al estero	67
4.5.2	Condiciones de proyecto	68
4.5.2.1	Módulos de velocidad de flujo	68
4.5.2.2	Profundidades del agua	69
4.6	Resumen de resultados	70

## 5 Caso de aplicación 2:Laguna Agua Brava

5.1	Descripción del problema	72
5.2	Pruebas de campo	74
5.2.1	Medición de turbiedad	76
5.2.2	Medición de temperatura	76
5.2.3	Medición de salinidad	77
5.2.4	Medición de niveles de agua	78
5.2.5	Medición de velocidades	80
5.3	Calibración del modelo	85
5.4	Resultados obtenidos	89
5.4.1	Módulos de velocidad en el canal de Cuautla	89
5.4.2	Niveles de agua	90
5.4.3	Gastos de agua que salen o entran al estero	92
5.5	Estimación del tiempo de estabilización del canal	92

## 6 Conclusiones y recomendaciones

6.1	El Salado	95
6.2	Laguna Agua Brava	97

Notación	100
Bibliografía	101
Anexos	102
A. Gráficas de resultados El Salado	
B. Laguna Agua Brava	
C. Album fotográfico	

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### Tablas y figuras del capítulo 2

Figura 2.1 Volumen de control para la ecuación de continuidad en una dimensión	12
Figura 2.2 Volumen de control para la ecuación de continuidad en dos dimensiones	16
Figura 2.3 Volumen de control para la ecuación de cantidad de movimiento en una dimensión	19
Figura 2.4 Volumen de control para la ecuación de cantidad de movimiento en dos dimensiones	24
Figura 2.5 Hidrograma tipo considerado como una condición de frontera	32
Figura 2.6 Puntos extremos de dos períodos de marea	34

### Tablas y figuras del capítulo 3

Figura 3.1 Zona de cálculo dentro de la cual se encuentra el área de inundación	32
Figura 3.2 Arreglo de celdas considerado en el método numérico	38
Figura 3.3 Condiciones de frontera consideradas en el esquema de cálculo	43
Figura 3.4 Cálculo de las velocidades del flujo en el método numérico propuesto	46

### Tablas y figuras del capítulo 4

Figura 4.1 Calibración del modelo numérico	47
Figura 4.2 Ubicación de regletas en el Estero El Salado	52
Figura 4.3 Ubicación de los limnigrafos en el Estero El Salado	53
Figura 4.4 registros de la marea en el Estero El Salado	56
Figura 4.5 Sitios en donde se midió la velocidad del agua en el estero.	57
Figura 4.6 Distribución de velocidades en flujo a superficie libre	59
Figura 4.7 Marea empleada en el estudio	62
Figura 4.8 Módulos de velocidad en la entrada al estero	65
Figura 4.9 Gastos que entran o salen del estero	67
Figura 4.10 Módulos de velocidad en la entrada al estero (proyecto)	68
Figura 4.11 Gastos que entran o salen del estero (condiciones de proyecto)	71
Tabla 4.1 Nivel en cada regleta (13 de noviembre)	51
Tabla 4.2 Nivel en cada regleta (14 de noviembre)	51

Tabla 4.3 Nivel en regleta ubicada en el puente (15 de noviembre)	51
Tabla 4.4 registros de los limnógrafos en el Estero El Saiado	54
Tabla 4.5. Medición de velocidad en celda 15 (14 nov)	58
Tabla 4.6. Medición de Velocidades en la celda 68 ( 14 nov)	59
Tabla 4.7 Medición de velocidad en la celda 154 (14 nov)	60
Tabla 4.8. Medición de velocidades en la celda 86 (14 nov)	60
Tabla 4.9 Medición de velocidades en la celda 4 (15 nov)	61
Tabla 4.10 Volúmenes de agua que entran al estero en cada ciclo de marea ( $\text{hm}^3$ )	71
Tabla 4.11 Gastos máximos de entrada o salida en la boca del estero (puente) en $\text{m}^3/\text{s}$	71
Tabla 4.12 Resumen de datos de volúmenes de agua dentro del vaso del estero y área inundada	72
Tabla 4.13 Resumen de velocidades en la sección bajo del puente en el estero	72

#### Tablas y figuras del capítulo 5

Figura 5.1 Ubicación de la Laguna de Agua Brava, Nayarit	74
Figura 5.2 Localización de los sitios de muestreo y medición de parámetros	76
Figura 5.3 Datos de la variación del nivel del agua en la Boca de Cuautla (05/sep)	79
Figura 5.4 Datos de la variación del nivel del agua en la desembocadura del río Acaponeta (05/sep)	79
Figura 5.5 Datos de la variación del nivel del agua en la Boca de Cuautla (06/sep)	80
Figura 5.6 Gráfica de la marea media empleada en este estudio	87
Figura 5.7 Gráfica de la marea extraordinaria empleada en este estudio	88
Figura 5.8 Variación del nivel del agua en distintos puntos de la laguna Agua Brava, condiciones de marea media	91
Figura 5.9 Variación del nivel del agua en distintos puntos de la laguna Agua Brava, condiciones de marea extraordinaria	92
Figura 5.10 variación de la velocidad media en el canal de Cuautla a través del tiempo	94
Figura 5.11 Evolución de una sección del canal de Cuautla	94
Tabla 5.1 Mediciones de turbiedad	77
Tabla 5.2 Mediciones de temperatura	78
Tabla 5.3 Medición de salinidad	78
Tabla 5.4 medición de velocidades en el sitio V1 (05/sep)	81

Tabla 5.5 medición de velocidades en el sitio V2 (05/sep)	82
Tabla 5.6 medición de velocidades en el sitio V3 (06/sep)	82
Tabla 5.7 medición de velocidades en el sitio V4 (06/sep)	83
Tabla 5.8 medición de velocidades en el sitio V5 (06/sep)	83
Tabla 5.9 medición de velocidades en el sitio V6 (07/sep)	84
Tabla 5.10 medición de velocidades en el sitio V7 (07/sep)	84
Tabla 5.11 medición de velocidades en el sitio V8 (07/sep)	85
Tabla 5.12 medición de velocidades en el sitio V9 (07/sep)	85
Tabla 5.13 Valores de marea para el análisis de la hidrodinámica	86
Tabla 5.14 Valores de las principales constantes armónicas	86
Tabla 5.15 Velocidades medias	93

## NOTACIÓN

$\alpha$	Constante definida según la ecuación 3.3
$\rho$	Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
$\Delta h$	Diferencia de elevación entre el nivel máximo de la superficie libre del agua en el río y la elevación del bordo (m)
$\Delta t$	Intervalo de tiempo considerado en el cálculo (s)
$\Delta x, \Delta y$	Dimensiones de una celda rectangular en las direcciones $x$ y $y$ respectivamente (m)
$B$	Longitud de ingreso del gasio $Q$ (m)
$B_x$	Constante definida según la ecuación 3.7
$B_y$	Constante definida según la ecuación 3.14
$C_x$	Constante definida según la ecuación 3.12
$C_y$	Constante definida según la ecuación 3.15
$F_{sx}, F_{sy}$	Fuerzas por unidad de masa debidas a la resistencia al movimiento en las direcciones $x$ y $y$ ( $\text{m/s}^2$ )
$g$	Aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )
$h$	Nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural (m)
$H$	Tirante en el río en la sección donde se rompe el bordo (m)
$i, j$	Subíndices empleados para ubicar en el espacio a las literales de interés pertenecientes a la celda $i, j$
$M$	Número de celdas definidas en la dirección $x$
$n$	Coefficiente de rugosidad según la fórmula de Manning ( $\text{s/m}^{1/3}$ )
$N$	Número de celdas definidas en la dirección $y$
$p$	Presión ( $\text{kgf/m}^2$ )
$p$	Superíndice que indica el instante de tiempo en que se evalúan las literales de interés
$Q$	Gasto de inundación ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$q$	Gasto unitario de inundación ( $\text{m}^3/\text{s/m}$ )
$Q_p$	Gasto máximo de un hidrograma parabólico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$S_{fx}, S_{fy}$	Pendientes de fricción en las direcciones $x$ y $y$ (adimensional)
$S_x, S_y$	Pendientes del terreno en las direcciones $x$ y $y$ (adimensional)
$t$	Tiempo (s)
$t_0$	Tiempo inicial de cálculo (s)

$t_b$	Tiempo base de un hidrograma parabólico (s)
$u, v$	Componentes de la velocidad en las direcciones $x$ y $y$ (m/s)
$V$	Volumen ( $m^3$ )
$X, Y$	Fuerzas de cuerpo por unidad de masa en las direcciones $x$ y $y$ ( $m/s^2$ )
$x, y, z$	Direcciones del sistema de ejes cartesiano derecho siendo las dos primeras horizontales y la última vertical
$y_c$	Tirante crítico (m)
$z$	Nivel del terreno con respecto a un nivel de referencia (m).

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

*En este capítulo se presenta la justificación de la realización de este trabajo, así como algunas definiciones que son fundamentales para comprender la importancia de la hidrodinámica en cuerpos de agua y su trascendencia en el ámbito de la ingeniería aplicada.*

### 1.1 Aspectos generales

En México existen numerosos cuerpos de agua que están comunicadas con el mar. A través de las conexiones entre las lagunas con el mar (generalmente por medio de canales) se presenta un flujo y reflujo entre ambos que se repite con cada ciclo de marea.

Los esteros o lagunas costeras son cuerpos de agua cercanos al mar, generalmente de forma alargada, que modifican los niveles del líquido que contienen de acuerdo con la marea. Algunas veces reciben aportaciones de escurrimientos a través de cauces de ríos que confluyen hacia él o son parte del mismo.

En los esteros o lagunas costeras se requiere estudiar varios aspectos de ingeniería ambiental e hidráulica para evaluar la bondad de su funcionamiento. La calidad del agua de estos cuerpos depende del movimiento de este líquido, el cual se realiza con velocidades y profundidades variantes a lo largo del día; así como de las sustancias vertidas en su interior.

Así, el movimiento del agua dentro de los cuerpos de agua se debe principalmente al cambio del nivel del mar en su conexión con el mar originado por la marea astronómica.

El gasto que entra o sale por el canal o canales de comunicación entre el mar y el cuerpo de agua depende del volumen de agua que éste puede admitir en un momento determinado (capacidad de almacenamiento) y de las características propias de la marea local.

La capacidad de almacenamiento de la laguna a su vez es función de la topografía del terreno que contiene al cuerpo de agua. Es por ello que la cantidad de agua que entra o sale en un momento determinado depende no sólo de la geometría del acceso, sino de las características topográficas del vaso y de las características de la marea. Así, para un determinado gasto, conforme la sección hidráulica de la boca se reduce, la velocidad del agua que pasa por ella aumenta, lo que podría generar un problema de erosión. Por el contrario, al aumentar la sección hidráulica de la boca, la velocidad se reduce y ello podría dar origen a sedimentación.

Las profundidades del agua también juegan un papel importante en la conservación de la vida acuática, ya que influye en la magnitud de las velocidades del agua en distintos puntos y en la temperatura. De acuerdo con la profundidad, podrían existir sitios con velocidades excesivas o puntos

de estancamiento, en ambos casos, condición no óptima para la conservación de las especies. El flujo y reflujo de agua entre el mar y la laguna propicia el desarrollo de vida acuática en esta última.

Especies como el camarón, requieren en su etapa larvaria de condiciones adecuadas para su desarrollo, estas condiciones pueden presentarse en la laguna cuando existe un intercambio equilibrado de agua salada y agua dulce entre el mar y la laguna respectivamente.

Con base en la cantidad de agua que entra al cuerpo de agua durante cada ciclo de marea es posible evaluar uno de los aspectos más importantes para la conservación de la vegetación y la fauna existente dentro del mismo.

Aunado a lo anterior, el transporte y depósito de material a lo largo de la línea de costa, hacen necesarias estructuras destinadas a controlar el proceso natural de erosión y azolvamiento en la boca del canal de comunicación.

En este trabajo se considera que en el estero (o laguna) se puede presentar la mezcla entre el agua dulce proveniente de ríos y la del mar.

## 1.2 ¿Qué es la hidrodinámica?

El estudio hidrodinámico de un cuerpo de agua consiste en determinar el patrón de velocidades de flujo y las elevaciones de la superficie libre del agua a lo largo del tiempo. A parte de la calidad del agua, existen otros factores, como el arrastre de sedimentos, que están relacionados con ella. El cálculo de la hidrodinámica se basa en algunas leyes de la Física y en varios principios moleculares de los fluidos cuya aplicación es más restringida a la de las leyes mencionadas. En dicho cálculo se considera a la variación del

nivel del mar, los ingresos y egresos de agua en la boca del cuerpo de agua, la forma y los obstáculos al paso del líquido dentro del cuerpo tales como vegetación, islas, construcciones y puentes.

Por todo lo anterior, cuando se analiza el funcionamiento de lagunas o esteros conectados al mar, es necesario enfocar el problema desde un punto de vista global que tome en cuenta los aspectos anteriormente mencionados.

### 1.3 Conceptos principales del estudio de la hidrodinámica de lagunas y esteros.

En todo estudio de hidrodinámica se requiere analizar el proceso de azolve y sedimentación en la boca, en el canal o canales de acceso y en el interior de la laguna. Se debe evaluar el funcionamiento hidrodinámico para conocer la magnitud y dirección de las velocidades del agua en distintos puntos y a distintos tiempos. También se debe conocer la magnitud de los volúmenes de agua que ingresarán en cada ciclo de marea y la magnitud de los gastos máximos y mínimos, así como el momento en que estos se presentan. Lo anterior se realiza para distintos tipos de marea.

En cuanto a calidad del agua, se debe conocer algunos de los principales parámetros que la caracterizan en condiciones actuales y como se modificarán estos parámetros de acuerdo con las distintas opciones consideradas en el proyecto.

Un estudio de esta naturaleza requiere, al menos, de la siguiente información:

- = Batimetría de la laguna (de la zona cubierta por el agua en pleamar media superior).

- = Batimetría de la boca o canal de comunicación con el mar (en una franja variable de acuerdo con las dimensiones del sitio).
- = Construcción de mojoneras de prueba para llevar un control del corrimiento de la línea de costa.
- = Instalación de reglas verticales para llevar un control del nivel de depósito o erosión de material en la boca y en la línea de costa cercana a ella.
- Colocación de limnógrafos o reglas de marea en puntos estratégicos y contar con los registros de al menos dos ciclos de marea y en dos épocas del año.
- Análisis de calidad del agua (al menos los siguientes parámetros: temperatura, turbiedad, Ph, demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto y salinidad).

Con la información anterior se deben realizar al menos los siguientes estudios:

- Estudio hidrológico para calcular la aportación de agua dulce a la laguna.
- Estudio hidrodinámico para la simulación del funcionamiento de las condiciones actuales y de las condiciones de proyecto (En esta última, se deberán probar distintas opciones, tanto de sitios de ubicación del o de los accesos, así como distintas opciones estructurales para el control de azolve y sedimentación, con el fin de seleccionar la mejor).
- Estudio de difusión, para conocer la concentración de varios parámetros de calidad del agua en distintos sitios y a distintos tiempos, tanto en condiciones actuales como en condiciones de proyecto.

## 1.4 Aplicaciones de los modelos de hidrodinámica.

En general, puede decirse que un modelo de hidrodinámica es una herramienta útil para el cálculo de flujo en esteros y lagunas costeras, la evaluación de procedimientos de control de inundaciones y el análisis del funcionamiento de sistemas de drenaje.

El modelo matemático determina el comportamiento hidráulico, en el espacio y en el tiempo, del flujo de agua en un cuerpo de agua conectado con el mar. Con él se encuentran las profundidades y las velocidades del flujo en cualquier punto de una zona en estudio en un tiempo dado.

Entre otras aplicaciones del modelo se mencionan los siguientes casos:

### a) Cálculo de la evolución del área de inundación:

Se encuentra la extensión de la inundación y las profundidades del agua en ella. Esto permitiría evaluar los posibles daños si se alcanzan a afectar algunos sitios de interés.

### b) Avance en el tiempo de la inundación:

El modelo puede emplearse para determinar el crecimiento con el tiempo del área de inundación. Se sabría el tiempo que tardaría en llegar el agua a determinados lugares, a partir de lo cual se podrían establecer medidas de prevención de daños.

### c) Revisión de la efectividad de medidas estructurales para mitigar los daños:

Con el modelo puede analizarse el empleo de ciertas zonas para inducir en ellas una inundación y evitarla en regiones donde ocurrirían mayores daños. También podría calcularse como cambiaría la zona inundada con la construcción de bordos y estimar si deja de afectarse cierta superficie del terreno de importancia; o bien si es necesario modificarlos para lograr la protección de dicha superficie.

#### d) Análisis económicos:

Cuando no existe riesgo de pérdida de vidas humanas, las opciones presentadas para disminuir los daños de la inundación pueden evaluarse en función del costo de las obras de control de inundaciones y el costo del daño evitado.

#### e) Evaluación de la confiabilidad de los sistemas de drenaje:

Permite determinar la magnitud de los daños por inundación debidos a la falla de un bordo de un río o la insuficiencia del cauce para conducir caudales grandes de uno o de varios componentes del sistema de drenaje tales como ríos, canales, colectores, plantas de bombeo, etc.

## 1.5 Objetivo y contenido de la tesis

Este trabajo tiene como objetivo presentar un modelo útil para el cálculo de la hidrodinámica de cuerpos de agua conectados con el mar y los resultados obtenidos en dos aplicaciones reales.

Al aplicar el modelo se puede estimar los volúmenes de agua que ingresan y egresan de la región de interés en cada ciclo de marea, el tiempo de remoción, es decir, el tiempo que debe transcurrir para cambiar todo el

volumen de agua en la laguna o estero, y evaluar las magnitudes de las velocidades de flujo y profundidades hidráulicas. Para ello se obtiene la hidrodinámica y se detectan las áreas con menores velocidades.

El capítulo 2 de esta tesis contiene los fundamentos matemáticos del flujo en dos dimensiones a superficie libre.

En el capítulo 3 se presentan las consideraciones e hipótesis para la aplicación de las ecuaciones de la hidrodinámica mediante un modelo matemático para computadora.

La aplicación del modelo numérico a dos casos reales aparece en los capítulos 4 y 5. En éstos se discute el tipo de marea que se presenta en cada sitio y las condiciones bajo las cuales se aplicó el modelo de hidrodinámica. Se describe la problemática particular y la solución planteada mediante el uso del modelo. También se describen las pruebas de campo que fueron necesarias para la calibración del modelo.

El capítulo 6 incluye el comentario de los resultados obtenidos y las conclusiones generales del trabajo de tesis.

# CAPÍTULO 2

---

## Fundamentos

*Se exponen en este capítulo las ecuaciones fundamentales que rigen del movimiento del agua en dos dimensiones, a superficie libre, y su aplicación al cálculo de la hidrodinámica de un cuerpo de agua.*

**D**e acuerdo con el aspecto físico que tiene en la naturaleza, la materia se puede clasificar en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. La materia en cualquiera de los dos últimos estados se conoce como fluido.

A diferencia de la materia en estado sólido, por su constitución molecular los fluidos cambian continuamente las posiciones relativas de sus moléculas y no ofrecen gran resistencia al desplazamiento entre ellas, aún cuando éste sea muy grande. Por ello, si el fluido se encuentra en reposo, en su interior no existen fuerzas tangenciales a superficie alguna, cualquiera que sea su orientación. Estas fuerzas se presentan sólo cuando el fluido está en movimiento. Por el contrario, la materia sólida en reposo sí admite fuerzas tangenciales a las superficies, las cuales producen desplazamientos relativos entre partículas con una magnitud definida.

Los fluidos se dividen en dos clases: líquidos y gases. Los primeros ocupan un cierto volumen, independientemente del recipiente que lo contenga; el segundo, tiende a extenderse y llenar el recipiente cerrado donde se encuentra.

Cuando los fluidos se someten a un esfuerzo tangencial presentan una resistencia a la deformación. Esta resistencia llamada viscosidad no sigue las mismas leyes de deformación de los sólidos.

Para la mayoría de los líquidos se utiliza la ley de viscosidad de Newton (ecuación 2.1) donde se afirma que el esfuerzo tangencial que se produce entre dos láminas separadas una distancia  $dy$ , y que se desplazan con velocidades  $(v)$  y  $[v+(\partial v / \partial y)dy]$  se expresa como:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.1)$$

El esfuerzo tangencial es proporcional al gradiente transversal de velocidades  $\partial v / \partial y$ . La constante de proporcionalidad  $\mu$  es una magnitud característica de la viscosidad del fluido que se conoce como viscosidad dinámica.

Para el estudio de los flujos es necesario tomar en cuenta el estado de movimiento del fluido, el cual está definido por la geometría, las condiciones de contorno y las leyes de la mecánica.

En numerosos problemas de ingeniería civil relacionados con Hidráulica se requiere del análisis de movimiento del agua en cauces naturales o artificiales. Dicho movimiento puede cambiar con el tiempo (ser no permanente).

El cálculo del flujo de agua se hace a partir de los principios de la física que se describen en las ecuaciones de movimiento de los fluidos.

Cuando las corrientes se llevan a cabo en cauces en los cuales la sección transversal es amplia y con cambios en la distancia, se presentan velocidades en tres dimensiones, y esta resulta ser más complicada que en el plano. Por lo que para algunos casos, cuando la variación de la velocidad en la vertical es pequeña, conviene despreciarla y utilizar ecuaciones en que las variables se plantean en dos dimensiones espaciales horizontales ( $x-y$ ) ya que no se comete un error de cálculo importante.

Aunque en Hidráulica se dispone de tres ecuaciones fundamentales (continuidad, energía y cantidad de movimiento) para flujo unidimensional, son suficientes dos variables (por ejemplo tirante y velocidad) para describir el flujo no permanente, y por lo tanto sólo se requieren dos ecuaciones fundamentales. Las ecuaciones planteadas son las de conservación de la masa y de conservación de la cantidad de movimiento.

## 2.1 Ecuación de conservación de masa (ecuación de continuidad).

Mediante la consideración del principio de conservación de la masa a un volumen de control infinitesimal para algún flujo general, se establece la ecuación de conservación de masa conocida también como ecuación de continuidad. En este capítulo, inicialmente se presenta el desarrollo de las expresiones para una y dos dimensiones.

### 2.1.1 Ecuación de conservación de masa en una dimensión.

La ecuación de continuidad establece que el cambio de masa en el tiempo dentro de un volumen de control es igual a:

$$\begin{aligned} & [\text{flujo de masa que entra}] - [\text{flujo de masa que sale}] = \\ & = [\text{cambio en el almacenamiento de masa con el tiempo}] \quad \dots(2.2) \end{aligned}$$

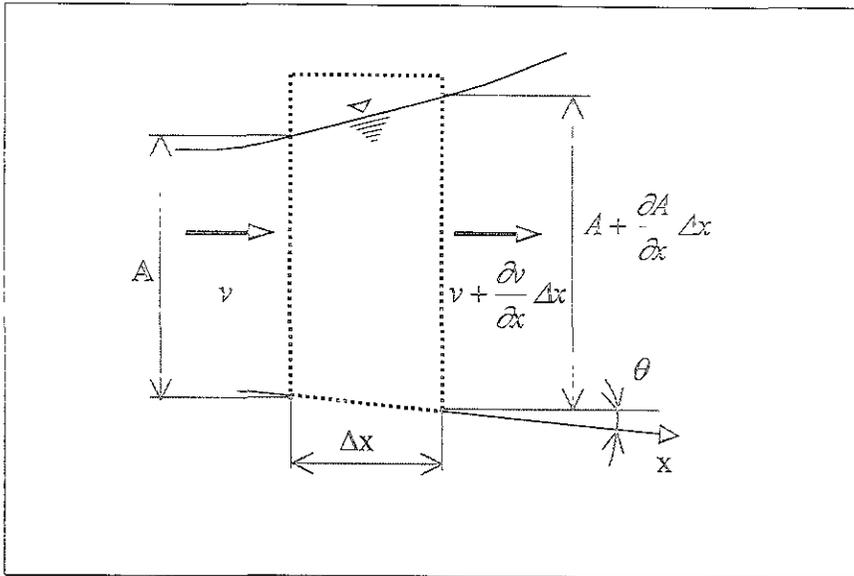


Figura 2.1 Volumen de control para la ecuación de continuidad en una dimensión

Con referencia a la figura 2.1 se tiene que el flujo de masa que entra al volumen de control es

$$\frac{\gamma}{g} Av \quad (2.3)$$

y el flujo de masa que sale del volumen de control se expresa como

$$\frac{\gamma}{g} \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left( v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right) \quad (2.4)$$

Considerando que el cambio de masa por unidad de tiempo almacenada en el volumen de control es

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (2.5)$$

por lo que la ecuación de continuidad queda

$$\frac{\gamma}{g} Av - \frac{\gamma}{g} \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left( v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right) = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (2.6)$$

que también se puede expresar como

$$\frac{\gamma}{g} Av - \frac{\gamma}{g} \left( Av + \frac{v\partial A}{\partial x} \Delta x + \frac{A\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right) = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (2.7)$$

despreciando los términos de segundo orden se tiene

$$-\frac{\gamma}{g} \left( \frac{v\partial A}{\partial x} \Delta x + \frac{A\partial v}{\partial x} \Delta x \right) = \frac{\gamma}{g} \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (2.8)$$

multiplicando la expresión anterior por  $g/\gamma\Delta x$  y ordenando

$$\boxed{\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{v\partial A}{\partial x} + \frac{A\partial v}{\partial x} = 0} \quad (2.9)$$

Analizando el flujo de un fluido en un canal, primeramente se establecen los tipos de acuerdo a su origen, ya que pueden ser naturales o artificiales. Dentro de los primeros se incluyen los escurrimientos de agua que existen en forma natural, como arroyos, ríos, etc. Dentro de los canales artificiales se incluyen todos los construidos por el hombre, como los de navegación, canales de riego, obras de excedencia, etc.

Considerando un canal prismático en donde el área de la sección transversal ( $A$ ) es función del tirante, las derivadas de  $A$  de la ecuación 2.9 pueden escribirse de la manera siguiente

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x} = B \frac{\partial y}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} = B \frac{\partial y}{\partial t}$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.10 en la ecuación 2.9 se tiene

$$B \frac{\partial y}{\partial x} + vB \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{A \partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

Por otra parte considerando que el gasto es  $Q=vA$ , resulta

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{v \partial A}{\partial x} + \frac{A \partial v}{\partial x} \quad (2.12)$$

tomando en cuenta la ecuación 2.10 en la ecuación 2.12 se encuentra

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{v \partial A}{\partial x} + \frac{A \partial v}{\partial x} \quad (2.13)$$

sustituyendo las ecuaciones 2.10 en la ecuación 2.13 se obtiene

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = B \frac{v \partial y}{\partial x} + \frac{A \partial v}{\partial x} \quad (2.14)$$

Despejando  $B \frac{\partial y}{\partial t}$  de la ecuación 2.11 se tiene

$$B \frac{\partial y}{\partial t} = -B \frac{v \partial y}{\partial x} - \frac{A \partial v}{\partial x} \tag{2.15}$$

igualando la ecuación 2.15 con la ecuación 2.14 queda

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -B \frac{\partial y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \tag{2.16}$$

A la expresión 2.9 o bien la 2.16 se conoce como ecuación de continuidad.

### 2.1.2 Ecuación de conservación de masa en dos dimensiones

De igual manera que para el caso de una dimensión, el flujo de masa que entra en la dirección  $x$ , a un volumen de control, (figura 2.2) está dada por

$$\Delta y \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \tag{2.17}$$

y el de salida será

$$\Delta y \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \tag{2.18}$$

Para la dirección  $y$  sucede algo similar, por lo que el flujo de entrada es

$$\Delta x \left( h - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \left( v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \tag{2.19}$$

y el de salida se obtiene con la expresión siguiente

$$\Delta x \left( h + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \left( v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \tag{2.20}$$

Por otra parte el cambio total de almacenamiento en el tiempo en un volumen de control se expresa como

$$\Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial t} \tag{2.21}$$

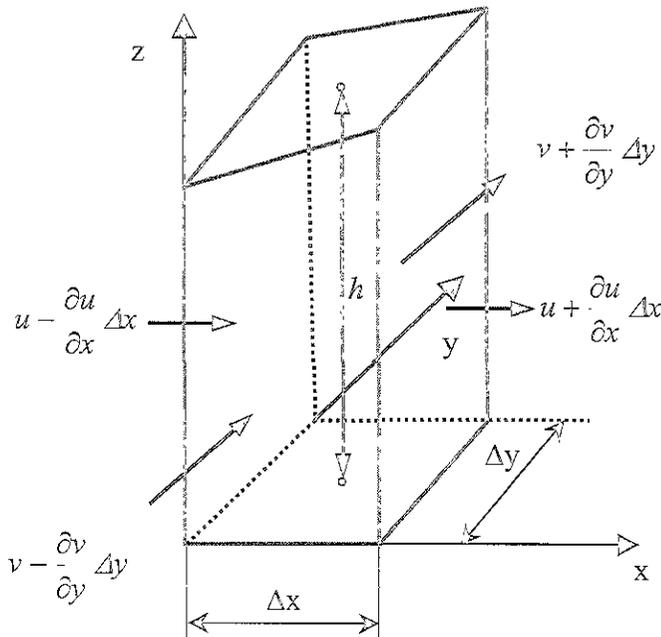


Figura 2.2 Volumen de control para la ecuación de continuidad en dos dimensiones

si se considera que el flujo que entra al volumen de control tanto en la dirección  $x$  como en la dirección  $y$  menos el flujo que sale también en ambas direcciones, la ecuación 2.2 es igual al cambio del almacenamiento, que se obtiene con base en las ecuaciones 2.17 a 2.21 de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \Delta y \left( h - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \Delta y \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + \\ & + \Delta x \left( h - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \left( v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) - \Delta x \left( h + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \left( v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) = \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Después de multiplicar términos y despreciar los de segundo orden la ecuación 2.22 se puede expresar como

$$\begin{aligned} & -\Delta y h \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \Delta y u \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \Delta y h \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \Delta y u \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \\ & - \Delta x h \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} - \Delta x v \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} - \Delta x h \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} - \Delta x v \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} = \Delta x \Delta y \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Multiplicando por  $\frac{1}{\Delta x \Delta y}$  y agrupando términos se tiene

$$-h \frac{\partial u}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} - h \frac{\partial v}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.24)$$

o bien

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2.25)$$

Cualquiera de las dos expresiones anteriores es conocida como ecuación de continuidad para flujo en dos dimensiones.

## 2.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento.

La conservación de la cantidad de movimiento establece que:

$$[cantidad\ de\ movimiento\ que\ entra\ a\ un\ volumen\ de\ control] - [cantidad\ de\ movimiento\ que\ sale] + [suma\ de\ fuerzas\ externas\ que\ actúan\ en\ el\ volumen\ de\ control] = [cambio\ de\ cantidad\ de\ movimiento\ dentro\ del\ volumen\ de\ control] \quad (2.26)$$

### 2.2.1 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento en una dimensión.

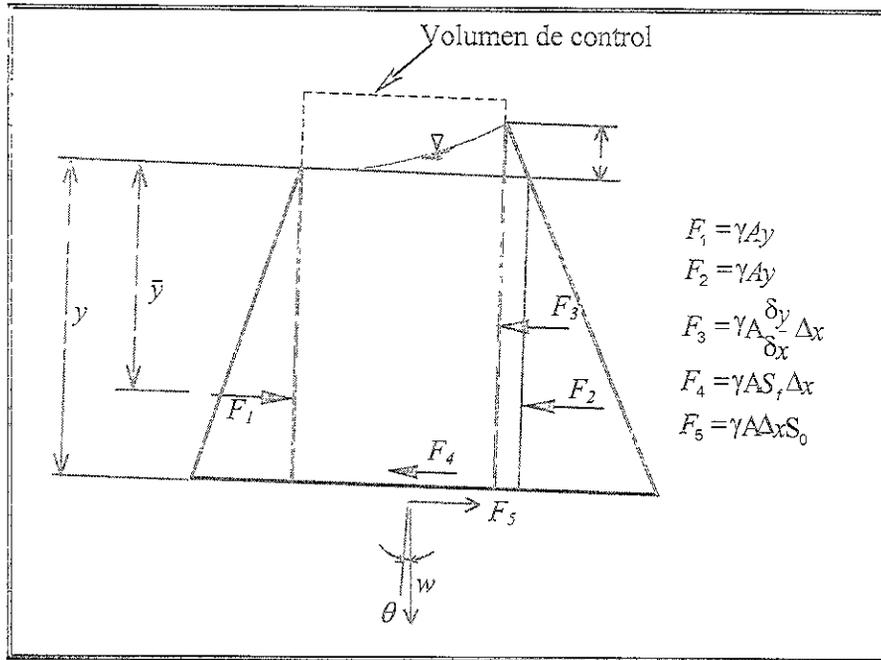
Para deducir la ecuación de conservación de cantidad de movimiento se deben considerar las fuerzas externas que actúan sobre el volumen de control, como se pueden ver en la figura 2.3

en resumen

$$F_1 = F_2 = \gamma A y \quad (2.27)$$

$$\vec{F}_3 = \gamma A \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x \quad (2.28)$$

$$F_4 = \gamma A S_f \Delta x \quad (2.29)$$



*Figura 2.3 Volumen de control para la ecuación de cantidad de movimiento en una dimensión.*

$F_1$  y  $F_2$  son las fuerzas debidas a la presión concurrente sobre las caras del volumen de control,  $F_3$  es el incremento de la fuerza debida a la presión como consecuencia del cambio del tirante,  $F_4$  es la fuerza originada por la fricción,  $F_5$  es el componente del peso del volumen de control en la dirección del eje  $x$  y  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía.

La pendiente  $S_f$  es estimada usando la fórmula de Chezy o Manning, (aplicables a flujo uniforme) además si la inclinación del canal ( $\theta$  en la figura 2.1), es muy pequeña entonces  $\text{seno } \theta = \theta = \text{tan } \theta = S_0$ ,  $S_0$  se designa como la pendiente de fondo, por lo que se puede expresar a  $F_5$  como:

$$F_4 = \gamma A S_0 \Delta x \quad \dots(2.30)$$

Ahora la acción de la resultante de las fuerzas que actúan en el volumen de control se considera en la dirección positiva del eje  $x$ , que coincide con la dirección del flujo

$$\sum F = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 + F_5 \tag{2.31}$$

sustituyendo las ecuaciones 2.27 a 2.30 en la ecuación 2.31 se tiene

$$\begin{aligned} \sum F &= \gamma A y - \gamma A y - \gamma A \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x - \gamma A S_f \Delta x + \gamma A S_0 \Delta x \\ \sum F &= -\gamma A \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x - \gamma A S_f \Delta x + \gamma A S_0 \Delta x \end{aligned} \tag{2.32}$$

si se considera que la cantidad de movimiento que entra al volumen de control es

$$\frac{\gamma}{g} A v^2 \tag{2.33}$$

y la que sale

$$\frac{\gamma}{g} \left[ A v^2 + \frac{\partial}{\partial x} (A v^2) \Delta x \right] \tag{2.34}$$

El cambio de la cantidad de movimiento con respecto al tiempo está dado como

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\gamma}{g} A v \Delta x \right] \tag{2.35}$$

Por lo tanto, al sustituir en la ecuación 2.26 a las ecuaciones 2.33, 2.34 y 2.35 se obtiene

$$\begin{aligned}
 M_N = \frac{\gamma}{g} A v^2 - \frac{\gamma}{g} \left[ A v^2 + \frac{\partial}{\partial x} (A v^2) \Delta x \right] - \gamma A \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x - \gamma A S_f \Delta x + \\
 + \gamma A S_0 \Delta x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\gamma}{g} A v \Delta x \right]
 \end{aligned} \quad (2.36)$$

La conservación de cantidad de movimiento puede ser expresada como

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\gamma}{g} A v \Delta x \right] = - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} (A v^2) \Delta x - \gamma A \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x - \gamma A S_f \Delta x + \gamma A S_0 \Delta x \quad (2.37)$$

Multiplicando la ecuación 2.37 por  $g/\gamma\Delta x$  se tiene

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\gamma}{g} A v \Delta x \right] \frac{g}{\gamma\Delta x} = - \frac{g}{\gamma\Delta x} \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} (A v^2) \Delta x - \frac{g}{\gamma\Delta x} \gamma A \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \\
 + \frac{g}{\gamma\Delta x} \gamma A S_0 \Delta x - \frac{g}{\gamma\Delta x} \gamma A S_f \Delta x
 \end{aligned} \quad (2.38)$$

haciendo operaciones y simplificando términos queda

$$\frac{\partial}{\partial t} (A v) + \frac{\partial}{\partial x} (A v^2) + gA \frac{\partial}{\partial x} (y) = g A (S_0 - S_f) \quad (2.39)$$

desarrollando las derivadas que aparecen en esta ecuación, se expresa como

$$A \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial A}{\partial t} + 2 A v \frac{\partial v}{\partial x} + v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = g A (S_0 - S_f) \quad (2.40)$$

dividiendo entre  $A$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + 2v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (2.41)$$

agrupando términos en la ecuación 2.41 se reduce a

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{v}{A} \left( \frac{\partial A}{\partial t} + v \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial v}{\partial x} \right) = g (S_0 - S_f) \quad (2.42)$$

Si se considera la ecuación 2.9 en la ecuación 2.42, entonces el término entre paréntesis es cero, por lo que la ecuación 2.42 queda como

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (2.43)$$

Por otra parte, si se desea, la ecuación 2.43 puede ser expresada en términos del gasto ( $Q=vA$ ), partiendo de la ecuación 2.39 y sustituyendo en el primer término:

$$\frac{\partial}{\partial t} (Q) + \frac{\partial}{\partial x} (Av^2) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2.44)$$

desarrollando la derivada del segundo término se llega a

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2Av \frac{\partial v}{\partial x} + v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2.45)$$

agrupando términos se tiene

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2v \frac{\partial Q}{\partial x} + v^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2.46)$$

tenemos de las ecuaciones 2.10 que

$$\frac{\partial A}{\partial x} = B \frac{\partial y}{\partial x}$$

sustituyendo en la ecuación 2.46

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2v \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} \left( \frac{v^2 B}{gA} + 1 \right) = gA(S_0 - S_f) \quad (2.47)$$

Las expresiones 2.43 ó 2.47 representan a la ecuación de conservación de *cantidad de movimiento*.

Las ecuaciones 2.16 y 2.47 son conocidas como ecuaciones de *Saint-Venant para flujo no permanente en una dimensión*

### 2.2.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento en dos dimensiones.

En la determinación de la ecuación dinámica se deben considerar las fuerzas externas que actúan en el volumen de control (ver figura 2.4) en las direcciones ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Las fuerzas a considerar son la presión, el peso y la fricción, así como el flujo de cantidad de movimiento.

La distribución de la presión se considera hidrostática de tal forma que las fuerzas originadas por la presión se pueden expresar como:

La fuerza de entrada para la dirección  $x$  es

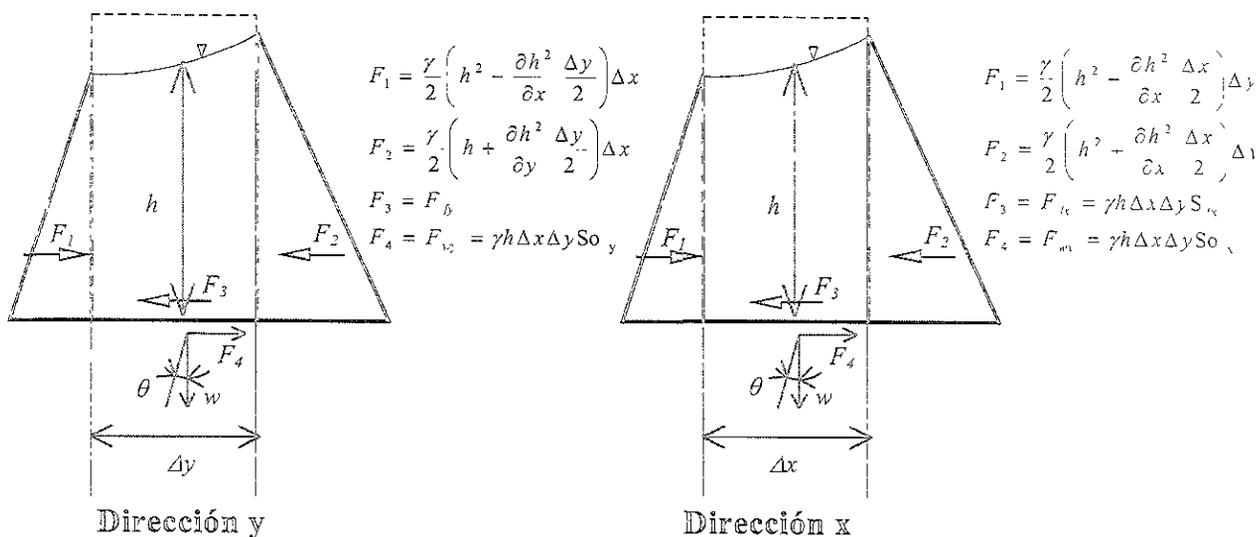


Figura 2.4 Volumen de control para la ecuación de cantidad de movimiento en dos dimensiones.

$$\frac{\gamma}{2} \left( h^2 - \frac{\partial h^2}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y \tag{2.48}$$

ya la que actúa a la salida como

$$\frac{\gamma}{2} \left( h^2 + \frac{\partial h^2}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y \tag{2.49}$$

El cambio de la fuerza debida a la presión en la dirección  $x$  será

$$P_{Nx} = \frac{\gamma}{2} \left[ \left( h^2 - \frac{\partial h^2}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y - \left( h^2 + \frac{\partial h^2}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y \right] \tag{2.50}$$

$$P_{Nx} = -\frac{\gamma}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \Delta x \Delta y \quad (2.51)$$

Para la dirección  $y$

$$P_{Ny} = \frac{\gamma}{2} \left[ \left( h^2 - \frac{\partial h^2}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x - \left( h^2 + \frac{\partial h^2}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \right] \quad (2.52)$$

$$P_{Ny} = -\frac{\gamma}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} \Delta x \Delta y \quad (2.53)$$

La fuerza debida al peso se expresa para la dirección  $x$  como

$$F_{Wx} = \gamma h \Delta x \Delta y \text{ sen } \theta \quad (2.54)$$

si la inclinación del canal ( $\theta$ ), es pequeña tal que  $\text{sen } \theta = \text{tan } \theta \cong S_{0x}$ , donde  $S_{0x}$  es la pendiente del fondo en dirección del eje  $x$ , la ecuación 2.54 se puede expresar como

$$F_{Wx} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{0x} \quad (2.55)$$

de manera similar para la dirección  $y$  se cumple que

$$F_{Wy} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{0y} \quad (2.56)$$

Para considerar la fuerza de fricción se procede de manera similar a la del peso por lo que para la dirección  $x$  se dispone de

$$F_{fx} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{fx} \quad (2.57)$$

y la dirección  $y$  se tiene

$$F_{fy} = \gamma h \Delta x \Delta y S_{fy} \tag{2.58}$$

La cantidad de movimiento que entra y sale, se plantea de manera similar al flujo unidimensional con la variante de que ahora, para ambas direcciones se considera la dirección  $x$  y  $y$ . Por lo que se puede expresar como:

Para la dirección  $x$ :

Cantidad de movimiento que entra

$$\frac{\gamma}{g} \left( u(uh) - \frac{\partial}{\partial x} [u(uh)] \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y + \frac{\gamma}{g} \left( v(uh) - \frac{\partial}{\partial y} [v(uh)] \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \tag{2.59}$$

la que sale es igual a

$$\frac{\gamma}{g} \left( u(uh) + \frac{\partial}{\partial x} [u(uh)] \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y + \frac{\gamma}{g} \left( v(uh) + \frac{\partial}{\partial y} [v(uh)] \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \tag{2.60}$$

El cambio en la cantidad de movimiento dentro del volumen de control se obtiene con base en la ecuación 2.25, es decir, sustituyendo las ecuaciones 2.59 y 2.60 se tiene

$$M_{Nx} = \frac{\gamma}{g} u(uh) \Delta y - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} [u(uh)] \frac{\Delta x}{2} \Delta y + \frac{\gamma}{g} v(uh) \Delta x - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial y} [v(uh)] \frac{\Delta y}{2} \Delta x - \left[ \frac{\gamma}{g} u(uh) \Delta y + \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} [u(uh)] \frac{\Delta x}{2} \Delta y + \frac{\gamma}{g} v(uh) \Delta x + \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial y} [v(uh)] \frac{\Delta y}{2} \Delta x \right] \tag{2.61}$$

$$M_{Nx} = -\frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} u(uh) \Delta x \Delta y - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial y} v(uh) \Delta y \Delta x \quad (2.62)$$

Para la dirección  $y$ :

La cantidad de movimiento que entra es

$$\frac{\gamma}{g} \left( u(vh) - \frac{\partial}{\partial x} [u(vh)] \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y + \frac{\gamma}{g} \left( v(vh) - \frac{\partial}{\partial y} [v(vh)] \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \quad (2.63)$$

la que sale es igual a

$$\frac{\gamma}{g} \left( u(vh) + \frac{\partial}{\partial x} [u(vh)] \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta y + \frac{\gamma}{g} \left( v(vh) + \frac{\partial}{\partial y} [v(vh)] \frac{\Delta y}{2} \right) \Delta x \quad (2.64)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.63 y 2.64 de manera similar que para la dirección  $x$ , se obtiene:

$$M_{Ny} = -\frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} u(vh) \Delta x \Delta y - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial y} v(vh) \Delta y \Delta x \quad (2.65)$$

Por otra parte, el cambio de momento respecto al tiempo está dado como

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial t} (uh) \Delta x \Delta y - \frac{\gamma}{g} (vh) \Delta x \Delta y \quad (2.66)$$

La conservación de cantidad de movimiento es igual al cambio total de cantidad de movimiento más la suma de fuerzas externas que actúan en el volumen de control, de tal manera que para la dirección  $x$

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial t} (uh) \Delta x \Delta y = & - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial x} u(uh) \Delta x \Delta y - \frac{\gamma}{g} \frac{\partial}{\partial y} v(uh) \Delta y \Delta x - \\ & - \frac{\gamma}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \Delta x \Delta y + \gamma h \Delta x \Delta y S_{0x} - \gamma h \Delta x \Delta y S_{fx} \end{aligned} \quad (2.67)$$

dividiendo la ecuación 2.67 por  $(\Delta x \Delta y \gamma)/g$

$$\frac{\partial}{\partial t} (uh) = - \frac{\partial}{\partial x} u(uh) - \frac{\partial}{\partial y} v(uh) - \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} + g h S_{0x} - g h S_{fx} \quad (2.68)$$

o bien

$$\frac{\partial}{\partial t} (uh) + \frac{\partial}{\partial x} u(uh) + \frac{\partial}{\partial y} v(uh) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = g h (S_{0x} - S_{fx}) \quad (2.69)$$

Procediendo de manera análoga para la dirección  $y$ , se obtiene la expresión siguiente

$$\frac{\partial}{\partial t} (vh) + \frac{\partial}{\partial x} u(vh) + \frac{\partial}{\partial y} v(vh) + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} = g h (S_{0y} - S_{fy}) \quad (2.70)$$

La ecuación 2.25 es la conocida como ecuación de conservación de la masa o continuidad, y las ecuaciones 2.69 y 2.70 son llamadas ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento. Las tres ecuaciones aparecen escritas en la llamada versión conservativa (denominadas así ya que se establece el principio de conservación de la cantidad de movimiento y además tienen la característica de que las variables dependientes de las ecuaciones son continuas y derivables). Estas ecuaciones describen el flujo no permanente a superficie libre en dos dimensiones.

En las ecuaciones 2.69 y 2.70 también se pueden considerar los efectos del viento, así como la fuerza de Coriolis.

### 2.3 Efectos del viento.

Para el efecto del viento se considera que este actúa en la dirección del flujo y sobre la superficie del agua por lo que se produce un esfuerzo que generalmente se expresa como

$$\tau_s = \rho_a f_s^2 v_s^2 v_s \quad (2.71)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $v_s$  la velocidad del viento a 10 m medidos sobre el nivel medio del agua y  $f_s^2$  es el coeficiente de fricción correspondiente a  $v_s$ , con respecto a este último término se han realizado algunos estudios (Wilson, 19xx), todos ellos son para una velocidad estimada a 10 m sobre el nivel medio del agua, con un valor estándar de  $\rho_a$  para una temperatura de 15°C de 0.125 kg s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>.

Para considerar la fuerza por viento en las ecuaciones 2.69 y 2.70 se expresa el vector velocidad (ecuación 2.70) en términos de sus componentes, por lo cual:

en la dirección  $x$

$$\tau_{sx} = \rho_a f_{sx}^2 u_s^2 u_s \quad (2.72)$$

para la dirección  $y$

$$\tau_{sy} = \rho_a f_{sy}^2 v_s^2 v_s \quad (2.73)$$

## 2.4 Fuerza de Coriolis.

El efecto de la fuerza de Coriolis se expresa como

$$F_c = v f_c \tag{2.74}$$

donde  $v$  es la velocidad del flujo, siendo

$$f_c = 2 \omega \text{ sen } \varphi \tag{2.75}$$

$\omega$  es la velocidad angular de la tierra y  $\varphi$  es la latitud del sitio en estudio. De manera similar que para el viento se considera un término para cada dirección de la manera siguiente:

En la dirección  $x$ : 
$$-f_c v \dots \tag{2.76}$$

En la dirección  $y$ : 
$$f_c u \dots \tag{2.77}$$

Considerando las fuerzas anteriores, las ecuaciones 2.69 y 2.70 se escriben como:

dirección  $x$

$$\frac{\partial}{\partial t} u h + \frac{\partial}{\partial x} u u h + \frac{\partial}{\partial y} u v h + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} + \tau_{sx} - f_c v = g h (S_{0x} - S_{fx}) \tag{2.78}$$

dirección  $y$

$$\frac{\partial}{\partial t} v h + \frac{\partial}{\partial x} u v h + \frac{\partial}{\partial y} v v h + \frac{g}{2} \frac{\partial h^2}{\partial y} + \tau_{sy} + f_c v = g h (S_{0y} - S_{fy}) \quad (2.79)$$

## 2.5 Condiciones iniciales y de frontera

Para el tiempo del inicio de la simulación ( $t=t_0$ ) se requiere del valor de dos variables (condiciones iniciales).

En general, se dispone de información de niveles de agua (o tirantes) y gastos en algunas secciones pero no a todo lo largo del dominio. En el caso de canales artificiales se dispone de esta información, pero esto no es tan simple en el caso de ríos. Cuando no se tienen estos datos, lo que se hace es suponerlos u obtenerlos del cálculo de un remanso.

### 2.5.1 Flujo subcrítico.

En régimen subcrítico en un flujo unidimensional se requiere información de una variable en la frontera de aguas arriba y de otra en la de aguas abajo. En la mayoría de los problemas de ingeniería de ríos, esta información determina en gran medida la solución. En el caso más común, se define a una variable como función del tiempo. Así, en la frontera de aguas arriba, se da una ley del gasto con el tiempo,  $Q(x_0, t)$ , como por ejemplo un hidrograma. En la frontera de aguas abajo, cualquiera de las siguientes:

- a) una curva elevaciones gastos;
- b) una ley de descarga de un vertedor o de una estructura de control;
- c) una relación del nivel con el tiempo, como la marea.

### 2.5.2 Tipos de condiciones de frontera.

En los casos en que las condiciones de frontera determinan el transitorio debe tenerse cuidado con el manejo de éstas. Por ejemplo, si aguas abajo se impone como condición de frontera una ley  $Q(x_L, t)$  (como el gasto que se extraería en una obra de toma) pueden generarse problemas si se extrae del canal más agua de la disponible. Se hace notar aquí que, en régimen subcrítico no debe usarse como condición de frontera aguas arriba una curva elevaciones-gastos  $Q(h)$ ; esta condición de frontera genera inestabilidad (ver Cunge et al (1980)) dado que un incremento en el nivel (que puede ser debido a un remanso aguas abajo) provoca un incremento en el gasto que entra al cauce, que a su vez causará un incremento en el nivel y así sucesivamente.

El dar una curva elevaciones gastos aguas arriba equivale a dar información de dos variables cuando sólo se requiere dar una.

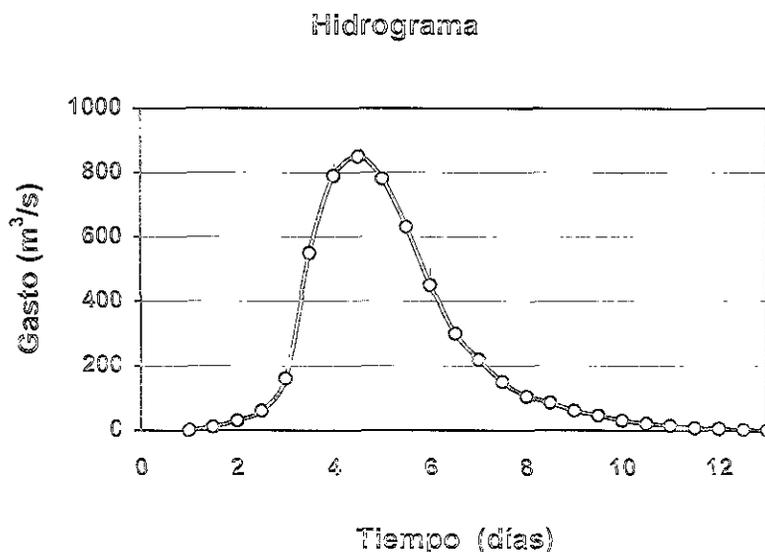


Figura 2.5 Hidrograma tipo considerado como una condición de frontera.

### 2.5.3 Condiciones de frontera para un cuerpo de agua comunicado al mar.

Para este caso en particular, el estudio está enfocado a cuerpos de agua con una entrada, como puede ser el caso de esteros, donde la velocidad perpendicular a la orilla del estero es nula excepto en la bocana o entrada. La orilla se toma como el perímetro del área de la superficie libre del estero correspondiente al nivel medio del mar.

El elemento que excita al sistema del cuerpo de agua es la marea astronómica (en adelante se llamará marea). Esta se toma en cuenta al proporcionar, a la entrada del estero, la elevación del nivel del mar en cada tiempo de interés. Para tener información de las frecuencias, amplitudes y ángulos de fase más importantes de las variaciones cíclicas de los ascensos y descensos del nivel del agua es conveniente descomponer la marea en sus componentes.

Las características de sus componentes se determinan a partir de un modelo teórico o de observación en una localidad (análisis de marea). La ecuación básica con la que se representa la marea es la siguiente

$$\zeta(t) = d + \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi t / T_i - \phi_i) \tag{2.80}$$

en la cual

- $\zeta(t)$  nivel del agua en el tiempo  $t$
- $d$  profundidad respecto al nivel medio del mar
- $a_i$  amplitud del componente  $i$
- $T_i$  periodo del componente  $i$
- $\phi_i$  ángulo de fase del componente  $i$
- $n$  número de componentes

Existen versiones modificadas de la ecuación 2.80 que pretenden mejorar la estimación de  $\zeta(t)$  por medio de algunos factores correctivos aplicados a la amplitud y ángulo de fase.

El modelo matemático propuesto utiliza una marea similar a la de la figura 2.6 por medio de la asignación de los valores del nivel del agua a través de cuatro funciones coseno.

La elevación de la marea en el tiempo  $t$  comprendido entre  $t_k$  y  $t_{k+1}$  se obtiene por medio de la ecuación siguiente

$$\zeta = \frac{\zeta_k - \zeta_{k+1}}{2} \cos\left(\frac{\pi(t - t_k)}{t_{k+1} - t_k}\right) + \frac{\zeta_k + \zeta_{k+1}}{2} \tag{2.81}$$

Los valores  $\zeta_{t_k}$  corresponden puntos extremos, a saber pleamar alto, pleamar bajo, bajamar alta y bajamar baja y  $t_k$  a los tiempos en que se presentan, además se tiene en cuenta que

$$\zeta_5 = \zeta_1 \text{ y } t_5 = T$$

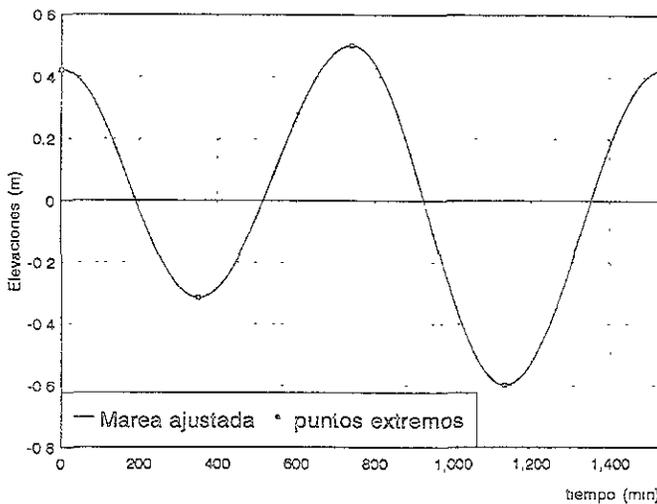


Figura 2.6 Puntos extremos en dos periodos de marea

# CAPÍTULO 3

---

## Método propuesto

*Se presenta en este capítulo los fundamentos del método matemático propuesto para conocer la hidrodinámica de un cuerpo de agua. Se establecen las hipótesis y las ecuaciones empleadas, así como las consideraciones para tomar en cuenta las condiciones de frontera*

Para resolver las ecuaciones de conservación establecidas en el capítulo 2 se emplea un método numérico de diferencias finitas. Este se apoya en una malla regular de rectángulos que cubre el área de la superficie libre de la zona en estudio.

Para calcular el flujo del agua en el cuerpo de agua se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales formado por las expresiones 3.12, 3.13 y 3.14 considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

Como no existe un método analítico para encontrar la solución de las ecuaciones mencionadas, para dar con una solución aproximada de las mismas, se propone un método de diferencias finitas.

El área (en proyección horizontal) de la región que es susceptible de inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo  $\Delta x$  y ancho  $\Delta y$ . El conjunto de estas celdas forma una malla (fig. 3.1).

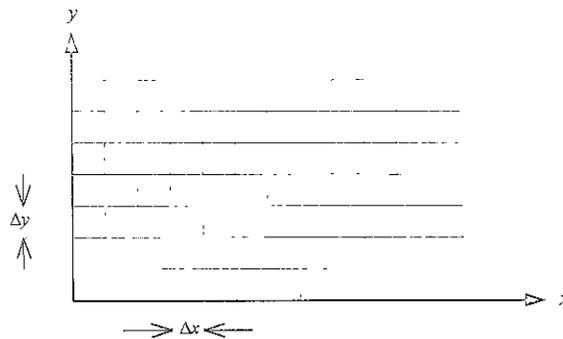


Figura 3.1 Zona de cálculo dentro de la cual se encuentra el área de inundación.

### 3.1 Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento

Las ecuaciones 3.12 y 3.13 pueden escribirse como

$$u u + \alpha \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} = -\alpha \left[ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \right] \tag{3.1}$$

$$v v + \alpha \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = -\alpha \left[ \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \right] \tag{3.2}$$

siendo

$$\alpha = \frac{h^4}{n^2} \tag{3.3}$$

Las velocidades se consideran ubicadas a la mitad de los lados de las celdas. Los tirantes y elevaciones del terreno se localizan en el centro de ellas.

Se propone expresar la ecuación 3.1 en diferencias finitas del modo siguiente

$$u_{i-1/2,j}^{p+1} u_{i+1/2,j}^{p+1} + \alpha_{i+1/2,j}^p \frac{u_{i+1/2,j}^{p+1} - u_{i+1/2,j}^p}{g\Delta t} = -\alpha_{i+1/2,j}^p \left[ \frac{h_{i+1,j}^p - h_{i,j}^p}{\Delta x} + \frac{z_{i+1,j} - z_{i,j}}{\Delta x} \right] \quad (3.4)$$

donde

$$h_{i,j}^p = h(x, y, t) = h(i\Delta x, j\Delta y, p\Delta t)$$

$$x = i\Delta x; \quad y = j\Delta y; \quad t = p\Delta t$$

$$u_{i+1/2,j}^p = u(x + \Delta x / 2, y, t) = u((i + 1/2)\Delta x, j\Delta y, p\Delta t)$$

$$z_{i,j} = z(x, y) = z(i\Delta x, j\Delta y)$$

En las expresiones anteriores  $i$  y  $j$  son subíndices que se emplean para ubicar en el espacio a las literales de interés (figura 3.2) y  $p$  un superíndice que representa al instante en que se considera a dichas literales.

El parámetro  $\alpha_{i+1/2,j}^p$  se determina así

$$\alpha_{i+1/2,j}^p = \left( \frac{h_{i+1,j}^p + h_{i,j}^p}{2} \right)^{4/3} \frac{1}{n_{i+1/2,j}^2} \quad (3.5)$$

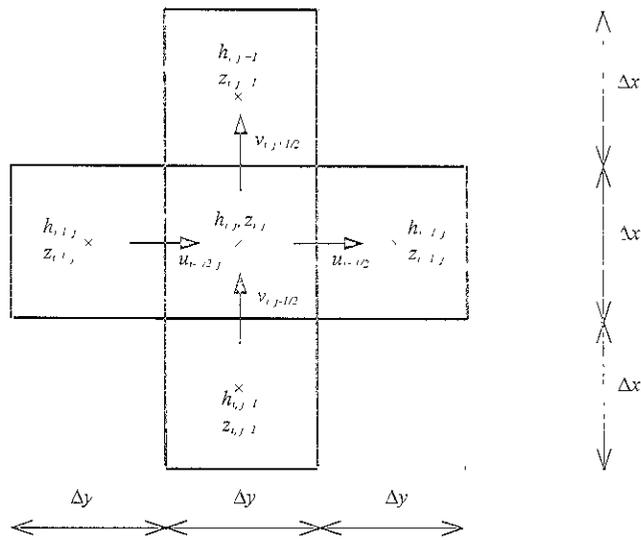


Figura 3.2 Arreglo de celdas considerado en el método numérico.

donde

$$n_{i+1,2,j} = \frac{n_{i,j} + n_{i+1,j}}{2}$$

La ecuación 3.4 puede ser escrita como

$$u_{i+1,2,j}^{p+1} u_{i+1,2,j}^{p+1} + B_x u_{i+1,2,j}^{p+1} + C_x = 0 \tag{3.6}$$

siendo

$$B_x = \frac{\alpha_{i+1,2,j}^p}{g \Delta t} \tag{3.7}$$

$$C_x = \frac{\alpha_{i+1,2,j}^p}{\Delta x} (h_{i+1,j}^p - h_{i,j}^p + z_{i+1,j} - z_{i,j}) - \alpha_{i+1,2,j}^p u_{i+1,2,j}^p \tag{3.8}$$

Como los tirantes son positivos o nulos,  $B_x$  es positiva o igual a cero.  $C_x$  es un número real, por lo que para resolver la ecuación 3.6 se consideran dos casos:

Caso a:  $C_x \leq 0$

La velocidad  $u_{i+1/2,j}^{p+1}$  sería positiva para cumplir con la ecuación 3.6. En estas condiciones

$$u_{i-1/2,j}^{p+1} = u_{i+1/2,j}^{p+1}$$

con lo cual la ecuación 4.6 quedaría como una ecuación de segundo grado cuya solución sería

$$u_{i+1/2,j}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( -B_x + \sqrt{B_x^2 - 4C_x} \right) \tag{3.9}$$

El argumento de la raíz cuadrada es mayor a cero (ya que  $C_x$  es negativo o nulo) y el signo de ella debe ser positivo para que la velocidad también lo sea. Así, la velocidad resulta ser positiva.

Caso b:  $C_x > 0$

Para cumplir con la expresión 3.6 la suma de sus dos primeros términos tiene que ser negativa. Así  $|u_{i+1/2,j}^{p+1}|u_{i-1/2,j}^{p+1}$  cambiaría por  $-(u_{i-1/2,j}^{p+1})^2$  de modo que la solución de la ecuación de segundo grado formada se obtendría como

$$u_{i+1/2,j}^{p+1} = -\frac{1}{2} \left( -B_x + \sqrt{B_x^2 + 4C_x} \right)$$

o sea

$$u_{i+1/2,j}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( B_x - \sqrt{B_x^2 + 4C_x} \right) \tag{3.10}$$

También en este caso el argumento de la raíz cuadrada sería positivo, y la velocidad en este caso es negativa.

Para el componente de velocidad  $v$  se sigue un razonamiento semejante. En efecto, en lugar de la expresión 3.4 se tiene que

$$v_{i,j+1/2}^{p+1} v_{i,j+1/2}^{p+1} + \beta_{i,j+1/2}^p \frac{v_{i,j+1/2}^{p+1} - v_{i,j+1/2}^p}{g\Delta t} = -\beta_{i,j+1/2}^p \left( \frac{h_{i,j+1}^p - h_{i,j}^p}{\Delta y} + \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j}}{\Delta y} \right) \quad (3.11)$$

donde

$$\beta_{i,j+1/2}^p = \left[ \frac{h_{i,j+1}^p + h_{i,j}^p}{2} \right]^{4/3} \frac{1}{n_{i,j+1/2}^2} \quad (3.12)$$

y

$$n_{i,j+1/2} = \frac{n_{i,j} + n_{i,j-1}}{2}$$

Reescribiendo la ecuación 3.11

$$v_{i,j+1/2}^{p+1} v_{i,j+1/2}^{p+1} + B_y v_{i,j+1/2}^{p+1} + C_y = 0 \quad (3.13)$$

siendo

$$B_y = \frac{\beta_{i,j+1/2}^p}{g\Delta t} \quad (3.14)$$

$$C_y = \frac{\beta_{i-1/2,j}^p}{\Delta y} (h_{i,j+1}^p - h_{i,j}^p + z_{i,j+1} - z_{i,j}) - \frac{\beta_{i,j+1/2}^p}{g\Delta t} v_{i,j-1/2}^p \quad (3.15)$$

En la dirección  $y$  se tendrá para

a)  $C_y \leq 0$

$$v_{i,j+1/2}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( -B_y + \sqrt{B_y^2 - 4C_y} \right) \quad (3.16)$$

b)  $C_y > 0$

$$v_{i,j+1/2}^{p+1} = \frac{1}{2} \left( B_y - \sqrt{B_y^2 + 4C_y} \right) \quad (3.17)$$

### 3.2 Ecuación de continuidad

La ecuación 3.14 en diferencias finitas se considerará del modo siguiente

$$\frac{h_{i,j}^{p+1} - h_{i,j}^p}{\Delta t} + \frac{u_{i+1/2,j}^{p+1} (h_{i+1,j}^p + h_{i,j}^p) - u_{i-1/2,j}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i-1,j}^p)}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1/2}^{p+1} (h_{i,j+1}^p + h_{i,j}^p) - v_{i,j-1/2}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i,j-1}^p)}{2\Delta y} = 0$$

Ordenando términos se llega a

$$\begin{aligned}
 h_{i,j}^{p+1} = h_{i,j}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} & \left[ u_{i+1/2,j}^{p+1} (h_{i+1,j}^p + h_{i,j}^p) - u_{i-1/2,j}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i-1,j}^p) \right] - \\
 & - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{i,j+1/2}^{p+1} (h_{i,j+1}^p + h_{i,j}^p) - v_{i,j-1/2}^{p+1} (h_{i,j}^p + h_{i,j-1}^p) \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Con las ecuaciones 3.9 ó 3.10, 3.16 ó 3.17 y 3.18 se obtienen los valores de  $u$ ,  $v$  y  $h$  en el tiempo  $(p+1)\Delta t$  para las celdas ubicadas en el interior de la zona donde ocurre la inundación.

### 3.3 Condiciones para resolver las ecuaciones fundamentales.

Para la solución de las ecuaciones diferenciales de movimiento se consideran las condiciones iniciales y de frontera que se describen a continuación.

El elemento que excita al sistema del estero es la marea astronómica (en adelante se llamará marea). Esta se toma en cuenta al proporcionar, a la entrada del estero, la elevación del nivel del mar en cada tiempo de interés.

#### 3.3.1 Condiciones iniciales.

Para comenzar los cálculos con el modelo matemático en el tiempo inicial  $t_0$  es necesario asignar valores a las variables  $u$ ,  $v$  y  $h$ . En este caso, en el tiempo  $t$  se asigna a la profundidad  $h$  el nivel de pleamar y a las velocidades  $u$ ,  $v$  el valor cero.

### 3.3.2 Condiciones para las fronteras izquierda y derecha.

Se considera que en estas fronteras la velocidad es nula. Atendiendo a la ubicación de variables de la figura 3.3, cuando  $i$  es igual a 1, la velocidad  $u_{i-1/2, j} = u_{1/2, j}$  es igual a cero. Lo mismo puede decirse de la velocidad  $u_{i-1/2, j} = u_{M-1/2, j}$  cuando  $i$  adquiere su valor máximo posible en la zona en estudio ( $i = M$ ).

En efecto, para el cálculo de la profundidad  $h$  en la frontera izquierda ( $i = 1$ ) la ecuación 3.18 queda así

$$h_{1,j}^{p+1} = h_{1,j}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{3,2,j}^{p+1} (h_{2,j}^p + h_{1,j}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{1,j+1/2}^{p+1} (h_{1,j+1}^p + h_{1,j}^p) - v_{1,j-1/2}^{p-1} (h_{1,j}^p + h_{1,j-1}^p) \right] \tag{3.19}$$

y para la frontera derecha ( $i = M$ ) se plantea de este modo

$$h_{M,j}^{p+1} = h_{M,j}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ -u_{M-1,2,j}^{p+1} (h_{M,j}^p + h_{M-1,j}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{M,j+1/2}^{p+1} (h_{M,j+1}^p + h_{M,j}^p) - v_{M,j-1/2}^{p+1} (h_{M,j}^p + h_{M,j-1}^p) \right] \tag{3.20}$$

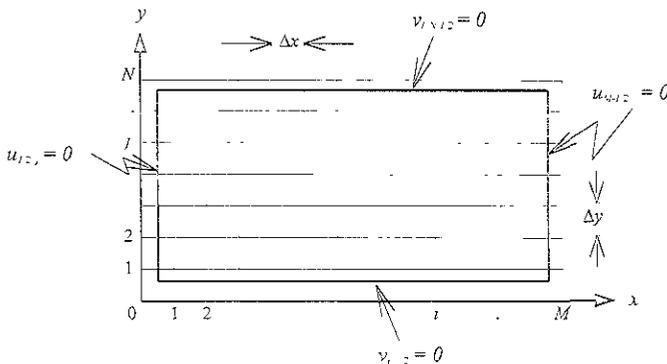


Figura 3.3 Condiciones de frontera consideradas en el esquema de cálculo.

### 3.3.3 Condiciones para las fronteras superior e inferior.

Se considera que en estas fronteras la velocidad es igual a cero. Así en las celdas de la frontera superior ( $j = N$ ) se tiene que  $v_{i,j-1/2} = v_{i,N-1/2} = 0$ . En lo que respecta a la frontera inferior ( $j = 1$ ), las velocidades  $v_{i,j-1/2} = v_{i,1/2} = 0$ .

De la ecuación 3.18, el cálculo de la profundidad  $h$  para la frontera superior se calcula con la expresión siguiente

$$h_{i,N}^{p+1} = h_{i,N}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{i+1/2,N}^{p+1} (h_{i+1,N}^p + h_{i,N}^p) - u_{i-1/2,N}^{p+1} (h_{i,N}^p + h_{i-1,N}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ -v_{i,N-1/2}^{p+1} (h_{i,N}^p + h_{i,N-1}^p) \right] \quad (3.21)$$

y para la frontera inferior se tiene

$$h_{i,1}^{p+1} = h_{i,1}^p - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[ u_{i-1/2,1}^{p+1} (h_{i+1,1}^p + h_{i,1}^p) - u_{i-1/2,1}^{p+1} (h_{i,1}^p + h_{i-1,1}^p) \right] - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[ v_{i,3/2}^{p+1} (h_{i,2}^p + h_{i,1}^p) \right] \quad (3.22)$$

### 3.3.4 Comunicación entre el mar y el cuerpo de agua.

El elemento que excita al sistema del estero es la marea. Esta se toma en cuenta al imponer que en la entrada del estero la elevación del agua es igual a la del nivel del mar en cada tiempo de interés.

Las características de los componentes de la marea se determinan a partir de un modelo teórico o de observación en una localidad. La ecuación básica que representa a la marea es la ecuación 2.80 presentada en el capítulo anterior.

Existen versiones modificadas de la ecuación 2.80 para mejorar la estimación de  $\zeta(t)$  por medio de algunos factores correctivos aplicados a la amplitud y ángulo de fase.

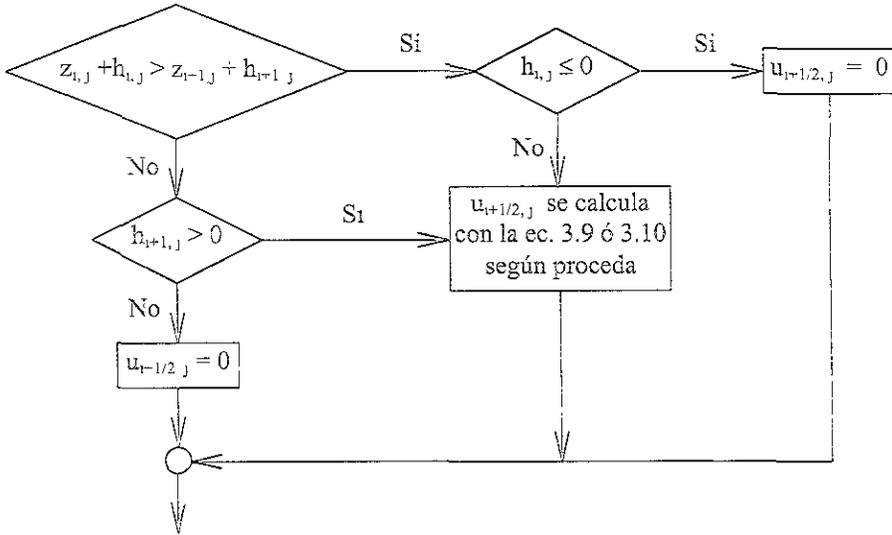
Se considera que en una o varias de las celdas de la orilla donde el estero se comunica con el mar la elevación del agua corresponde a la del nivel medio del mar dada con la ecuación. 3.23 y que en esta o estas celdas la velocidad es distinta de cero.

### 3.3.5 Consideraciones al cálculo del área inundable.

Cuando el flujo del estero implica áreas de inundación variables es necesario incluir varias condiciones en el cálculo de las velocidades.

Se observa en las ecuaciones 3.12 y 3.13 que si la derivada parcial del tirante es nula y la derivada parcial de la elevación del fondo es distinta de cero, la velocidad del flujo debe ser igual a cero para cumplir con la ecuación de continuidad. Además conforme avanza el tiempo, se establece un flujo bidimensional en la región inundable y, si no tiene aportaciones ni extracciones de gasto, las velocidades del agua disminuyen hasta llegar a ser cero.

En el diagrama de la figura 3.4 se muestra la forma en que se lleva a cabo el cálculo de las velocidades en la dirección  $x$  en el método numérico. Para la velocidad en la dirección  $y$  se sigue un procedimiento similar.



**Figura 3.4** Cálculo de las velocidades del flujo en el método numérico propuesto.

# CAPÍTULO 4

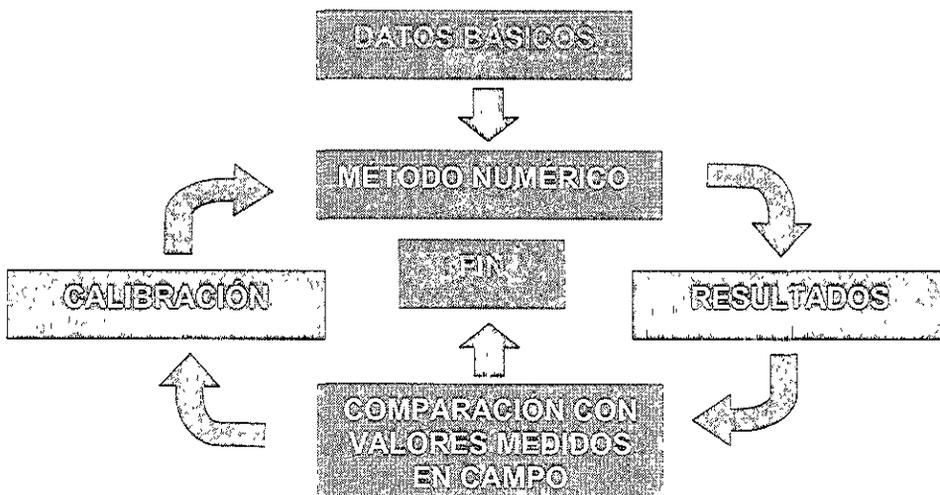
---

## Caso de aplicación 1:

### Estero “El Salado”<sup>55</sup>

*El método propuesto se ha aplicado a dos casos reales: el estero El Salado en Puerto Vallarta, Jalisco y la laguna de Agua Brava, Nayarit. Aquí se describe la problemática del caso 1 y las actividades realizadas para la calibración del modelo y el cálculo de la hidrodinámica.*

En la mayoría de los modelos numéricos existen variables (por ejemplo el coeficiente de rugosidad) cuyo valor depende de las condiciones específicas del sitio o caso en donde éste se desea aplicar; es por ello que para obtener resultados más confiables se requiere efectuar mediciones de parámetros que permitan estimar la magnitud de estas variables (Figura 4.1).



*Figura 4.1 Calibración del modelo numérico*

El modelo numérico presentado en el capítulo anterior se aplicó a dos problemas específicos. En ambos casos fue posible realizar pruebas de campo para calibrar el modelo. A continuación se describe la problemática específica de cada caso y las actividades realizadas para obtener una solución a ella.

#### 4.1 Descripción del problema a resolver.

El estero "El salado" se localiza en la Bahía de Banderas, en el estado de Jalisco (entre las coordenadas geográficas  $20^{\circ}39'45''$  de latitud norte y  $105^{\circ}14'30''$  de longitud oeste). Se ubica al norte de las zonas urbanas de Puerto Vallarta y Pitillal, y al sur del aeropuerto Internacional Gustavo Díaz Ordaz. Está limitada al norte y oeste por la carretera federal 200 Tepic-Vallarta; al este por el camino Pitillal-Ixtapa y al sur por la Av. Politécnico Nacional.

Este estero ha sufrido una desecación paulatina debido a la transformación urbana de su entorno. Esto ha reducido su área original y actualmente cuenta con 83 hectáreas aproximadamente sujetas a inundación perenne o temporal (área que se inunda cuando se presenta la pleamar media superior), de las cuales cerca de 64 hectáreas permanecen constantemente inundadas (área que se inunda cuando se presenta la bajamar media inferior).

En el estero existe actualmente una comunidad vegetal formada principalmente por manglar. En este sitio cohabitan distintas especies animales: aves, peces, y crustáceos. A pesar del deterioro de una zona del manglar, el sistema ecológico, formado por el cuerpo de agua y los animales y vegetales que en él viven, parece estar en equilibrio.

La entrada y salida de agua al estero por efecto de la marea está condicionada, entre otros factores, a la forma y ancho de la boca. Cerca de su conexión con el mar existe un puente carretero ubicado por la avenida Costera Lic. Francisco Mejía Ascencio. Esta estructura (se incluyen fotografías en el anexo C) se debe tomar en cuenta en el análisis

del funcionamiento hidráulico del estero, tanto en condiciones actuales como en condiciones de proyecto.

A finales del año de 1998 una empresa urbanista realizó un proyecto cuyo objetivo planteado es crear un ambiente propicio para la conservación de la comunidad de manglar y convertir la zona de este cuerpo de agua en un parque urbano que incluye un área habitacional y dentro del cual sea posible llevar acabo actividades recreativas tales como paseos en embarcación y visitas a tierra en algunas zonas. El proyecto del parque urbano considera la ocupación de 100 hectáreas. El problema consistía en determinar si, una vez construidos los canales dentro del estero, el nivel máximo del líquido en este cuerpo de agua, influenciado por la marea, podría rebasar los bordos de los canales e inundar la zona habitacional.

Este estudio se organizó en las siguientes etapas:

- a) recopilación de la información
- b) pruebas de campo
- c) calibración del modelo para condiciones actuales
- d) cálculo de la hidrodinámica en condiciones de proyecto

## 4.2 Recopilación de información

La actividad de recopilación de información permite determinar lo siguiente

- a) las características de la marea local
- b) formación de archivos con base en planos de la batimetría de la zona de estudio, tanto en condiciones actuales como futuras

#### 4.2.1 Características de la marea local

Las características de la marea local se determinaron con base en las mediciones de la variación del nivel del agua mediante la colocación de limnigrafos en la zona de estudio. Lo anterior se describe en el subcapítulo “pruebas de campo”.

#### 4.2.2 Archivos de la batimetría de la zona

La aplicación del modelo numérico para el cálculo de la hidrodinámica en cuerpos de agua requiere la *discretización* de la zona de estudio, ello consiste en formar una malla envolvente de la zona de estudio y conocer la elevación del terreno, con respecto a un plano horizontal de referencia, en el centro de cada una de las celdas que la forman.

Entre menor sea el tamaño de las celdas que forman la malla, se obtendrá mayor precisión en los resultados, pero se requerirá de mayor capacidad de memoria en el equipo de cómputo empleado para ejecutar el programa, sobre todo si el área de la zona de estudio es muy grande. En muchos casos, contar con celdas de 100x100 metros puede ser suficiente, pero ello dependerá del tipo de estudio y las necesidades del proyecto. En este caso se emplearon celdas de 100x100 m .

Después de formar el archivo de datos, es necesario identificar las celdas por donde existirá ingreso de agua a la zona de estudio. Para este caso se sabe que existe un arroyo pequeño que llega al estero, pero su gasto no es de importancia por lo que se desprecia su efecto y sólo se considera el agua que ingresa por la boca desde el mar.

Una vez formada la malla se procede a formar un archivo de datos. Este archivo está organizado mediante un sistema de filas y renglones de acuerdo con la configuración de la malla. En este archivo se anotan los valores de la elevación del terreno al centro de cada celda.

### 4.3 Pruebas de campo

#### 4.3.1 Niveles del agua

La primera prueba de campo consistió en medir la variación del nivel del agua con el tiempo mediante reglas graduadas de madera (regletas) en siete puntos distintos del estero, estos puntos se ubican en la *figura 4.2* de acuerdo con la clave de la malla empleada en el modelo numérico. Las celdas son la 4, 50, 67, 107, 129, 153 y 323. Una vez ubicadas se procedió a leer el nivel del agua a distintas horas durante el tiempo que duró la campaña. Los datos obtenidos se resumen en las tablas 4.1 a 4.3.

Regleta	Celda	Lec (cm)	Hora
1	67	- 03	6:23 PM
2	107	- 49	6:15 PM
3	129	- 37	6:02 PM
4	153	- 56	5:51 PM
5	50	- 40	6:38 PM
6	323	---	---
s/n	4	---	---

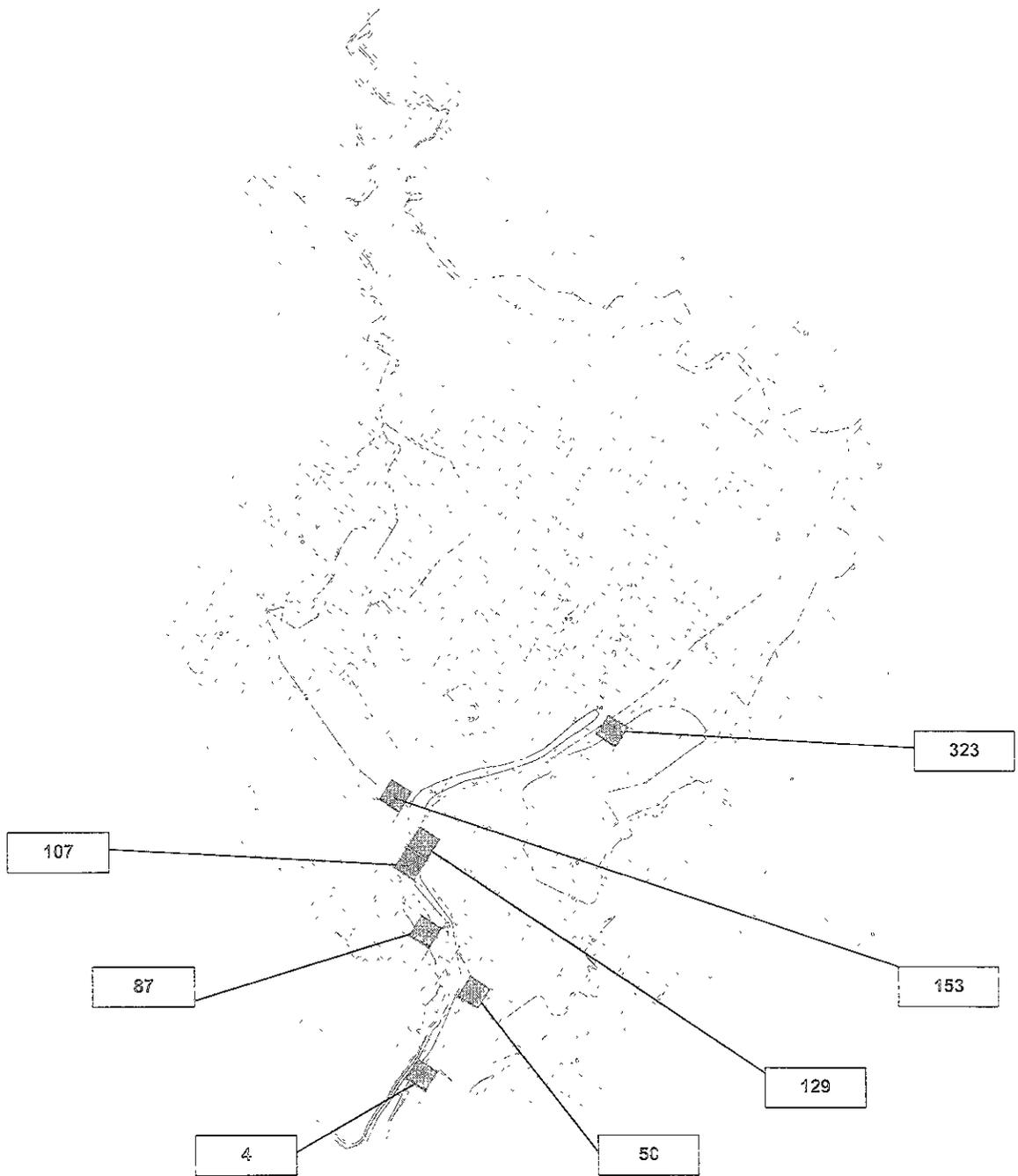
Tabla 4.1 Nivel en cada regleta (13 de noviembre)

Regleta	Celda	Lect (cm)	Hora	Lect (cm)	Hora	Lect (cm)	Hora
1	67	- 83	14:35 PM	- 80	17:36 PM	- 61	18:25 PM
2	107	- 53	14:20 PM	- 55	17:38 PM	- 45	18:18 PM
3	129	- 82	14:00 PM	- 15	17:40 PM	- 81	18:14 PM
4	153	- 56	5:51 PM	---	----	- 101	18:10 PM
5	50	- 90	18:33 PM	- 108	18:08 PM	- 90	18:40 PM
6	323	- 83	14:35 PM	- 92	17:45 PM	- 93	17:47 PM
s/n	4	- 108	18:08 PM	---	---	- 90	18:40 PM

Tabla 4.2 Nivel en cada regleta (14 de noviembre)

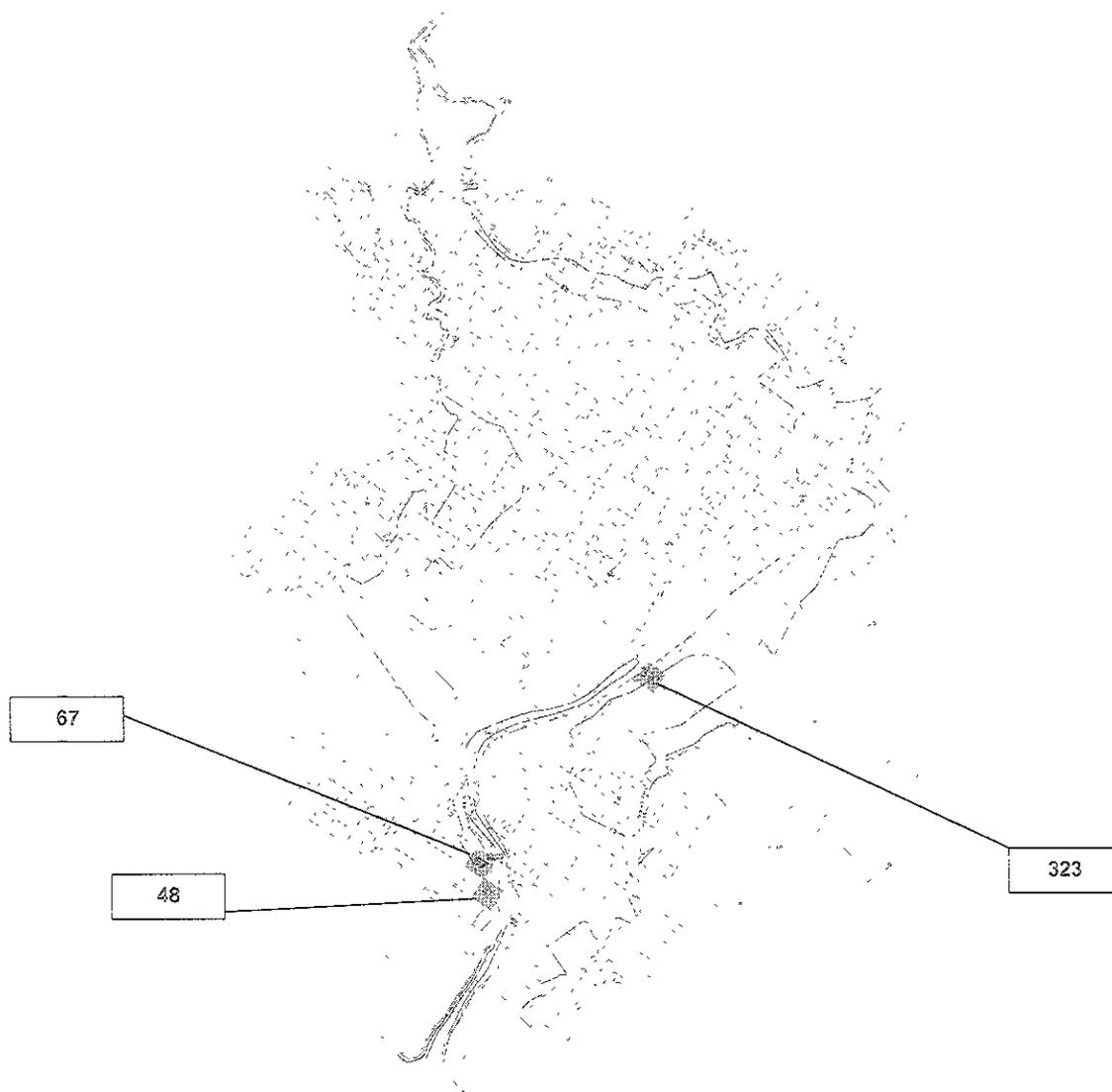
Regleta	Celda	Lectura (cm)	Hora	Lectura (cm)	Hora
s/n	4	23	7:45 PM	- 29	11:08 PM
s/n	4	19	8:02 PM	- 46	11:45 PM
s/n	4	- 16	8:17 PM	- 52	12:03 PM
s/n	4	- 11	8:41 PM	- 74	12:44 PM
s/n	4	- 8	9:17 PM	- 86	13:05 PM
s/n	4	- 12	10:11 PM	- 1.04	13:40 PM
s/n	4	- 18	10:37 PM	- 2.10	14:14 PM
s/n	4	- 25	10:48 PM		

Tabla 4.3 Nivel en regleta ubicada en el puente (15 de noviembre)



*Figura 4.2 Ubicación de regietas en el Estero El Salado*

También se midió la variación del nivel del agua empleando tres limnógrafos. Ellos se ubicaron dentro del estero en tres puntos distintos a lo largo del dren principal. En la *figura 4.3* se presenta un croquis de su ubicación, referenciada a una malla empleada en el modelo numérico. Las celdas en las que se ubicaron los limnógrafos de acuerdo con la malla son la 323, 67 y 48. Los registros obtenidos con los limnómetros se presentan en la *tabla 4.4*.



*Figura 4.3 Ubicación de los limnógrafos en el Estero El Salado*

Limn. 1 Fecha de colocación 14/11/98		
Hora	Altura	Fecha
15:30		13/11/97
16:00		13/11/97
16:30		13/11/97
17:00	0	13/11/97
17:30	-0.12	13/11/97
18:00	-0.24	13/11/97
18:30	-0.38	13/11/97
19:00	-0.53	13/11/97
19:30	-0.73	13/11/97
20:00	-0.81	13/11/97
20:30	-0.87	13/11/97
21:00	-0.93	13/11/97
21:30	-0.96	13/11/97
22:00	-0.97	13/11/97
22:30		13/11/97
23:00		13/11/97
23:30		13/11/97
0:00		13/11/97
0:30		14/11/97
1:00		14/11/97
1:30		14/11/97
2:00		14/11/97
2:30		14/11/97
3:00		14/11/97
3:30		14/11/97
4:00		14/11/97
4:30		14/11/97
5:00		14/11/97
5:30		14/11/97
6:00		14/11/97
6:30		14/11/97
7:00		14/11/97
7:30	-0.98	14/11/97
8:00	-1.01	14/11/97
8:30	-1.1	14/11/97
9:00	-1.13	14/11/97
9:30	-1.14	14/11/97
10:00	-1.13	14/11/97
10:30	-1.06	14/11/97
11:00	-0.96	14/11/97
11:30		14/11/97
12:00		14/11/97
12:30		14/11/97
13:00		14/11/97
13:30		14/11/97
14:00		14/11/97
14:30		14/11/97
15:00		14/11/97
15:30		14/11/97
16:00		14/11/97
16:30		14/11/97
17:00		14/11/97

Limn. 2 Fecha de colocación 13/11/98		
Hora	Altura	Fecha
15:30		13/11/97
16:00		13/11/97
16:30		13/11/97
17:00		13/11/97
17:30	0	13/11/97
18:00	-0.15	13/11/97
18:30	-0.3	13/11/97
19:00	-0.44	13/11/97
19:30	-0.55	13/11/97
20:00	-0.65	13/11/97
20:30	-0.73	13/11/97
21:00	-0.8	13/11/97
21:30	-0.83	13/11/97
22:00	-0.83	13/11/97
22:30	-0.79	13/11/97
23:00	-0.73	13/11/97
23:30	-0.64	13/11/97
0:00	-0.55	13/11/97
0:30	-0.43	14/11/97
1:00	-0.33	14/11/97
1:30	-0.28	14/11/97
2:00	-0.22	14/11/97
2:30	-0.18	14/11/97
3:00	-0.17	14/11/97
3:30	-0.18	14/11/97
4:00	-0.22	14/11/97
4:30	-0.3	14/11/97
5:00	-0.39	14/11/97
5:30	-0.5	14/11/97
6:00	-0.61	14/11/97
6:30	-0.73	14/11/97
7:00	-0.83	14/11/97
7:30	-0.9	14/11/97
8:00	-0.96	14/11/97
8:30	-1.02	14/11/97
9:00	-1.05	14/11/97
9:30	-1.05	14/11/97
10:00	-1.04	14/11/97
10:30	-0.96	14/11/97
11:00	-0.86	14/11/97
11:30	-0.75	14/11/97
12:00	-0.63	14/11/97
12:30	-0.46	14/11/97
13:00	-0.3	14/11/97
13:30		14/11/97
14:00		14/11/97
14:30		14/11/97
15:00		14/11/97
15:30		14/11/97
16:00		14/11/97
16:30		14/11/97
17:00		14/11/97

Limn. 3 Fecha de colocación 14/11/98		
Hora	Altura	Fecha
15:30	0	13/11/97
16:00	-0.09	13/11/97
16:30	-0.21	13/11/97
17:00	-0.35	13/11/97
17:30	-0.5	13/11/97
18:00	-0.61	13/11/97
18:30	-0.7	13/11/97
19:00		13/11/97
19:30		13/11/97
20:00		13/11/97
20:30		13/11/97
21:00		13/11/97
21:30		13/11/97
22:00		13/11/97
22:30		13/11/97
23:00		13/11/97
23:30		13/11/97
0:00		13/11/97
0:30		14/11/97
1:00		14/11/97
1:30		14/11/97
2:00		14/11/97
2:30		14/11/97
3:00		14/11/97
3:30		14/11/97
4:00		14/11/97
4:30		14/11/97
5:00		14/11/97
5:30		14/11/97
6:00		14/11/97
6:30		14/11/97
7:00		14/11/97
7:30		14/11/97
8:00		14/11/97
8:30		14/11/97
9:00		14/11/97
9:30		14/11/97
10:00		14/11/97
10:30		14/11/97
11:00	-0.66	14/11/97
11:30	-0.56	14/11/97
12:00	-0.45	14/11/97
12:30	-0.36	14/11/97
13:00	-0.26	14/11/97
13:30	0.03	14/11/97
14:00	0.1	14/11/97
14:30		14/11/97
15:00		14/11/97
15:30		14/11/97
16:00		14/11/97
16:30		14/11/97
17:00		14/11/97

Tabla 4.4 registros de los limnigrafos en el Estero El Salado

Fecha de colocación 14/11/98			Fecha de colocación 13/11/98			Fecha de colocación 14/11/98		
Hora	Altura	Fecha	Hora	Altura	Fecha	Hora	Altura	Fecha
17:30		14/11/97	17:30		14/11/97	17:30		14/11/97
18:00	0.55	14/11/97	18:00		14/11/97	18:00		14/11/97
18:30	0.65	14/11/97	18:30		14/11/97	18:30	0.68	14/11/97
19:00	0.71	14/11/97	19:00		14/11/97	19:00	0.8	14/11/97
19:30	0.75	14/11/97	19:30		14/11/97	19:30	0.87	14/11/97
20:00	0.74	14/11/97	20:00		14/11/97	20:00	0.94	14/11/97
20:30	0.72	14/11/97	20:30		14/11/97	20:30	0.97	14/11/97
21:00	0.67	14/11/97	21:00		14/11/97	21:00	0.97	14/11/97
21:30	0.62	14/11/97	21:30		14/11/97	21:30	0.97	14/11/97
22:00	0.55	14/11/97	22:00		14/11/97	22:00	0.95	14/11/97
22:30	0.47	14/11/97	22:30		14/11/97	22:30	0.9	14/11/97
23:00	0.34	14/11/97	23:00		14/11/97	23:00	0.84	14/11/97
23:30	0.22	14/11/97	23:30		14/11/97	23:30	0.82	14/11/97
0:00	0.12	14/11/97	0:00		14/11/97	0:00	0.76	14/11/97
0:30	-0.03	15/11/97	0:30		15/11/97	0:30	0.67	15/11/97
1:00	-0.06	15/11/97	1:00		15/11/97	1:00	0.59	15/11/97
1:30	-0.11	15/11/97	1:30		15/11/97	1:30	0.47	15/11/97
2:00	-0.13	15/11/97	2:00		15/11/97	2:00	0.37	15/11/97
2:30	-0.13	15/11/97	2:30		15/11/97	2:30	0.27	15/11/97
3:00	-0.06	15/11/97	3:00		15/11/97	3:00	0.18	15/11/97
3:30	-0.04	15/11/97	3:30		15/11/97	3:30	0.14	15/11/97
4:00	0.05	15/11/97	4:00		15/11/97	4:00	0.13	15/11/97
4:30	0.15	15/11/97	4:30		15/11/97	4:30	0.14	15/11/97
5:00	0.26	15/11/97	5:00		15/11/97	5:00	0.2	15/11/97
5:30	0.36	15/11/97	5:30		15/11/97	5:30	0.27	15/11/97
6:00	0.45	15/11/97	6:00		15/11/97	6:00	0.36	15/11/97
6:30	0.5	15/11/97	6:30		15/11/97	6:30	0.48	15/11/97
7:00	0.52	15/11/97	7:00		15/11/97	7:00	0.6	15/11/97
7:30	0.52	15/11/97	7:30		15/11/97	7:30	0.7	15/11/97
8:00	0.48	15/11/97	8:00		15/11/97	8:00	0.76	15/11/97
8:30	0.43	15/11/97	8:30		15/11/97	8:30	0.78	15/11/97
9:00	0.35	15/11/97	9:00		15/11/97	9:00	0.78	15/11/97
9:30	0.25	15/11/97	9:30		15/11/97	9:30	0.77	15/11/97
10:00	0.13	15/11/97	10:00		15/11/97	10:00	0.73	15/11/97
10:30	0	15/11/97	10:30		15/11/97	10:30	0.67	15/11/97
11:00	-0.15	15/11/97	11:00		15/11/97	11:00	0.6	15/11/97
11:30	-0.28	15/11/97	11:30		15/11/97	11:30	0.5	15/11/97
12:00	-0.39	15/11/97	12:00		15/11/97	12:00	0.35	15/11/97
12:30	-0.46	15/11/97	12:30		15/11/97	12:30	0.2	15/11/97
13:00	-0.5	15/11/97	13:00		15/11/97	13:00	0	15/11/97
13:30	-0.46	15/11/97	13:30		15/11/97	13:30		15/11/97
14:00	-0.37	15/11/97	14:00		15/11/97	14:00		15/11/97
14:30	-0.25	15/11/97	14:30		15/11/97	14:30		15/11/97

Tabla 4.4 registros de los limnigrafos en el Estero El Salado (continuación).

En la figura 4.4 se presenta la marea obtenida con los registros. Para el caso del limnigrafo 1 los registros empleados corresponden a los datos obtenidos entre las 16:30 del día 1 y las 5:30 del día 2. A estos registros se les resta 0.325 m para referenciarlos a un mismo plano horizontal.

En el caso del limnógrafo 2 los datos empleados corresponden al registro obtenido entre las 23:30 del día 1 y las 12:30 del día 2. A los datos se les sumó 0.590 m para referenciarlos a un mismo plano horizontal.

Para el limnógrafo 3 los datos empleados corresponden al registro obtenido entre las 18:00 del día 2 y las 7:00 del día 3. A los datos se les restó 0.560 m para referenciarlos a un mismo plano horizontal.

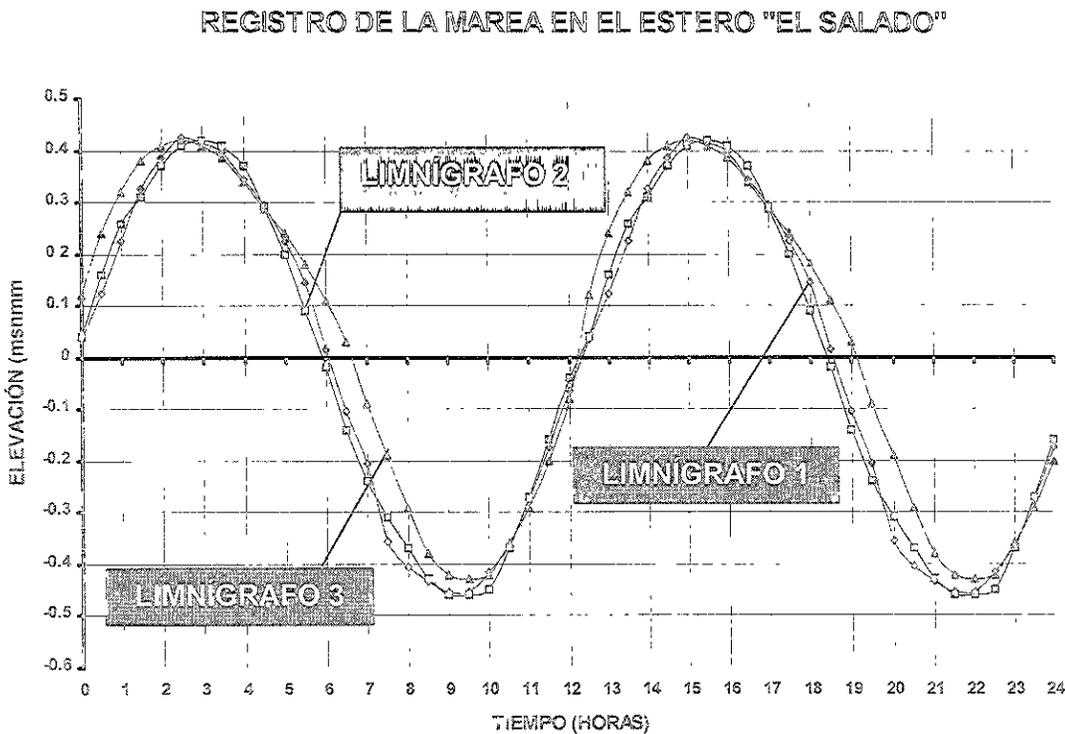


Figura 4.4 registros de la marea en el Estero El Salado

### 4.3.2 Velocidades en el estero

En la figura 4.5 se presenta un croquis en el que se ubican los sitios en los que se midió la velocidad del agua en el estero. Las celdas en que se ubican estas mediciones de acuerdo con la malla empleada en el modelo son la 15, 68, 86, 154 y 298. La velocidad se obtuvo mediante el empleo de crucetas. Las crucetas se arrojaron al agua y se registró

el tiempo que tardaba en desplazarse una distancia conocida. La velocidad corresponde a la relación de la distancia recorrida entre el tiempo que tardó en recorrerse (ver fotografías en el anexo C). Los valores medidos se presentan en las tablas 4.5 a 4.9.

*Figura 4.5 Sitios en donde se midió la velocidad del agua en el estero.*



En las siguientes tablas se presentan los resultados medidos en el estero en distintos puntos a una profundidad promedio de 1.2 m de la superficie del agua a distintas horas.

De acuerdo con la *figura 4.6*, como la distribución de las velocidades en un cauce natural o artificial no es uniforme, a fin de poder comparar las velocidades medidas con las calculadas con el modelo numérico, se debe hacer un ajuste ya que las medidas corresponden a velocidades a 1.2 metros de profundidad a partir de la superficie.

**Datos de la medición en la celda 15:**

- o Ancho del canal 17 m
- o distancia entre secciones 20 m
- o profundidad de la cruceta 1.20 m)

Medición	Lectura	Hora	Velocidad a una profundidad de 1.2 (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	47' 96"	11:00 AM	0.42	0.350
2	37' 36"	11:04 AM	0.54	0.45
3	41' 99"	11:09 AM	0.48	0.4
4	38' 68"	11:12 AM	0.52	0.43
5	34' 63"	11:25 AM	0.58	0.48
6	34' 46"	11:29 AM	0.58	0.48
7	30' 38"	11:32 AM	0.66	0.55
8	33' 12"	11:36 AM	0.60	0.5
9	36' 46"	11:40 AM	0.55	0.45
10	36' 73"	11:44 AM	0.54	0.45
11	32' 47"	12:03 PM	0.62	0.52
12	15' 00"	12:40 PM	0.67	0.56
13	12' 86"	12:43 PM	0.78	0.65
14	14' 86"	12:44 PM	0.67	0.56
15	15' 12"	12:45 PM	0.66	0.55
16	13' 35"	12:47 PM	0.75	0.67

Velocidad superficial medida con esferas de unicel en tramos de 10.00m

Medición	Lectura	Hora	Velocidad a una profundidad de 1.2 (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	16' 12"	12:48 PM	0.62	0.52
2	17' 69"	12:49 PM	0.57	0.43
3	15' 88"	12:50 PM	0.63	0.52
4	17' 35"	12:51 PM	0.58	0.48
5	16' 35"	12:52 PM	0.61	0.51
6	15' 86"	12:53 PM	0.63	0.52
7	11' 11"	12:56 PM	0.90	0.75

Tabla 4.5. Medición de velocidad en celda 15 (14 nov)

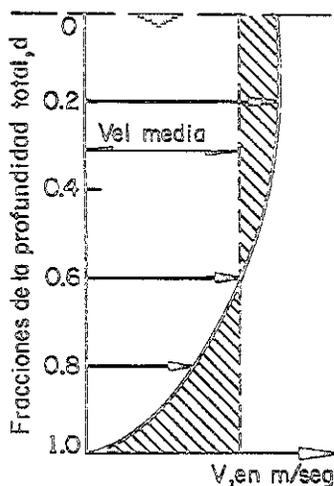


Figura 4.6 Distribución de velocidades en flujo a superficie libre

Datos de la medición en la celda 68:

- o Ancho del canal 17 m
- o profundidad de la cruceta 1.20 m

Velocidades superficiales con cruceta, tomando una distancia de 20 m, en la zona donde se ubico el limnógrafo del centro:

Medición	Lectura	Hora	Velocidad a una profundidad de 1.2 (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	28'91"	12:00 PM	0.69	0.57
2	32'14"	12:01 PM	0.62	0.52
3	33'86"	12:02 PM	0.59	0.49
4	28'24"	12:04 PM	0.71	0.59
5	39'98"	12:05 PM	0.50	0.41
6	37'35"	12:06 PM	0.54	0.45
7	33'34"	12:07 PM	0.60	0.5
8	34'17"	12:09 PM	0.59	0.49
9	35'69"	12:10 PM	0.56	0.46
10	33'86"	12:11 PM	0.59	0.49
11	34'80"	12:12 PM	0.57	0.47
12	39'98"	12:13 PM	0.50	0.42
13	41'11"	12:14 PM	0.49	0.41
14	50'53"	12:15 PM	0.40	0.33

Tabla 4.6. Medición de Velocidades en la celda 68 ( 14 nov)

Datos de la medición en la celda 154:

Velocidad superficial con cruceta en la zona de la regla No. 4, con longitud de recorrido de la cruceta de 5 m.

Medición	Lectura	Hora	Velocidad a una profundidad de 1.2 (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	8'11"	13:42PM	0.62	0.51
2	7'15"	13:45 PM	0.70	0.53
3	8'88"	13:47 PM	0.56	0.46
4	8'60"	13:48 PM	0.58	0.48
5	7'72"	13:49 PM	0.65	0.54
6	8'35"	13:49 PM	0.60	0.5
7	9'48"	13:50 PM	0.53	0.44
8	8'58"	13:50 PM	0.59	0.49
9	7'58"	13:51 PM	0.66	0.55
10	8'24"	13:51 PM	0.61	0.51
Velocidad superficial medida con esferas de unisel en tramos de 10.00m				
Medición	Lectura	Hora	Velocidad a una profundidad de 1.2 (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	17'95"	13:51 PM	0.56	0.46
2	18'36"	13:52 PM	0.55	0.46
3	20'76"	13:53 PM	0.48	0.40
4	21'86"	13:54 PM	0.46	0.38
5	17'32"	13:55 PM	0.58	0.48

Tabla 4.7 Medición de velocidad en la celda 154 (14 nov)

Datos de la medición en la celda 86:

Medición	Lectura	Hora	Velocidad a Una profundidad de 1.2 (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	8'58"	13:25 PM	0.58	0.483
2	8'26"	13:26 PM	0.61	0.508
3	6'35"	13:27 PM	0.79	0.658
4	7'47"	13:28 PM	0.67	0.558
5	9'26"	13:29 PM	0.54	0.450
6	8' 48"	13:30 PM	0.59	0.492
7	10'12"	13:40 PM	0.49	0.408
8	7'74"	13:42 PM	0.65	0.542
9	8'29"	13:45 PM	0.60	0.500
10	8'63"	13:46 PM	0.58	0.483

Tabla 4.8. Medición de velocidades en la celda 86 (14 nov)

### Datos de la medición en la celda 4:

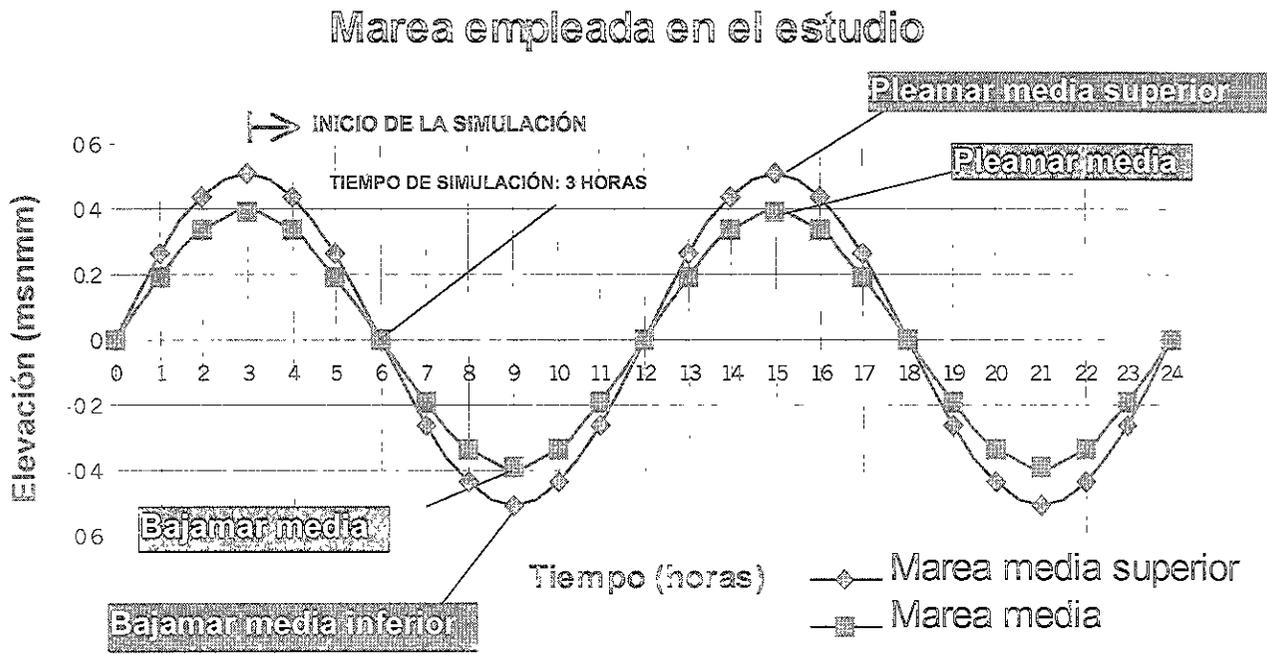
Se realizaron mediciones de velocidades en el puente, teniendo como longitud 21.10 m, empleando la cruceta a una profundidad de 1.2 m, así mismo se realizaron lecturas de la regleta que se ubico en el puente; los registros son los siguientes:

Hora	Tiempo	Velocidad (m/s)	Velocidad Media(m/s)
7:18 AM	18'47"	1.14	0.95
7:24 AM	20'86"	1.01	0.84
7:25 AM	18'36"	1.15	0.96
7:26 AM	18'74"	1.13	0.94
7:29 AM	20'23"	1.04	0.87
7:30 AM	18'35"	1.15	0.96
7:34 AM	20'35"	1.04	0.87
10:06 AM	41'74"	0.51	0.42
10:11 AM	33'12"	0.64	0.53
10:15 AM	1, 20'11"	0.26	0.22
10:18 AM	44'00"	0.48	0.4
10:21 AM	1, 41'69"	0.21	0.18
10:45 AM	55'58"	0.38	0.32
10:47 AM	43'72"	0.48	0.4
10:54 AM	45'23"	0.47	0.39
10:56 AM	27'88"	0.76	0.63
10:58 AM	28'88"	0.73	0.61
11:48 AM	16'36"	1.29	1.07
11:53 AM	22'00"	0.96	0.8
11:55 AM	15'24"	1.38	1.15
11:57 AM	16'69"	1.26	1.05
12:00 PM	16'60"	1.27	1.06
12:45 PM	16'86"	1.25	1.04
12:47 PM	14'35"	1.47	1.22
12:49 PM	14'11"	1.50	1.25
12:53 PM	14'72"	1.43	1.19
12:54 PM	13'74"	1.54	1.28
12:56 PM	14'72"	1.43	1.19
13:00 PM	15'23"	1.39	1.16
13:45 PM	17'35"	1.22	1.02
13:57 PM	17'24"	1.22	1.02
13:59 PM	16'58"	1.27	1.06
14:01 PM	18'23"	1.16	0.97
14:05 PM	16'23"	1.30	1.08
14:08 PM	19'36"	1.09	0.91
14:10 PM	17'23"	1.22	1.02

Tabla 4.9 Medición de velocidades en la celda 4 (15 nov).

#### 4.4 Calibración del modelo.

En la *figura 4.7* se ha indicado la marea empleada en el estero El Salado; así como el momento en que se inicia la simulación de la hidrodinámica en el estero. En los resultados presentados a continuación se indica el tipo de marea y el momento de la misma a que corresponde a cada análisis. De acuerdo con la *figura 4.7*, cuando el tiempo de simulación es de 3 horas, en la boca del estero el nivel de la superficie del agua corresponde al nivel medio del mar. La condición más desfavorable simulada corresponde a las de marea que tiene a la pleamar media superior y a la bajamar media inferior ya que representa las mayores variaciones del nivel del agua que existen en algunos días del mes.



*Figura 4.7 Marea empleada en el estudio*

Las condiciones de marea reducida se consideran a través de la marea con pleamar media y bajamar media. Las condiciones extremas, que es raro que ocurran se revisan mediante medios ciclos de marea, es decir, cuando el nivel del agua es igual al nivel medio del mar y cuando alcanza el nivel más alejado con respecto al nivel medio del mar, tanto para la pleamar máxima registrada y la bajamar mínima, por tanto se plantearán cuatro condiciones diferentes de marea.

- a) Pleamar media superior y bajamar media inferior
- b) Pleamar media y bajamar media
- c) Pleamar máxima registrada
- d) Bajamar mínima registrada

Por otra parte, con base en las mediciones de velocidad y niveles del agua se estimó que el coeficiente de rugosidad de la fórmula de Manning es de 0.06 ya que las velocidades calculadas y medidas eran similares. Tal fue el caso de los sitios cercanos a las celdas 15 y 154, donde las obtenidas con el modelo fueron de 0.3 m/s y las medidas eran del orden de 0.35 m/s al momento en el cual se tenía que el nivel del agua del estero coincidía con el nivel cero de la marea (entre pleamar y bajamar). Asimismo, en la celda 4, la velocidad en la sección bajo el puente obtenida con el modelo es de 0.66 m/s, pero una vez que el resultado de dicha celda se afecta por el factor de corrección de área resulta una velocidad de 1.14 m/s, similar a la medida (tabla 4.9).

Durante la medición de niveles en el estero se observó que el rango de marea era del orden de 0.9m similar al pronosticado pero en tiempos diferentes. No coincidía con los tiempos de presentación pero sí los periodos de la marea eran parecidos. Por ello se adoptó el periodo de 12 horas y los niveles de marea siguientes:

- Pleamar media superior y bajamar media inferior (0.512 y -0.512m )
- Pleamar media y bajamar media (0.390 y -0.390m)
- Pleamar máxima registrada (1.06m)
- Bajamar mínima registrada (-1.06m)

Al final de este capítulo se ubican todas las figuras a las que se hace referencia a continuación.

## 4.5 RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.5.1 Condiciones actuales

#### 4.5.1.1 Módulos de velocidad de flujo

##### a) Marea media superior (Pleamar media superior y bajamar media inferior)

Los resultados del análisis para esta condición se presentan en las figuras del anexo A. En estas figuras se aprecia que las velocidades mayores se localizan en la entrada, en el sitio cercano al puente carretero. Debido a que el ancho de la sección bajo del puente es del orden de 15 m y el ancho de las celdas empleadas por el modelo es de 25 m, la velocidad en la entrada se debe afectar por un factor (del orden de 1.67, que es la proporción entre un ancho de celda de 25 m con respecto al ancho real del cauce en la boca que es de 15 m), por lo que la velocidad real se presenta en la tabla 4.13. El valor de la velocidad a lo largo del tiempo en la sección abajo del puente, se presenta en la *figura 4.8*. Se nota una zona cercana al cauce principal en la que se incrementa la velocidad y posteriormente disminuye. Las velocidades en gran parte del cuerpo de agua tienen el mismo valor.

##### b) Marea media (Pleamar media y bajamar media).

Cuando el flujo es máximo, el 97.2% de las velocidades tienen valores mínimos entre 0 y 0.18 m/s y máximos entre 0.36 y 0.54 m/s. En forma similar al caso anterior, la velocidad en la sección bajo el puente se calcula al afectar el resultado de la celda correspondiente por un factor de corrección por área, con lo que la velocidad real es la presentada en la tabla 4.13. Las velocidades mayores se localizan en la entrada, en el sitio donde se ubica el puente.

c) Marea de pleamar máxima registrada

Las velocidades tienen valores entre 0 y 0.10 m/s las mínimas y entre 0.30 y 0.75 m/s las máximas. Se aprecia que las velocidades mayores se localizan en la entrada, cerca del puente.

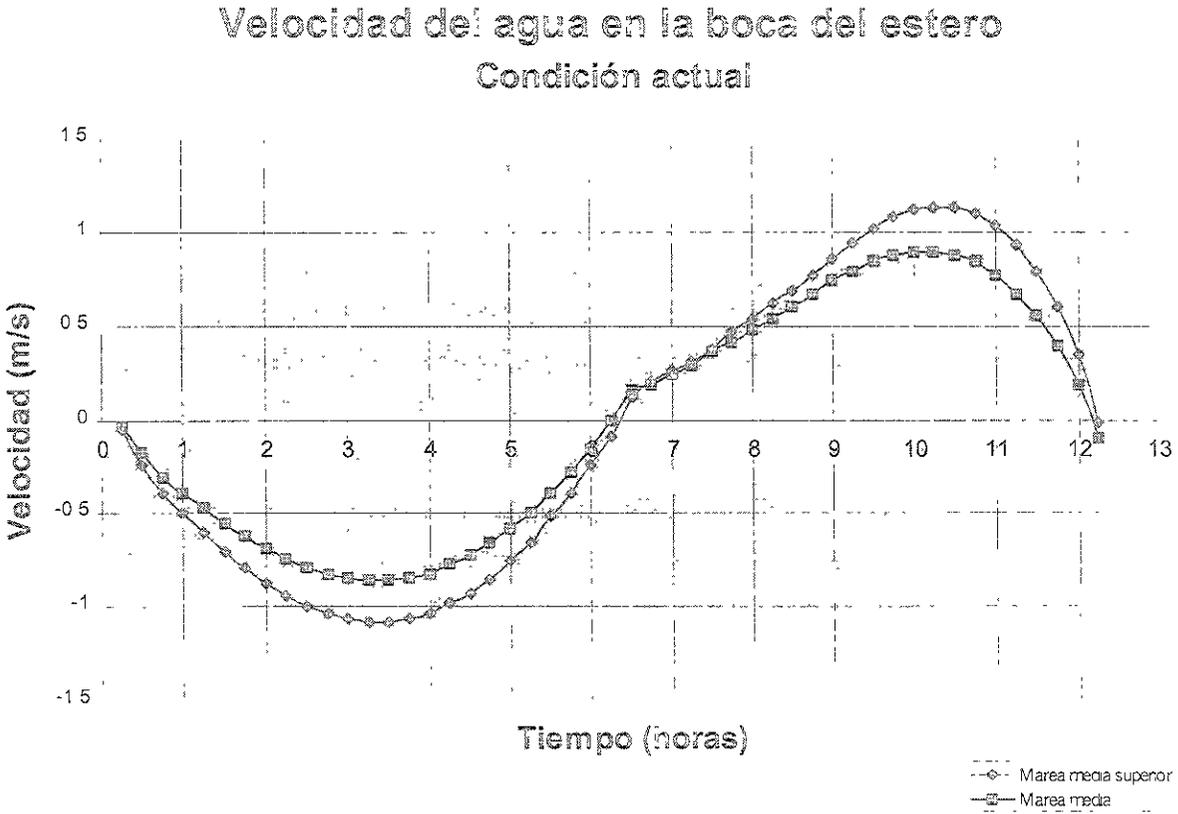


Figura 4.8 Módulos de velocidad en la entrada al estero

d) Marea de bajamar mínimo registrado

Las velocidades tienen valores entre 0 y 0.08 m/s mínimas y entre 0.15 y 0.75 m/s las máximas. Las velocidades mayores se localizan en el sitio próximo al puente. En general las velocidades tienen el mismo valor pero el nivel del agua es el menor al de los otros incisos. En este caso se presentan los resultados para el momento del nivel de agua igual al nivel medio del mar, por lo que el agua marina está entrando al estero.

#### 4.5.1.2 Profundidades del agua

La profundidad del agua es la distancia entre la superficie del agua y el fondo del estero en el sitio correspondiente. Las figuras que muestran las profundidades del agua en distintos tiempos se presentan en el anexo A.

##### a) Marea media superior (Pleamar media superior y bajamar media inferior)

Los valores de la profundidad varían desde valores mínimos entre 0.0 y 0.663 m y máximos entre 1.328 y 2.57 m. Los valores de las máximas profundidades se localizan en el cauce principal, en la zona de la entrada del estero y, conforme disminuye el fondo, se extiende el agua hacia la zona de más baja profundidad.

##### c) Marea media (Pleamar media y bajamar media).

Se aprecia que la profundidad mínima se ubica entre 0.0 y 0.663 m y la máxima entre 1.328 y 2.54 m. Los valores de las profundidades máximas se localizan en el cauce principal, en la zona de la entrada del estero y, conforme disminuye el fondo, se extiende el agua hacia la zona de más baja profundidad.

##### c) Marea de la pleamar máxima registrada

Los valores de la profundidad del agua en cada una de las celdas de cálculo y se aprecia que la profundidad mínima se ubica entre 0.0 y 0.663 m y la máxima entre 1.328 y 3.09 m.

d) Marea de bajamar mínimo registrado

La profundidad mínima se ubica entre 0.0 y 0.663 m y la máxima entre 1.328 y 1.99 m.

4.5.1.3 Gastos de agua que salen o entran al estero.

En la tabla 4.11 se presentan los resultados obtenidos referentes al gasto que sale o entra del estero para los tipos de marea empleados en el análisis. Asimismo, en la figura 4.9 se observa la variación del gasto que entra o sale por la boca del estero para un período de 12 horas. En las condiciones actuales, el máximo gasto se presenta para la pleamar media superior es de 47.27 m<sup>3</sup>/s, siendo el flujo de agua en el sentido del mar hacia el estero, y el gasto mínimo es de -38.95 m<sup>3</sup>/s (para la bajamar media inferior) cuando el flujo es del estero hacia el mar (figura 6.82, marea media superior).

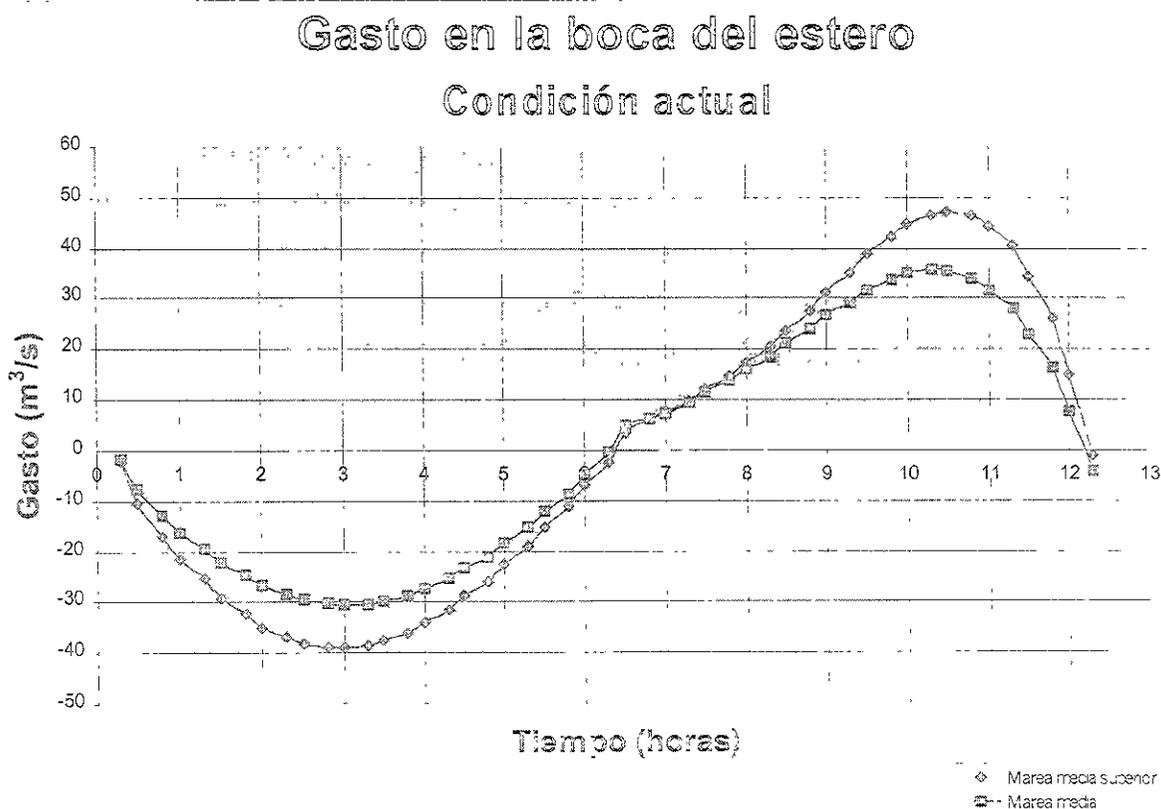


Figura 4.9 Gastos que entran o salen del estero

4.5.2 condiciones de proyecto

4.5.2.1 Módulos de velocidad de flujo

En la figura 4.10 se presenta la variación de la velocidad para un período de 12 horas en condiciones de proyecto

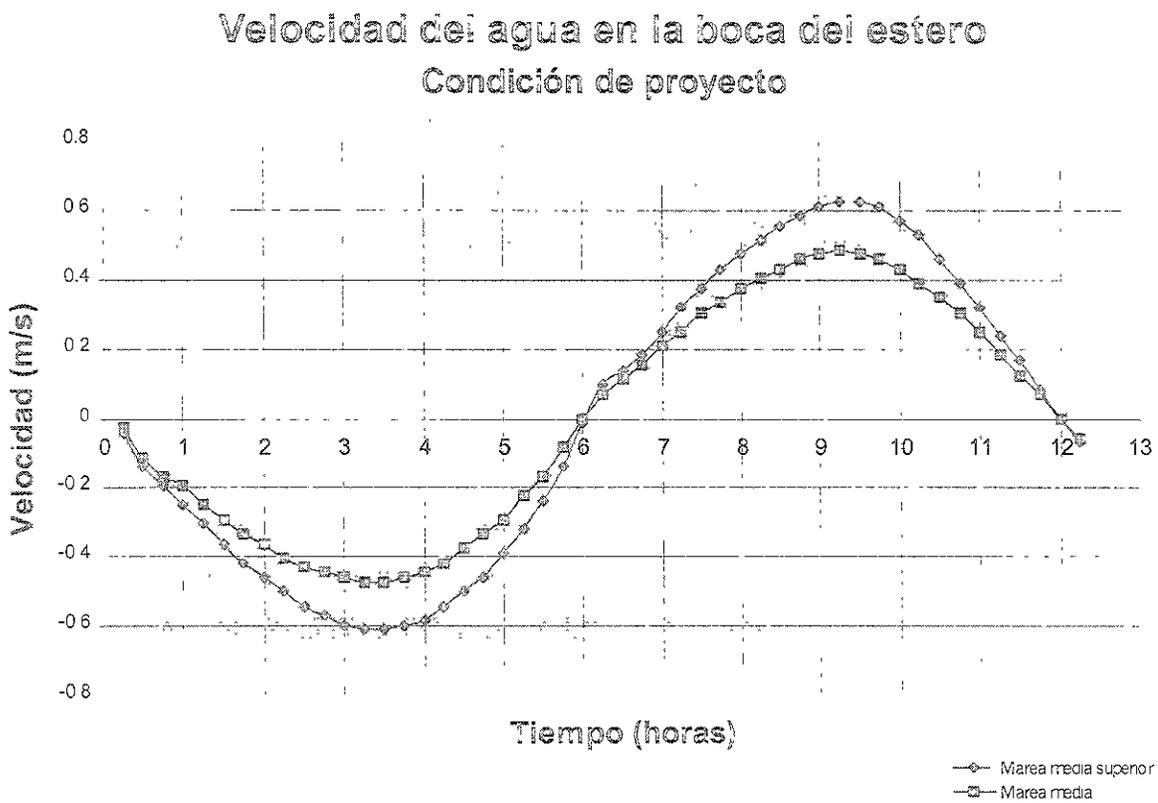


Figura 4.10 Módulos de velocidad en la entrada al estero (proyecto)

a) Marea media superior (Pleamar media superior y bajamar media inferior)

Los resultados del análisis para la condición que toma en cuenta la ampliación en la boca del estero se presentan en el anexo A. Ahí se observa que las velocidades mínimas están entre 0 y 0.10 m/s y las máximas entre 0.30 y 0.80 m/s. Haciendo una consideración

similar a la condición de proyecto y tomando en cuenta que el ancho de la sección bajo el puente se amplía del orden de 3 veces con respecto a la condición actual, a cada una de las dos celdas de la entrada, se les afectará por un factor de corrección por área (del orden de 1.39). Los resultados se presentan en la tabla 4.13.

b) Marea media (Pleamar media y bajamar media).

Tomando en cuenta la ampliación en la boca del estero, las velocidades que se presentan son del orden de 0.52 m/s como máximo, a diferencia de la condición sin ampliación en que la máxima velocidad es de 0.63 m/s. Los módulos de velocidad para esta condición se presentan en la *figura 4.10*.

c) Marea de pleamar máxima registrada

Las velocidades que se presentan son del orden de 0.59 m/s como máximo, a diferencia de la condición sin ampliación en que la máxima velocidad es de 0.72 m/s.

d) Marea de bajamar mínimo registrado

Las velocidades que se presentan son del orden de 0.65 m/s como máximo.

#### 4.5.2.2 Profundidades del agua

a) Marea media superior (Pleamar media superior y bajamar media inferior)

La profundidad del agua se ubica entre 0.0 y 1.00 m y la máxima entre 2.00 y 2.53 m. Las mayores profundidades se localizan en el cauce principal, en la zona de la entrada del estero y, conforme disminuye el fondo, se extiende el agua hacia la zona de más baja. Existe una zona que queda descubierta de agua para esta condición de marea.

b) Marea media (Pleamar media y bajamar media).

Los valores de la profundidad del agua se ubican entre 0.0 y 1.00 m y la máxima entre 2.00 y 2.52 m. Las mayores profundidades se localizan en el cauce principal, existe una zona que queda descubierta de agua para esta condición de marea.

c) Marea de la pleamar máxima registrada

La profundidad del agua es como mínimo entre 0.0 y 1.00 m y máximo entre 2.00 y 3.07 m.

d) Marea de bajamar mínimo registrado

Se observa que los valores de la profundidad del agua se ubica entre 0.0 y 1.00 m y la máxima entre 2.00 y 1.98 m.

#### *4.5.2.4 Gastos de agua que salen o entran al estero.*

En la tabla 4.11 se presentan los resultados obtenidos referentes al gasto que sale o entra del estero para los tipos de marea empleados en el análisis. Asimismo, en la figura 6.84 se observa la variación del gasto que entra o sale por la boca del estero para un período de 12 horas. En las condiciones de proyecto, el máximo gasto se presenta para la pleamar media superior es de  $59.41 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo el flujo de agua en el sentido del mar hacia el estero, y el gasto mínimo (para la bajamar media inferior) es de  $-53.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , cuando el flujo es del estero hacia el mar.

### Gasto en la boca del estero Condición de proyecto c/ ampliación de la boca

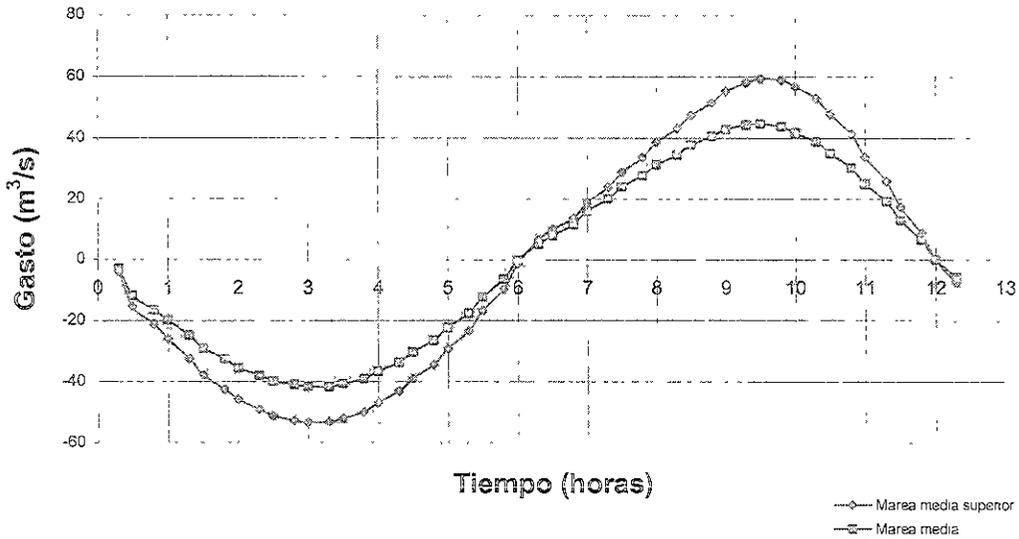


Figura 4.11 Gastos que entran o salen del estero (condiciones de proyecto)

#### 4.6 Resumen de resultados

En las tablas siguientes se consignan varios valores importantes que permiten realizar una comparación entre las condiciones actuales y las de proyecto. Para la marea media superior y marea media se tienen volúmenes y gastos máximos más grandes para las condiciones de proyecto.

Ciclo de marea	Condición actual	Condición de proyecto
ENTRE PMR Y BMR	0.912	0.839
ENTRE PMS Y BMS	0.609	0.744
ENTRE PM Y BM	0.475	0.574
MÍNIMA REGISTRADA	0.301	0.634

Tabla 4.10 Volúmenes de agua que entran al estero en cada ciclo de marea (hm<sup>3</sup>)<sup>2</sup>.

Tipo de marea	Condición actual	Condición de proyecto
MÁXIMA REGISTRADA	62.47	60.67
MEDIA SUPERIOR	47.27	59.41
MEDIA	35.62	44.63
MÍNIMA REGISTRADA	24.67	47.76

Tabla 4.11 Gastos máximos de entrada o salida<sup>3</sup> en la boca del estero (puente) en m<sup>3</sup>/s

Nivel de marea	Elevación(m) <sup>4</sup>	Volúmenes (hm <sup>3</sup> )		Área (ha)	
		Actual	Proyecto <sup>3</sup>	Actual	Proyecto <sup>3</sup>
Pleamar Máxima Registrada	1.065	1.276	2.096	106.43	81.06
Pleamar Media Superior	0.521	0.749	1.655	84.50	78.87
Pleamar Media	0.390	0.649	1.559	80.18	78.62
Nivel Medio	0.000	0.364	1.257	65.56	76.25
Bajamar Media	-0.390	0.173	0.985	32.87	62.81
Bajamar Media Inferior	-0.521	0.139	0.911	24.00	58.62
Bajamar Mínima Registrada	-1.065	0.063	0.623	8.81	49.00

Tabla 4.12 Resumen de datos de volúmenes de agua dentro del vaso del estero y área inundada.

Tipo de marea	Velocidad máxima (m/s)	
	Condiciones actuales	Condiciones de proyecto
Máxima registrada	1.28	0.54
Marea Media Superior	1.14	0.62
Marea Media	0.89	0.48
Mínima registrada	0.69	0.59

Tabla 4.13 Resumen de velocidades en la sección bajo del puente en el estero.

<sup>2</sup> hm<sup>3</sup>=hectómetro cúbico=millón de metros cúbicos

<sup>3</sup>La condición de proyecto anotada es la que considera una ampliación en la boca del estero.

<sup>4</sup> Nivel Sobre el nivel medio del mar La marea pleameada se presenta en la figura 4.7

# CAPÍTULO 5

---

## Caso de aplicación 2:

### Laguna “Agua Brava”

*En este capítulo se presentan los resultados del cálculo de la hidrodinámica en la laguna de Agua Brava, Nayarit. Se describen las pruebas de campo realizadas para la calibración del modelo y se presentan los resultados.*

El sistema Lagunar del Norte de Nayarit, se extiende desde los límites con el Estado de Sinaloa y está constituido por el estero de Teacapán, el estero Puerta del Río, las lagunas de Chaüin Chuiga-Las garzas, el estero de Cuautla, La Laguna El Valle y la laguna de Agua Brava, siendo esta última el vaso regulador y su cuerpo de agua más importante. Este sistema tiene comunicación con el Océano Pacífico en dos sitios que son la Boca de Cuautla y la Boca de Teacapán, distantes aproximadamente 40 km una de otra (Figura 1).

#### 5.1 Descripción del problema

En los años de 1974 y 1976 la entonces Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH), realizó la apertura de la Boca de Cuautla en un sitio cercano a la población de Palmar de Cuautla, para lo cual se construyeron dos escolleras de roca natural con una separación de 200 m y un canal de comunicación con un ancho de 40 m y una profundidad de 2.0 m referencia al nivel medio del mar. Este canal dio como resultado una mejoría en el intercambio hidráulico entre el sistema y el mar, cambiando su comportamiento de un cuerpo interior de agua dulce por uno de agua salobre, obteniendo buenos resultados en cuanto a producción de diversas especies de peces y crustáceos, previa a la apertura de la boca la producción pesquera en el interior era insignificante; una vez hecha la



Debido a que la laguna de Agua Brava es capaz de soportar un gran prisma de mareas y del volumen considerable que aportan los ríos en época de avenidas, la sección hidráulica del canal entre escolleras resultó insuficiente para descargar tales gastos, para poder compensar el área hidráulica requerida, dicho canal se fue profundizando de manera natural a través de los años. Además los efectos provocados por los ciclones que inciden con relativa frecuencia en la región degradaron sistemáticamente las obras de protección.

En 1994 el ciclón Rosa ocasionó serios deterioros en las escolleras debido a las avenidas máximas que se indujeron a través del canal de Cuautla, ocasionando en un principio la erosión de su empotramiento y posteriormente su aislamiento del cordón litoral, lo cual originó que se ampliara el canal de comunicación en la zona de la boca a 500 m de ancho aproximadamente y alcanzara profundidades de 20 m en promedio.

Actualmente el remanente de dichas escolleras permanece sumergido y la protección marginal está totalmente aislada de la parte continental. Se ha presentado una erosión progresiva de la línea de costa a lo largo de 100 m sobre la margen norte de la boca de Cuautla, afectándose con ello algunas zonas de cultivo y pastoreo, de la población de Palmar de Cuautla, comunidad que se encuentra a 2 km del lugar, por lo que es necesario realizar obras de control de la línea de playa a corto y mediano plazo.

## 5.2 Pruebas de campo

Con el fin de realizar una comparación entre los parámetros obtenidos en campo y los establecidos para lagunas costeras, se efectuó una campaña de mediciones en la laguna de Agua Brava y la Boca de Cuautla en la que se realizaron mediciones de niveles y velocidades del agua en distintos puntos dentro de la laguna. La medición de los parámetros se realizó en diferentes puntos de la laguna según se muestra en la *figura 5.2*, entre las 11:00 y 15:00 horas, en los días en que se presentaron las condiciones

máximas de la marea debido a la influencia de la luna llena (5 y 6 de Septiembre de 1998).

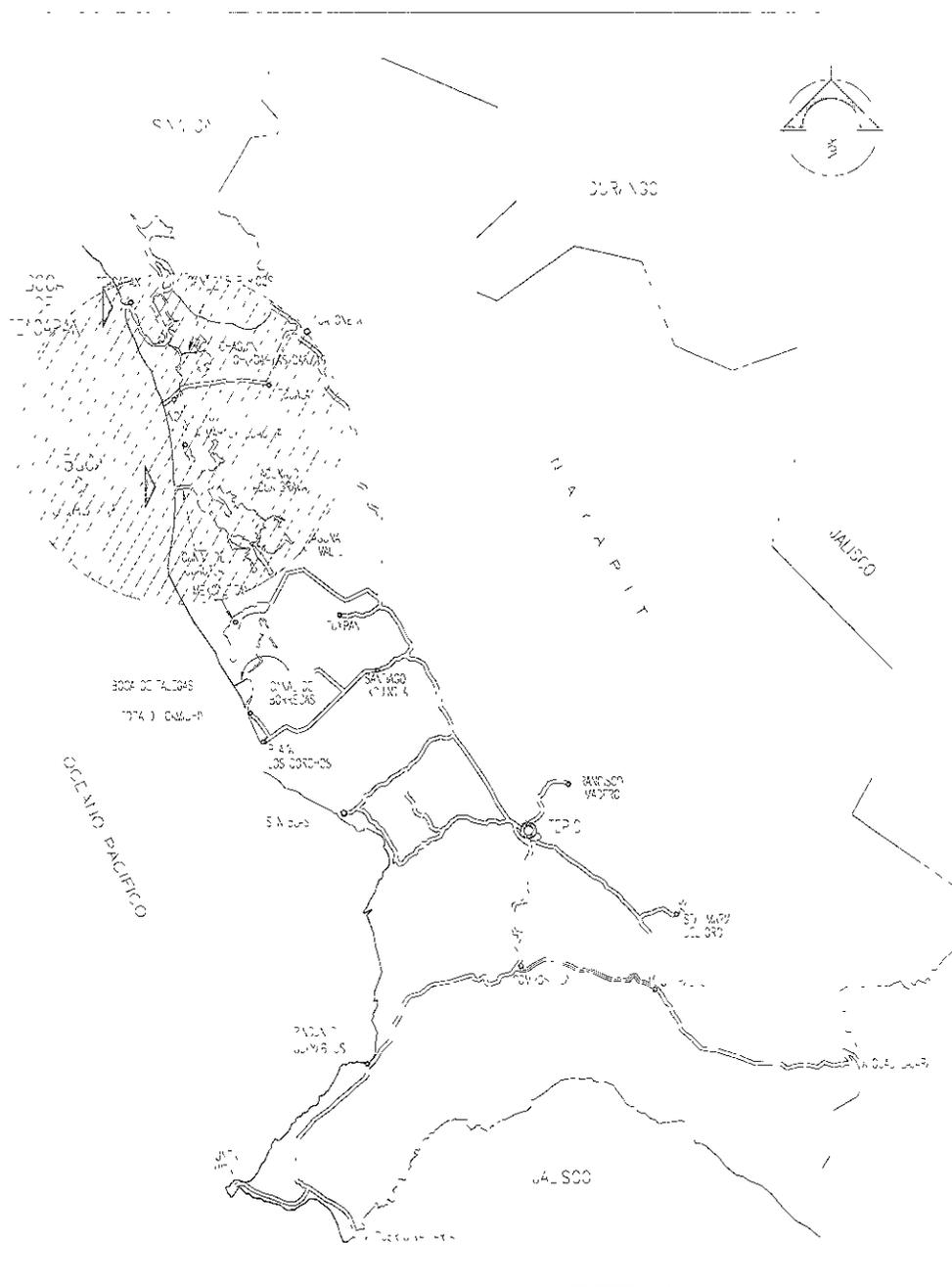


Figura 5.2 Localización de los sitios de muestreo y medición de parámetros.

En los sitios en los que se agrega la letra “V” a la ubicación de los puntos de muestreo corresponden a lugares en donde se midió la velocidad superficial del agua mediante el método de cruceta.

**5.2.1 Medición de turbiedad**

La medición de la turbiedad se realizó considerando la penetrabilidad de la luz en el agua, con un disco de Secchi para determinar la profundidad aproximada de la transparencia.

Tabla 5.1

MUESTRA	PROFUNDIDAD DEL DISCO SECCHI (m)
M -1	0.30
M -2	0.30
M -3	0.52
M -4	0.80
M -5	0.48
M -6	0.55
M -7	0.47

Nota: Las muestras M-1, M-2 y M-3 fueron tomadas el 5 Septiembre y las M-4, M-5, M-6, M-7 y M-8 fueron tomadas el 6 Septiembre

**5.2.2 Medición de temperatura**

Para realizar la medición de temperatura ambiente se utilizó un termómetro con escala de 100 a 0 °C y para la temperatura en el cuerpo de agua se utilizó el medidor de temperatura con que cuenta el potenciómetro. Los datos de temperatura se presentan en la tabla 5.2, a continuación.

Tabla 5.2

Temperatura ambiente (°C)	31.5	33.0	33.0	32.0	33.0	30.5	33.0	33.0
Profundidad (m)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
0.0	32.0	33.0	32.0	32.0	33.0	33.0	32.0	33.0
1.0	32.0		32.0				31.5	32.0
1.5	31.0	31.0	31.0					
2.0						31.0		
3.5						30.9		
4.5				31.0				
9.0				31.0	31.5			
12.0					31.0			

### 5.2.3 Medición de salinidad

El aparato con el que se determinó la salinidad es un salinómetro, va acompañado de una escala de 0 a 280 ‰ (gramos por cada 100 gramos), se coloca una gota de muestra en el prisma, se tapa perfectamente y se observa por el ocular, tomando la lectura indicada. Es un aparato con el que se consigue una mayor rapidez y exactitud en las determinaciones de los valores de salinidad,

Tabla 5.3

Profundidad (m)	M1 ‰	M2 ‰	M3 ‰	M4 ‰	M5 ‰	M6 ‰	M7 ‰	M8 ‰
0.0	6	8	11	34	32	20	12	20.2
1.0	4		12				14	20
1.5	6	9	12					
2.0						32		
3.5						34		
4.5				32				
9.0				36	34			
12.0					36			

### 5.2.4 Medición de niveles de agua

Se midió la variación del nivel del agua empleando dos limnógrafos. Ellos se ubicaron dentro del sistema lagunar en dos puntos distintos: el primero en la boca de Cuautla del

lado de la laguna, y el segundo en la desembocadura del río Acaponeta. En las figuras 4.2 a 4.5 se presenta las gráficas de los registros obtenidos con los limnigrafos.

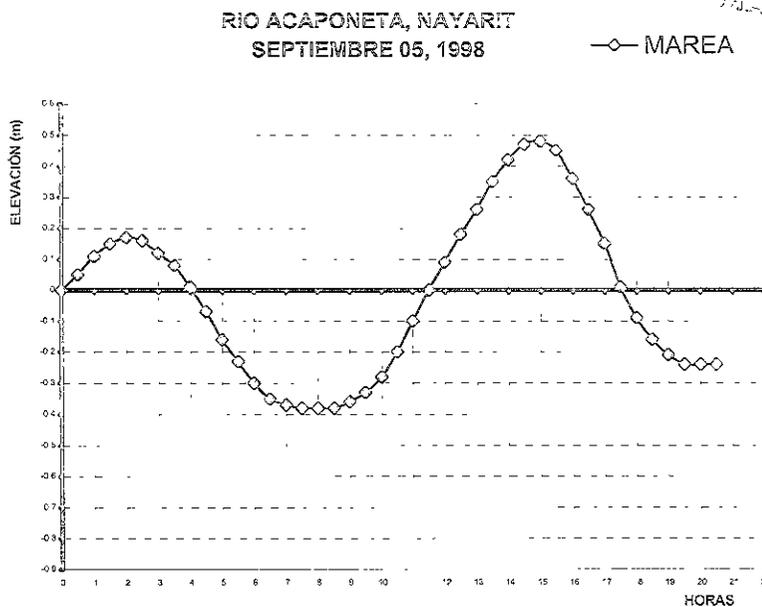


Figura 5.3 Datos de la variación del nivel del agua en la Boca de Cuautla (05/sep)

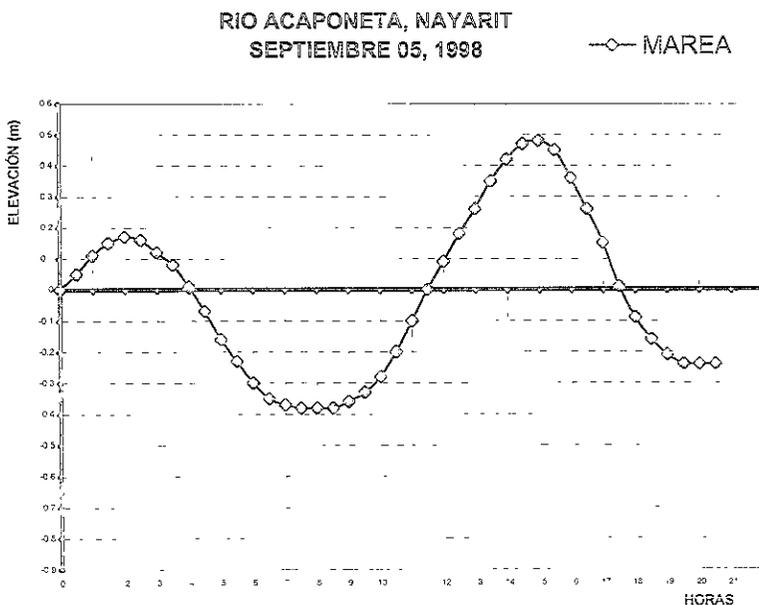


Figura 5.4 Datos de la variación del nivel del agua en la desembocadura del río Acaponeta (05/sep)

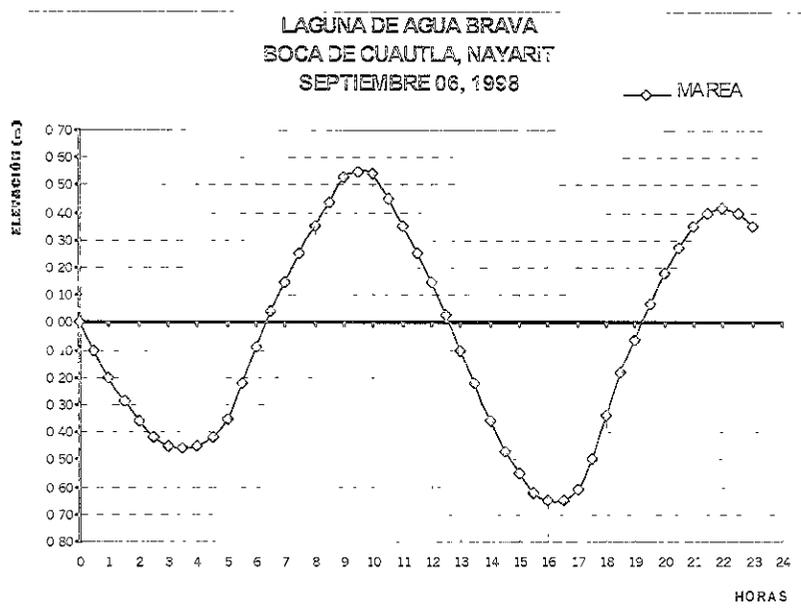


Figura 5.5 Datos de la variación del nivel del agua en la Boca de Cuautla (06/sep)

### 5.2.5 Medición de Velocidades

Con la finalidad de calibrar varios parámetros en el modelo matemático se estimaron velocidades y niveles del agua a distintas horas en algunos puntos del sistema lagunar. Para ello durante los días 5 y 6 de septiembre de 1998 se llevó a cabo una campaña de medición en el sitio de estudio. Ya que en esas fechas, por tener luna llena, la marea era máxima y era posible registrar las máximas condiciones de funcionamiento.

En la figura 5.2 se presenta un croquis en el que se ubican los sitios en los que se midió la velocidad del agua en el cuerpo de agua.

Las crucetas se arrojaron al agua y se registró el tiempo que tardaba en desplazarse una distancia conocida. La velocidad corresponde a la relación de la distancia recorrida entre

el tiempo que tardó en recorrerse (ver fotografías en el anexo C). Los valores medidos se presentan en las tablas 5.4 a 5.12.

En las siguientes tablas se presentan los resultados medidos en la laguna en distintos puntos a una profundidad promedio de 1.2 m de la superficie del agua a distintas horas.

De acuerdo con la *figura 4.6*, como la distribución de las velocidades en un cauce natural o artificial no es uniforme, se debe hacer un ajuste de las velocidades medidas a fin de poder compararse con las calculadas con el modelo debido a que las primeras corresponden a velocidades distintas a la media.

FECHA: 5 septiembre HORA DE ENTRADA: 13: 23 HORA DE SALIDA: 13: 47  
 PUNTO: V1

Coordenadas	De ubicación	Profundidad
x	y	13: 34
2451977	0438148	4 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDADES (m/seg)
1	13: 35	6"36	6.2	0.97
2	13: 36	6"00	6.2	1.03
3	13: 37	6"36	6.2	0.97
4	13: 38	6"58	6.2	0.94
5	13: 38	5"99	6.2	1.03
6	13: 40	6"99	6.2	0.88
7	13: 41	6"12	6.2	1.01
8	13: 43	5"69	6.2	1.08
9	13: 44	6"00	6.2	1.03
10	13: 44	5"69	6.2	1.08

Tabla 5.4 medición de velocidades en el sitio V1 (05/sep)

FECHA: 5 septiembre HORA DE ENTRADA: 13: 54 HORA DE SALIDA: 14: 08  
 PUNTO: V2

Coordenadas		De ubicación	Profundidad
x		y	13: 54
2453504		0438517	4 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	13: 55	10"24	6.2	0.60
2	13: 56	9"36	6.2	0.66
3	13: 57	9"69	6.2	0.64
4	13: 58	9"11	6.2	0.68
5	14: 00	9"36	6.2	0.66
6	14: 01	9"00	6.2	0.68
7	14: 03	9"00	6.2	0.68
8	14: 04	10"12	6.2	0.61
9	14: 05	10"00	6.2	0.62
10	14: 06	10"23	6.2	0.61

Tabla 5.5 medición de velocidades en el sitio V2 (05/sep)

FECHA: 6 septiembre HORA DE ENTRADA: 13: 00 HORA DE SALIDA: 13: 50

PUNTO: V3

Coordenadas		De ubicación	Profundidad
x		y	-
2457608		0441836	-

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	13: 30	6"23	6.0	0.96
2	13: 31	6"12	6.0	0.98
3	13: 32	6"35	6.0	0.94
4	13: 32	5"60	6.0	1.07
5	13: 33	5"23	6.0	1.14
6	13: 35	6"36	6.0	1.06
7	13: 36	6"24	6.0	0.96
8	13: 36	5"35	6.0	0.89
9	13: 37	5"47	6.0	1.09
10	13: 39	6"12	6.0	0.98

Tabla 5.6 medición de velocidades en el sitio V3 (06/sep)

FECHA: 6 septiembre HORA DE ENTRADA: 14:16 HORA DE SALIDA: 14:33  
 PUNTO: V4

Coordenadas	De ubicación	Profundidad
x	y	14:17
2455199	0436547	3.75 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	14:24	5"86	6.0	1.02
2	14:25	5"58	6.0	1.07
3	14:25	6"35	6.0	1.06
4	14:26	6"12	6.0	0.98
5	14:27	6"00	6.0	1.00
6	14:27	6"00	6.0	1.00
7	14:29	6"35	6.0	1.06
8	14:30	6"58	6.0	0.91
9	14:31	6"35	6.0	0.94
10	14:32	6"35	6.0	0.94

Tabla 5.7 medición de velocidades en el sitio V4 (06/sep)

FECHA: 6 septiembre HORA DE ENTRADA: 14:36 HORA DE SALIDA: 14:46  
 PUNTO: V5

Coordenadas	De ubicación	Profundidad
x	y	-
2453696	0435779	-

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	14:37	2"60	6.0	2.31
2	14:38	3"23	6.0	1.86
3	14:39	3"47	6.0	1.73
4	14:40	3"36	6.0	1.79
5	14:41	3"69	6.0	1.63
6	14:42	3"36	6.0	1.79
7	14:43	3"60	6.0	1.67
8	14:44	3"23	6.0	1.86
9	14:44	3"74	6.0	1.60
10	14:45	3"58	6.0	1.68

Tabla 5.8 medición de velocidades en el sitio V5 (06/sep)

FECHA: 7 septiembre HORA DE ENTRADA: 12:00 HORA DE SALIDA: 12:43  
 PUNTO: V6

Coordenadas de ubicación		Profundidad
x	y	
2457657	0441809	12:17 7.5 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	12:18	17"89	6.9	0.39
2	12:23	21"62	6.9	0.32
3	12:24	18"40	6.9	0.37
4	12:25	18"25	6.9	0.38
5	12:27	19"44	6.9	0.35
6	12:28	19"25	6.9	0.36
7	12:30	21"25	6.9	0.32
8	12:31	22"62	6.9	0.30
9	12:32	18"87	6.9	0.37
10	12:33	19"78	6.9	0.35

Tabla 5.9 medición de velocidades en el sitio V6 (07/sep)

FECHA: 7 septiembre HORA DE ENTRADA: 12:58 HORA DE SALIDA: 13:10  
 PUNTO: V7

Coordenadas de ubicación		Profundidad
x	y	
2454210	0438113	13:00 6.25 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	13:02	22"82	6.9	0.30
2	13:04	21"00	6.9	0.33
3	13:05	19"50	6.9	0.35
4	13:06	19"31	6.9	0.36
5	13:07	21"25	6.9	0.32
6	13:08	18"00	6.9	0.38
7	13:09	16"22	6.9	0.42
8	-	-	-	-
9	-	-	-	-
10	-	-	-	-

Tabla 5.10 medición de velocidades en el sitio V7 (07/sep)

FECHA: 7 septiembre HORA DE ENTRADA: 13:32 HORA DE SALIDA: 13:46  
 PUNTO: V8

Coordenadas de ubicación		Profundidad
x	y	
2455479	0436598	12:33 6.5 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/s)
1	13:34	10"09	6.9	0.68
2	13:35	8"63	6.9	0.80
3	13:37	8"69	6.9	0.78
4	13:38	9"94	6.9	0.69
5	13:39	9"81	6.9	0.70
6	13:40	9"25	6.9	0.75
7	13:41	8"25	6.9	0.84
8	13:42	8"65	6.9	0.80
9	13:43	8"25	6.9	0.84
10	13:44	7"94	6.9	0.87

Tabla 5.11 medición de velocidades en el sitio V8 (07/sep)

FECHA: 7 septiembre HORA DE ENTRADA: 13:53 HORA DE SALIDA: 14:13  
 PUNTO: V9

Coordenadas de ubicación		Profundidad
x	y	
2453680	0435536	13:58 11.0 m

No.	HORA	TIEMPO (seg)	LONGITUD(m)	VELOCIDAD (m/seg)
1	14:00	4"84	6.9	1.43
2	14:00	5"10	6.9	1.35
3	14:01	5"34	6.9	1.29
4	14:01	4"94	6.9	1.40
5	14:03	7"07	6.9	0.98
6	14:04	6"18	6.9	1.12
7	14:08	4"03	6.9	1.71
8	14:09	4"19	6.9	1.65
9	14:09	5"22	6.9	1.32
10	14:11	4"69	6.9	1.47

Tabla 5.12 medición de velocidades en el sitio V9 (07/sep)

### 5.3 Calibración del modelo

Para el sistema lagunar del norte de Nayarit se tiene consignada la siguiente información:

PLANOS DE MAREAS REFERIDOS AL NIVEL MEDIO DEL MAR

PLEAMAR MÁXIMA REGISTRADA	1.127 m
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA SUPERIOR	0.548 m
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA	1.494 m
NIVEL MEDIO DEL MAR	0.000 m
NIVEL DE MEDIA MAREA	0.012 m
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA	-0.444 m
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR	-0.616 m
BAJAMAR MÍNIMA REGISTRADA	-1.250 m

Tabla 5.13 Valores de marea para el análisis de la hidrodinámica

PRINCIPALES CONSTANTES ARMÓNICAS

COMPONENTE	H (m)	g (grados) 105° W
M <sub>2</sub>	0.349	255.93
S <sub>2</sub>	0.242	252.19
N <sub>2</sub>	0.081	254.58
K <sub>2</sub>	0.064	251.08
K <sub>1</sub>	0.201	72.24
O <sub>1</sub>	0.139	67.36
P <sub>1</sub>	0.067	69.61

Tabla 5.14 Valores de las principales constantes armónicas

Las cuatro componentes más importantes en una marea son llamadas *M2* (principal lunar semidiurno), *S2* (principal solar semidiurno), *O1* (principal lunar diurno) y *K1* (principal lunar diurno). Para el caso particular de Mazatlán, las amplitudes de estas componentes son:

$$a_{k1}=0.168 \text{ m}$$

$$a_{o1}=0.136 \text{ m}$$

$$a_{M2}=0.291 \text{ m}$$

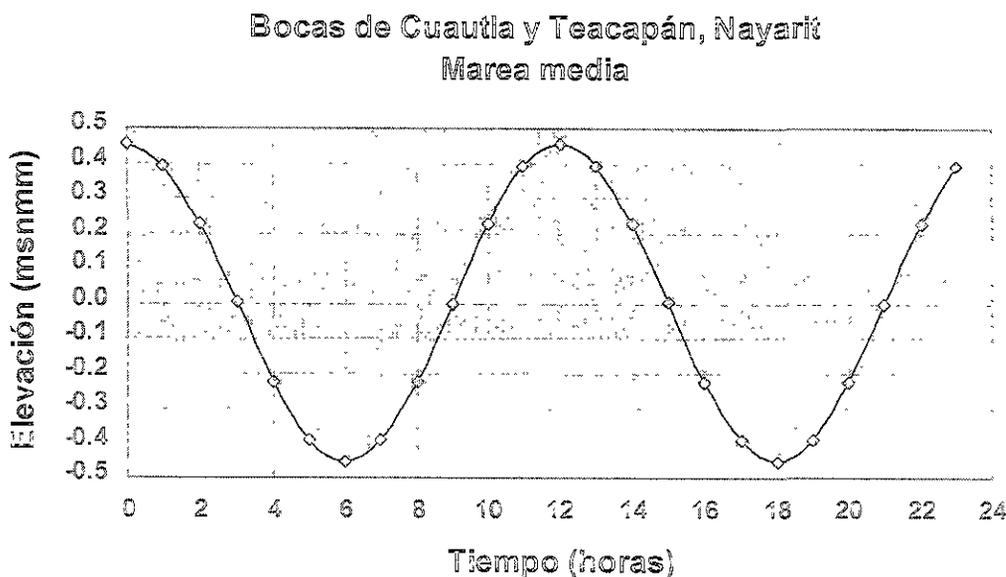
$$a_{S2}=0.228 \text{ m}$$

A partir de estos valores el número de forma de la marea (*F*) resulta ser

$$F = \frac{a_{K1} + a_{O1}}{a_{M2} + a_{S2}} = \frac{0.168 + 0.136}{0.291 + 0.228} = 0.586$$

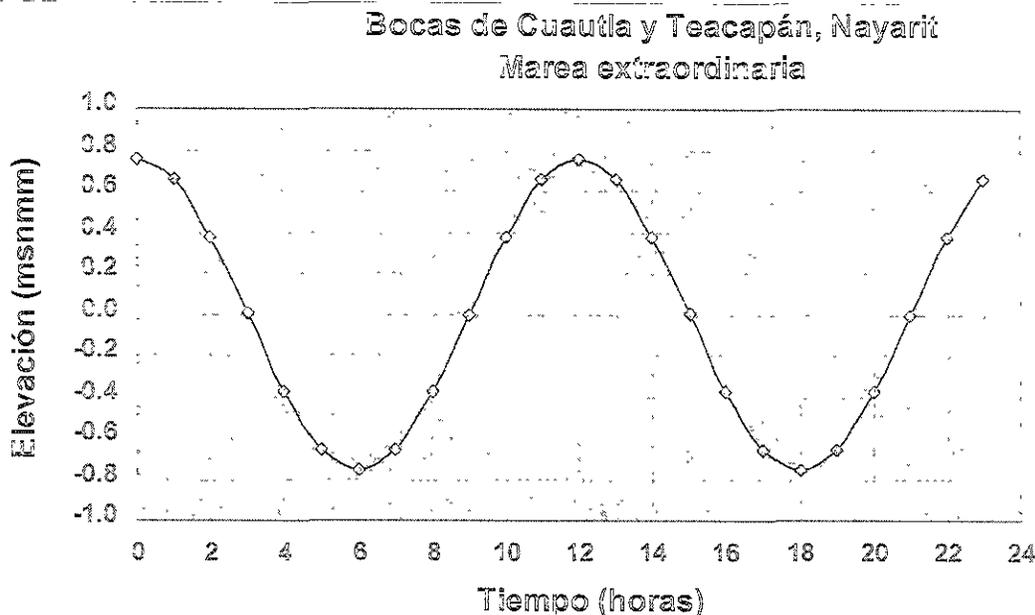
Dado que el número  $F$  está dentro del intervalo 0.25 a 1.50, se tiene una "marea mixta principalmente semidiurna".

El rango de marea (igual a dos veces la amplitud) es del orden de 1.4 m. y el periodo es cercano a las 12 horas. En la *figura 5.6* se muestra la gráfica de la marea empleadas en este estudio correspondiente a las condiciones medias. Se puede observar en dicha figura la variación del nivel de la superficie libre del agua en la boca del sistema lagunar.



*Figura 5.6 Gráfica de la marea media empleada en este estudio*

En la *figura 5.7* se representa a la marea extraordinaria considerada para la zona de estudio. La amplitud de la marea es de 0.755 m.



*Figura 5.7 Gráfica de la marea extraordinaria empleada en este estudio*

Para aplicar el modelo numérico de hidrodinámica se dividió la zona de estudio en celdas cuadradas de modo que se forme una malla similar a lo presentado para el estero El salado. En ésta, cada celda corresponde a un cuadrado de 100x100m (área de 10,000 m<sup>2</sup>).

A cada una de las celdas se le asignó un número y al centro ellas se registró la elevación del terreno, tanto para las condiciones actuales, como las de proyecto. Los archivos de datos así formados sirvieron de base para la generación de gráficas de resultados.

Estos datos están asociados a un sistema de columnas y renglones. Para una mayor precisión en los cálculos, el programa empleado subdivide las celdas en cuatro partes y calcula por un proceso de interpolación la elevación del terreno al centro de cada subcelda.

Con base en los niveles característicos anteriores se determinaron las condiciones de funcionamiento hidrodinámico del sistema lagunar para las condiciones de marea media y de marea extraordinaria. Las figuras 5.6 y 5.7 son gráficas de las mareas que se emplean para el cálculo. En los resultados presentados a continuación se indica el tipo de marea y el momento de la misma a que corresponde a cada análisis. Por otra parte, el coeficiente de rugosidad de la fórmula de Manning considerado es de 0.05.

Durante la medición de niveles en el estero se observó que el rango de marea era del orden de 0.9 m para las fechas en las que se realizaron las mediciones.

Las condiciones analizadas en este caso son dos principalmente: Condiciones de marea media y condiciones de marea extraordinaria. A su vez, en cada caso se analizó la condición de época de avenidas (gasto máximo de aportación del río Acaponeta de 8,000 m<sup>3</sup>/s) y la condición de estiaje. En el caso del sistema de Boca de Cuautla se analiza a detalle lo que ocurre en el canal de Cuautla.

### 5.3.1 módulos de velocidad de flujo en el canal de Cuautla

Es de interés para este estudio conocer el comportamiento de las velocidades en el canal de Cuautla para asociarlas a las condiciones que favorecen la erosión. Los módulos de velocidad se pueden observar en las figuras del anexo B

En ellas se muestran los resultados obtenidos mediante el modelo de hidrodinámica para el tiempo  $t=3,6,9,12,15,18,21$  y 24 horas en condiciones de marea media y época de avenidas.

Se observa que en la margen norte se presenta una velocidad máxima de 0.85 m/s. Esta velocidad es mayor que la velocidad incipiente (0.50 m/s), por lo que para esta condición habrá erosión.

En la margen sur se presenta una velocidad de 0.456 en esa misma sección; sin embargo, existen velocidades mayores a 0.50 m/s en otras secciones. En términos generales se puede decir que para estas condiciones la erosión se presenta en ambos márgenes y que es mayor en la margen norte.

Para un tiempo  $t = 21$  horas, la velocidad en la margen norte es de 0.434 m/s y en la sur de 0.311 m/s

Es importante hacer notar que en algunas zonas del interior del canal se alcanzan velocidades hasta de 1.6 m/s.

Para las condiciones de marea extraordinaria se observa que en el tiempo  $t = 15$  horas, en la margen norte la velocidad es de 0.953 m/s y en la margen sur de 0.467 m/s. Para el tiempo  $t = 21$  horas las velocidades son de 0.334 m/s y 0.074 m/s respectivamente. En esta condición se alcanzan velocidades mayores a 2.00 m/s en algunas zonas del interior de canal.

En el anexo B se incluyen las gráficas obtenidas mediante el modelo, en las que se observa, mediante una escala de colores, la magnitud de los vectores de velocidad en el canal, así como el sentido y dirección de estos a distintas horas del día. Al comparar las velocidades en el canal cuando el río Acaponeta se encuentra aportando en una avenida extraordinaria, se ve que la influencia de la descarga de este río es muy grande y se generan flujos turbulentos en el canal, este efecto es menor en época de estiaje.

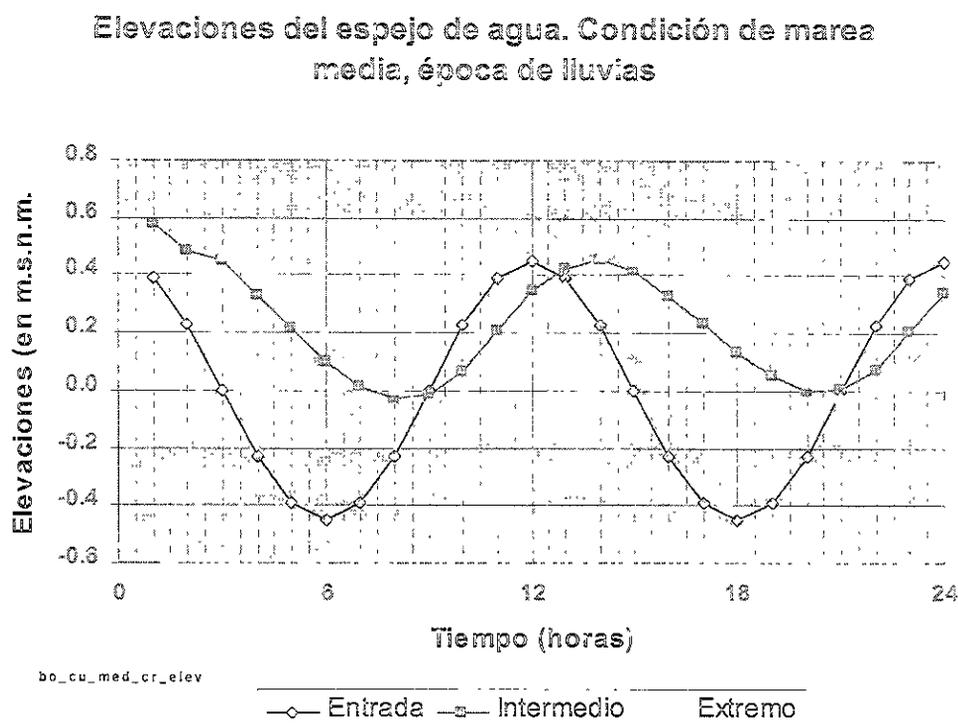
### 5.3.2 niveles del agua

La variación de los niveles a lo largo del día se puede observar en las gráficas de los resultados obtenidos por el modelo e incluídas en el anexo B.

En ambos sistemas existe intercambio de agua mar-laguna, pero el tiempo en que se logra este intercambio es distinto.

Por su configuración, en el sistema de Boca de Cuautla el tiempo en que tarda en llegar el efecto de la marea hasta la parte más extrema del cuerpo de agua es del orden de 2.5 horas, tal como se puede ver en la gráficas de resultados, en la que se representa la variación del nivel del agua con respecto al nivel medio del mar a distintas horas.

El defasamiento de los picos indica el tiempo en que el efecto de la marea viaja por el cuerpo de agua hasta la parte más lejana. En la *figura 5.8* se han representado los resultados obtenidos para tres puntos dentro de la laguna: el primero en la boca de Cuautla, el segundo en la parte intermedia, y el tercero en la comunicación de la laguna de Agua Brava con la laguna Del Valle.



*Figura 5.8 variación del nivel del agua en distintos puntos de la laguna Agua Brava*

Lo anterior se verifica para ambas condiciones, de marea media y marea extraordinaria.

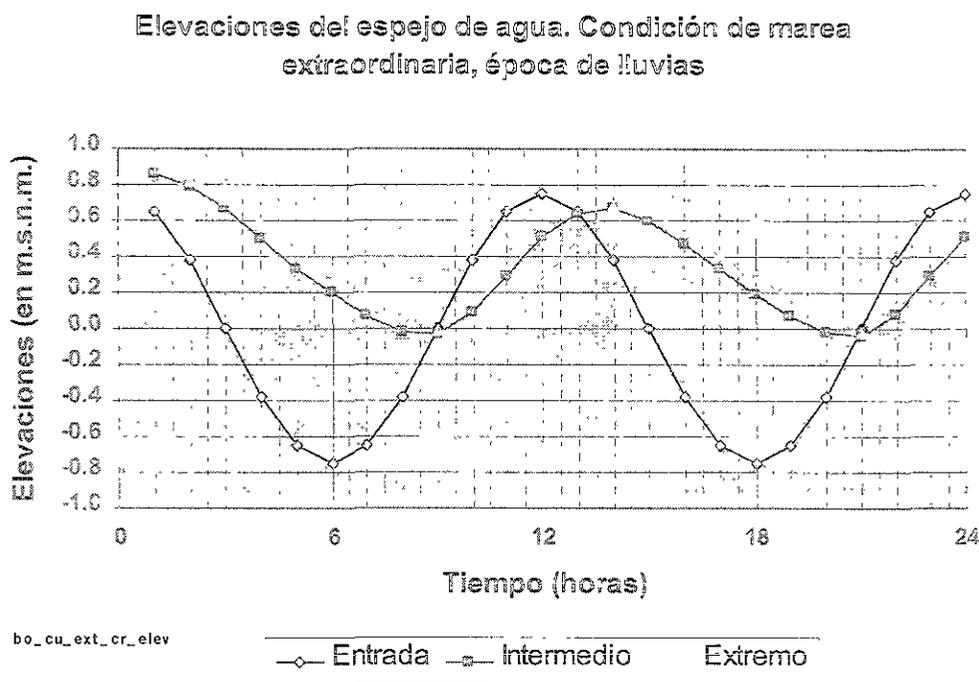


Figura 5.9 variación del nivel del agua en distintos puntos de la laguna Agua Brava

### 5.3.3 Gastos de agua que salen o entran al sistema.

De acuerdo con los resultados obtenidos se ha calculado que en época de estiaje, el volumen de agua que entran al sistema lagunar a través del canal, en un ciclo de 6 horas (entre el bajamar y el pleamar), es del orden de 4,500 m<sup>3</sup>/s. En época de avenidas, el caudal que aporta el río Acajoneta es del orden de 8,000 m<sup>3</sup>/s, por lo que el caudal máximo que circula por el canal de acceso al sistema lagunar es del orden de 12,500 m<sup>3</sup>/s.

### 5.4 Estimación del tiempo de estabilización de la erosión en el canal.

Cuando el canal se construyó en el año de 1976, la sección transversal tenía una forma rectangular y el área era del orden de 80 m<sup>2</sup>. Esta sección fue ampliándose por efecto de

la erosión y en la actualidad tiene un área del orden de 5,200 m<sup>2</sup>. Durante este proceso las márgenes se abrieron y afectaron terrenos propiedad de la comunidad de Palmar de Cuautla. El volumen de agua que entra o sale en cada ciclo de marea a la laguna, es del mismo orden desde 1976 a la fecha, ya que depende de tamaño de la laguna receptora y en menor medida de las características del canal. La velocidad incipiente se ha calculado en 50 cm/s, pero en sus inicios, el canal debió presentar velocidades muy grandes, por lo que el proceso de erosión ocurrió rápidamente.

En la *figura 5.11* se ha estimado la evolución de una sección del canal a través del tiempo y se han calculado las áreas equivalentes. Un cálculo simple permite conocer las velocidades en cada caso y extrapolar esta información para evaluar dos aspectos importantes. En primer lugar, el área que requiere el canal para que la velocidad media sea similar o menor a la velocidad incipiente (Tabla 5.15). Por otro lado, al graficar las velocidades en el tiempo (*figura 5.10*) es posible realizar una extrapolación para estimar el año en que el canal llegará a su punto de estabilización. Como puede observarse en los datos de este cálculo, lo anterior ocurrirá alrededor del año 2004 y el área requerida para que se cumpla esta condición es de 9330 m<sup>2</sup>.

Año	V <sub>med</sub> (m/s)	Área de la sección (m <sup>2</sup> )
1976	156.25	80.00
1980	19.41	644.00
1984	7.54	1657.76
1994	4.25	2939.61
1998	2.45	5102.24
1999	2.27	1985.09
2000	1.91	2356.02
2001	1.55	2897.43
2002	1.20	3761.91
2003	0.84	5361.61
2004	0.48	9328.36
2005	0.13	35856.57

Tabla 5.15 Velocidades medias

Figura 5.10 Variación de la velocidad media en el canal de Cuautla a través del tiempo

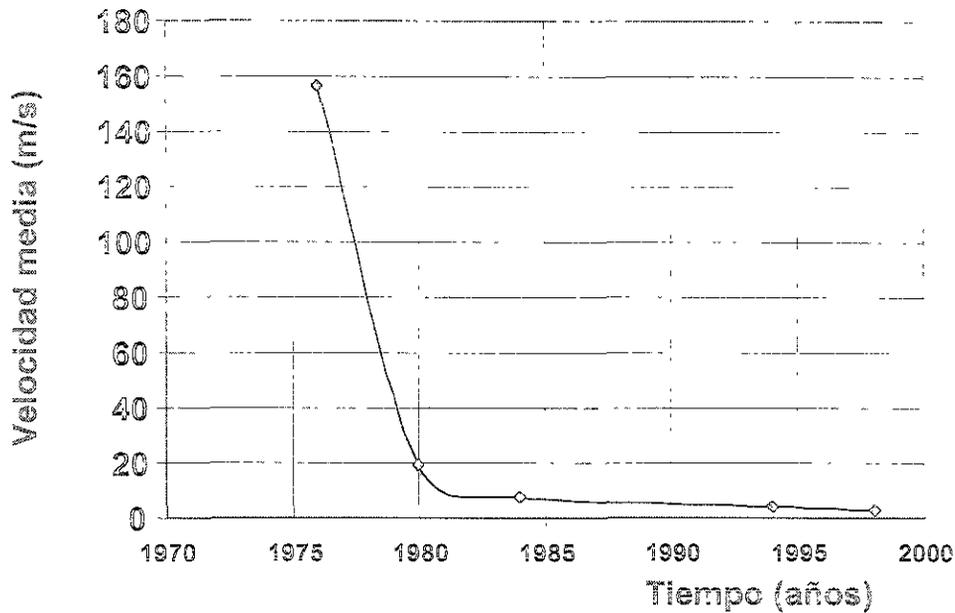
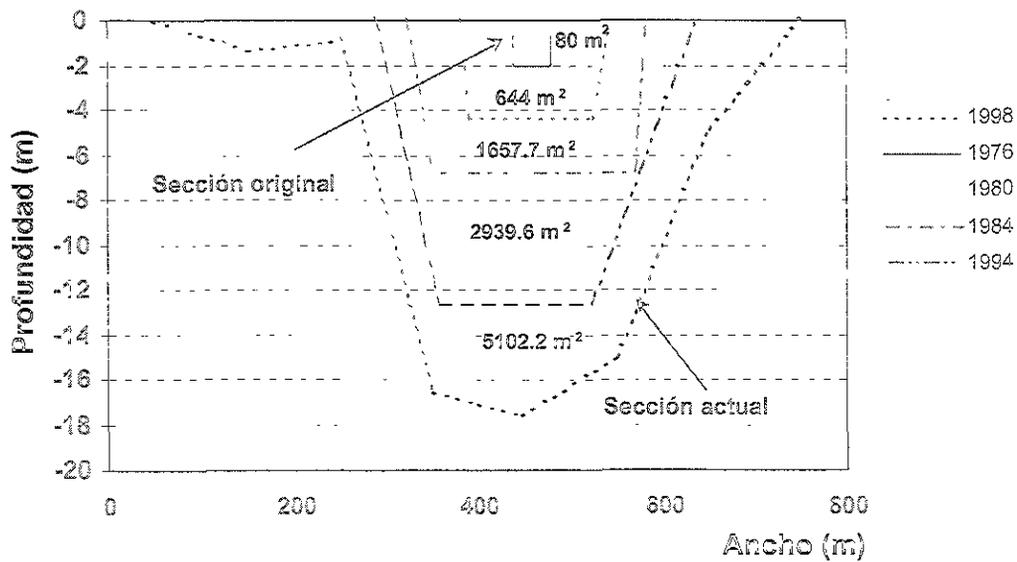


Figura 5.11 Evolución de una sección del canal de Cuautla



# ULO 6

---

## siones y recomendaciones

*Se presentan las conclusiones obtenidas mediante la aplicación del modelo de hidrodinámica y las recomendaciones para su uso.*

lo matemático para el cálculo de la hidrodinámica de cuerpos de agua es a determinar las las velocidades y profundidades hidráulicas dentro del para distintos tiempos durante un ciclo de marea. De este modo, cuando día se obtuvo el volumen de agua de mar que entraba al estero y para el la marea descende se encontró el volumen de agua que salía del estero.

la hidrodinámica se llevaron a cabo para distintos tipos de marea con la determinar la forma en que se comporta el estero, actual y con las le proyecto, para las condiciones de marea que se pueden presentar a lo

mático considera el cambio en el área de la superficie libre del cuerpo de lo sencillo. En ocasiones pueden quedar zonas sin ser cubiertas por el

, programa en Visual Basic para revisar el funcionamiento hidráulico durante la ejecución de los cálculos y obtener archivos con distintos resultados que pueden

posteriormente ser manejados con otros paquetes de cómputo para facilitar su interpretación.

El modelo matemático de hidrodinámica también sirve de base para los estudios de advección-difusión para obtener la difusión de sustancias en los cuerpos de agua.

Desde el punto de vista ingenieril, el modelo matemático permite conocer el prisma de mareas, los tiempos de remoción de todo el volumen de agua contenido en un inicio dentro del cuerpo de agua.

A continuación se apuntan algunas conclusiones obtenidas tras la aplicación del método a los casos presentados en este trabajo con el objeto de mostrar las bondades de los estudios de hidrodinámica.

### 6.1 Estero El Salado

Los resultados obtenidos muestran que los volúmenes de agua que ingresarán al estero en las condiciones de proyecto, aumentarán en un 22 % ( $0.135 \text{ hm}^3$ ) con respecto a los que entran actualmente en el estero. Como este incremento en el volumen se da en un periodo de marea, los gastos para el estero de proyecto también son mayores que los gastos del estero actual.

Para la condición de pleamar máxima registrada, el gasto actualmente es mayor en  $1.80 \text{ m}^3/\text{s}$  que el calculado para las condiciones de proyecto.

Para las condiciones de marea media superior el gasto en condiciones de proyecto es mayor que el actual en  $12.14 \text{ m}^3/\text{s}$  y en  $9.01 \text{ m}^3/\text{s}$  para la marea media.

Para la marea mínima registrada el gasto en el estero de proyecto es mayor en  $23.09 \text{ m}^3/\text{s}$  (casi 93% más grande al de las condiciones actuales, lo cual favorece el intercambio

de agua entre el mar y el estero). Si se compara la figura 6.82 con la figura 6.84, se nota el aumento del gasto en las condiciones de proyecto (considerando una ampliación en la boca).

Para el estero de proyecto el área de superficie libre es prácticamente constante, del orden de 79 ha, por lo que la zona cubierta por el agua en este estero ocupa un espacio confinando, que no se extiende durante los episodios meteorológicos extraordinarios.

Lo anterior se comprobó en el cálculo para la pleamar máxima registrada al encontrar que la elevación de la superficie libre del agua se mantiene abajo del nivel de protección dispuesto, por lo que no se darán desbordamientos.

Se verificó que la superficie de las zonas inundadas donde existe manglar se mantiene casi igual tanto en el estero presente como en el que existiría con las modificaciones de proyecto.

En toda la zona del estero con modificaciones se tendrán profundidades hidráulicas (distancia entre la superficie libre del agua y el fondo) con un valor promedio de 1.8m.

En lo que respecta a las velocidades que se presentan en la boca del vaso del estero (bajo el puente carretero) en este tiempo y las que se esperan en el de proyecto, se encontró una reducción en sus magnitudes. Ello se debe a que para las condiciones de proyecto el puente tiene una ancho casi tres veces más grande que el actual.

Para la región de manglar, la velocidad del agua es baja, entre 1 y 5 cm/s, casi la misma a la observada en el estero sin cambios. Así, al no aumentar las velocidades debido a estos canales, no existirá remoción de los materiales de suelo y de carácter orgánico en la zona del de las raíces del manglar, por lo que no se esperan afectaciones a este último.

Cabe mencionar que en la parte más alejada de la boca del estero, las velocidades son pequeñas, por lo que se recomienda llevar acciones regulares de mantenimiento que

prevengan el depósito de materiales no deseables (como basura) que deterioren en estos sitios a la calidad del agua.

Finalmente, el estudio hidrodinámico mostró que los flujos de agua que presentará el cuerpo de agua con las modificaciones planteadas en el proyecto permitirán un mayor intercambio de agua con el medio marino, por lo que cabe esperar una mejor calidad del agua dentro del estero y condiciones adecuadas para el buen desarrollo de los procesos ambientales en él.

## 6.2 Laguna de Agua Brava

El sistema lagunar del norte de Nayarit, funciona en la actualidad como dos sistemas independientes, uno está asociado a la boca de Cuautla y comprende las lagunas de las Garzas y de Chaguin Chuiga; el otro corresponde a las lagunas de Agua brava y del Valle, cuyo funcionamiento está asociado a la Boca de Cuautla.

La frontera entre ambos sistemas lo constituye un depósito natural de material por sedimentación, que se ubica en el canal que comunica ambos sistemas, en la zona del puente Puerta del Río. La elevación del fondo en dicha zona provoca que las velocidades del agua sean pequeñas y por lo tanto el flujo entre ambos sistemas es mínimo.

Las máximas velocidades en el sistema de Agua Brava se presentan en el canal de Cuautla. De acuerdo con los resultados del modelo se observa que existen valores del módulo de velocidad mayores a 2.0 m/s.

Existen componentes del vector velocidad que inciden en las márgenes, principalmente en la margen norte del canal, por lo que una causa del corrimiento de la línea de playa se debe a la erosión provocada por velocidades mayores a 0.50 m/s en la cercanía a las márgenes del canal. Por ello, el canal de Cuautla se ha erosionado debido a la presencia de velocidades mayores a la velocidad incipiente (las velocidades máximas que se

presentan son mayores a 2.0 m/s). Lo anterior se debe a que el gasto que entra y sale en cada ciclo de marea es mayor que la capacidad del canal.

El intercambio de agua mar-laguna se efectúa en el sistema lagunar. En la laguna de Agua Brava y del Valle el tiempo en que logra este intercambio es de aproximadamente 2.5 horas

Un análisis basado en la evolución de la sección del canal de Cuautla, y el gasto medio que sale de la laguna han permitido estimar el tiempo en que se estabilizará el proceso erosivo en el canal. Para que el canal se estabilice se requiere que el área hidráulica mínima promedio en el canal de Cuautla sea del orden de 9330 m<sup>2</sup>, es decir 79% mayor que el área promedio actual. El proceso de erosión en la boca se detendrá una vez que el canal alcance su condición de equilibrio, esto se estima que se presentará en forma natural en el año 2004.

Si se desea detener el proceso de erosión, se tienen dos opciones: la primera consiste en ampliar la sección del canal. Se ha estimado que para lograr lo anterior se debería tener en el fondo del canal una profundidad de 15.5 metros y excavar en las márgenes del orden de 200 metros tierra adentro. La segunda opción es modificar la resistencia de las paredes y fondo del canal depositando material cuya resistencia a la erosión sea mayor. Este material deberá resistir velocidades menores o iguales a 2.5 m/s.

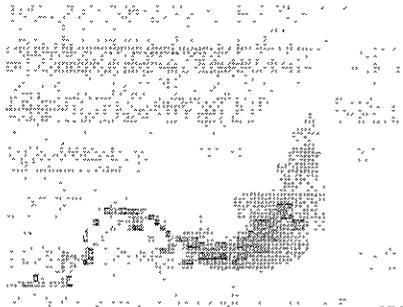
El proceso de erosión varía a lo largo del año, siendo mayor en la época de lluvia, cuando el río Acajoneta puede aportar hasta 8000 m<sup>3</sup>/s como gasto pico.

ESTERO EL SALADO  
CONDICIONES ACTUALES

T=3 HORAS



T=6 HORAS



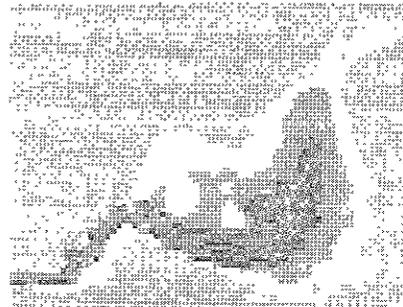
T=9 HORAS



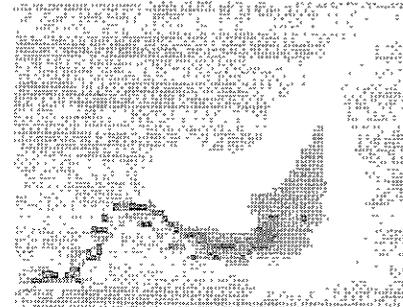
T=12 HORAS



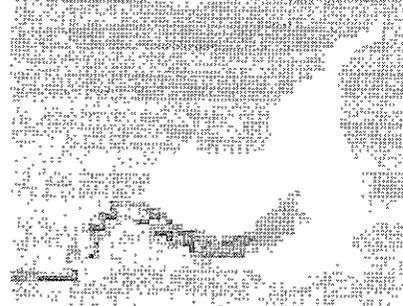
T=15 HORAS



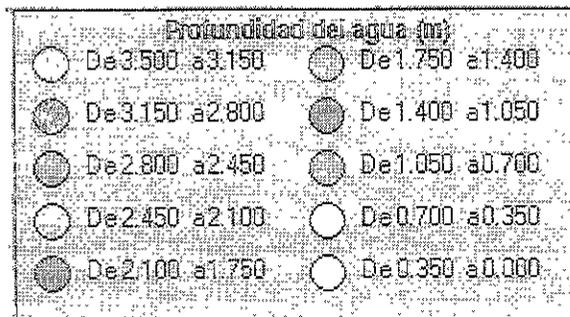
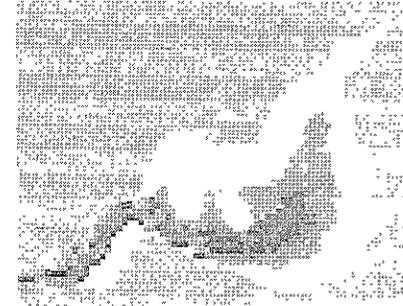
T=18 HORAS



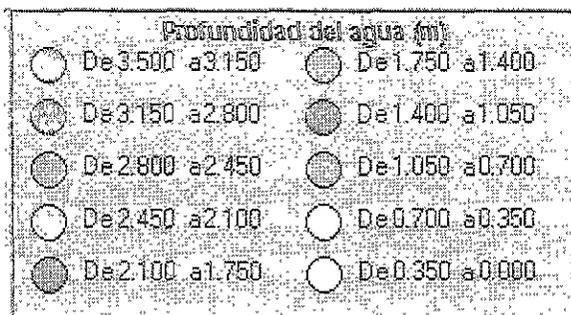
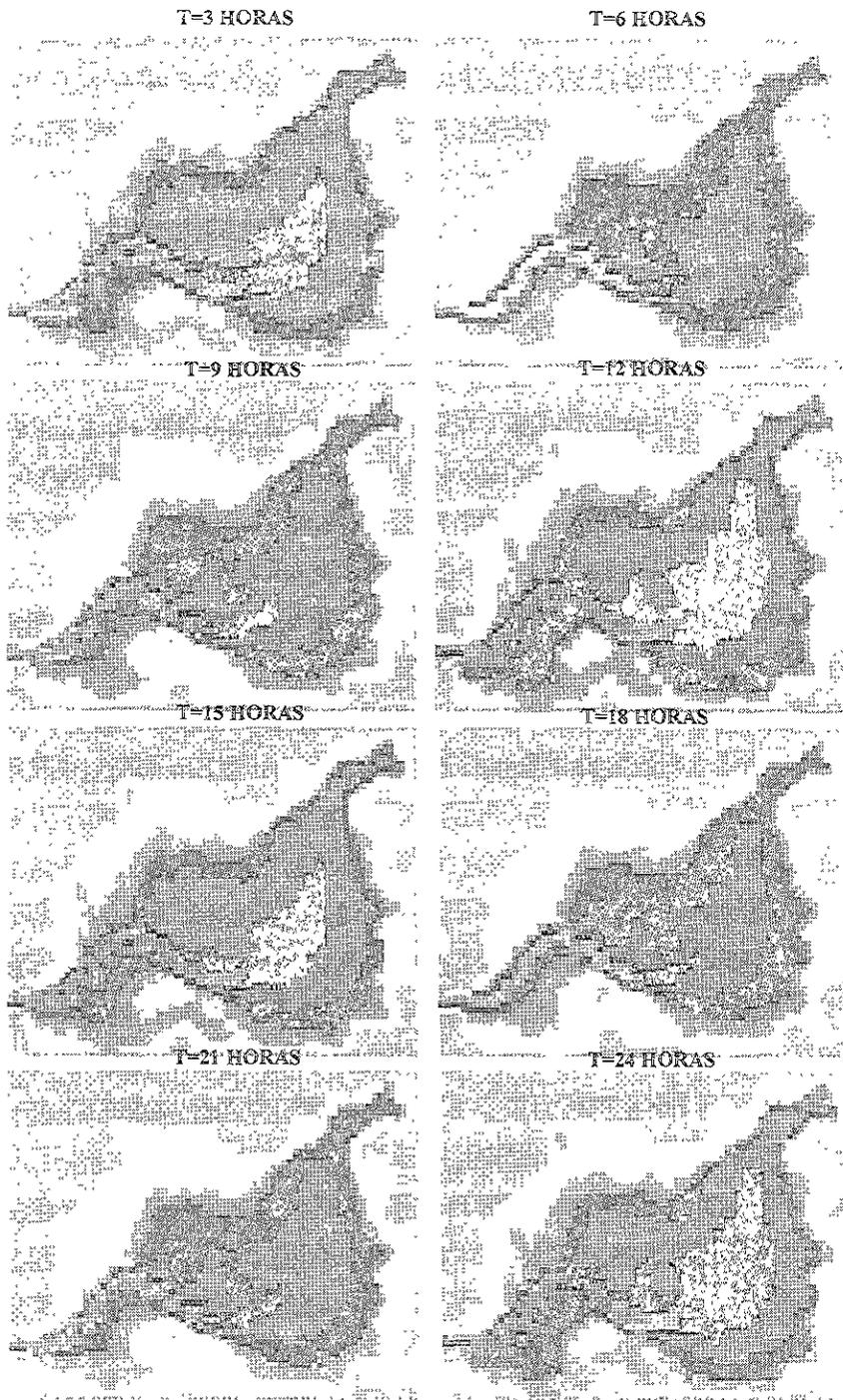
T=21 HORAS



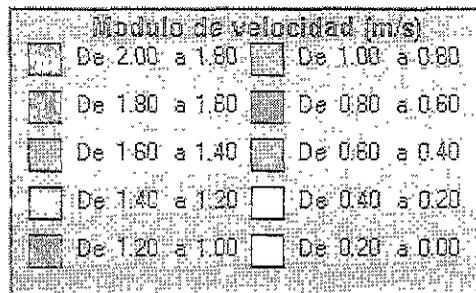
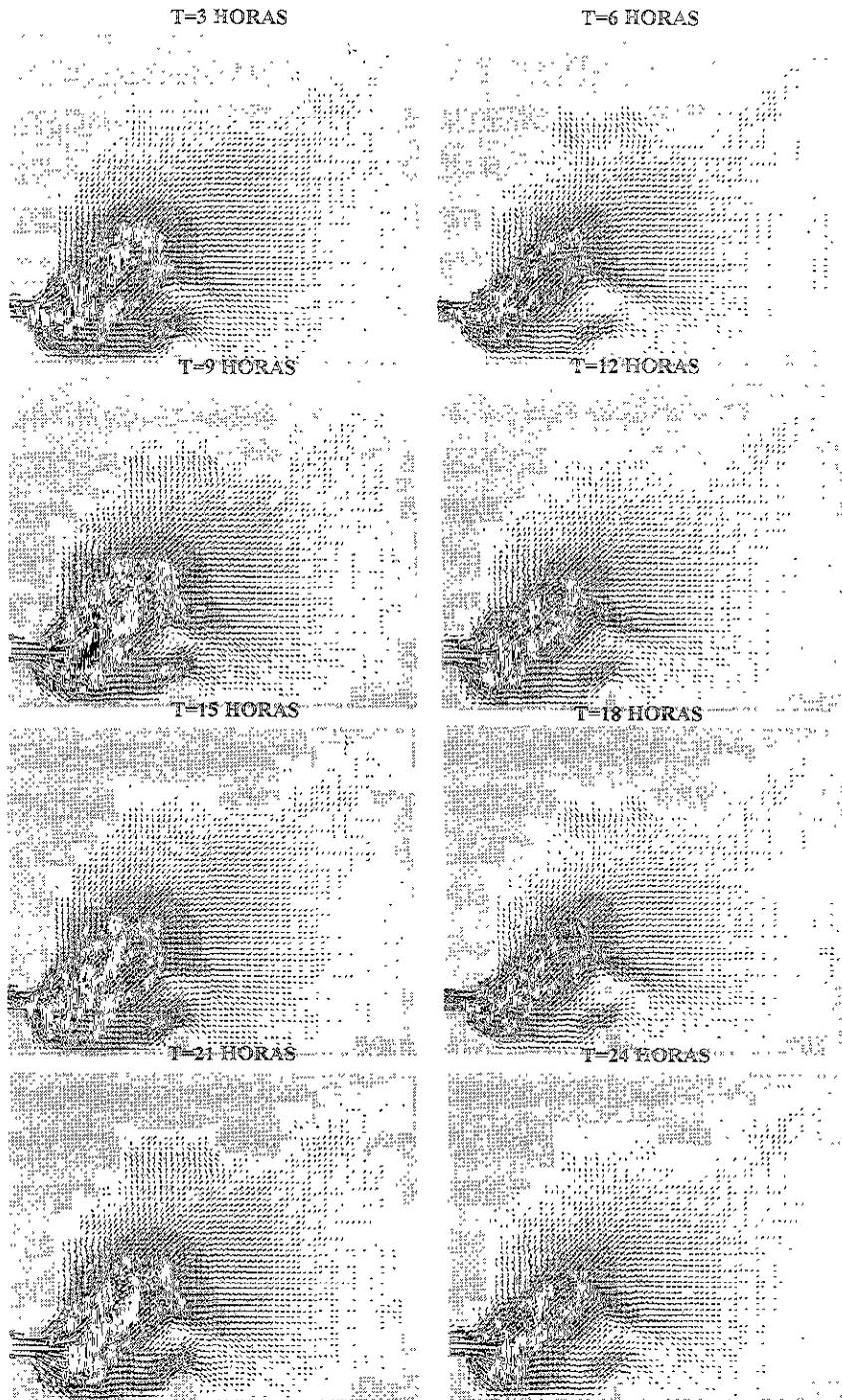
T=24 HORAS



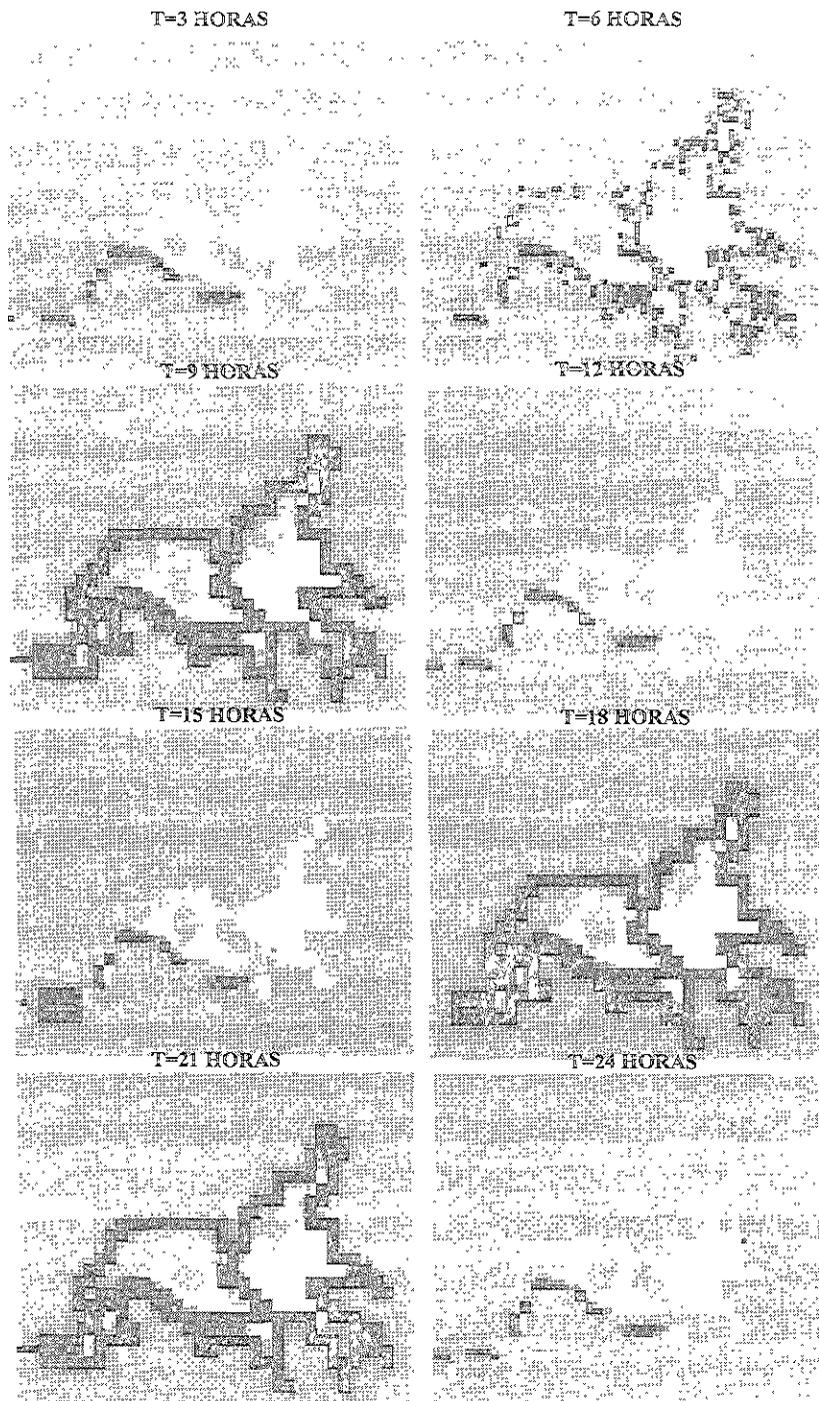
Profundidades hidráulicas en el estero "El salado", condiciones actuales, marea media



Profundidades hidráulicas en el estero "El Salado", condiciones actuales, marea extraordinaria



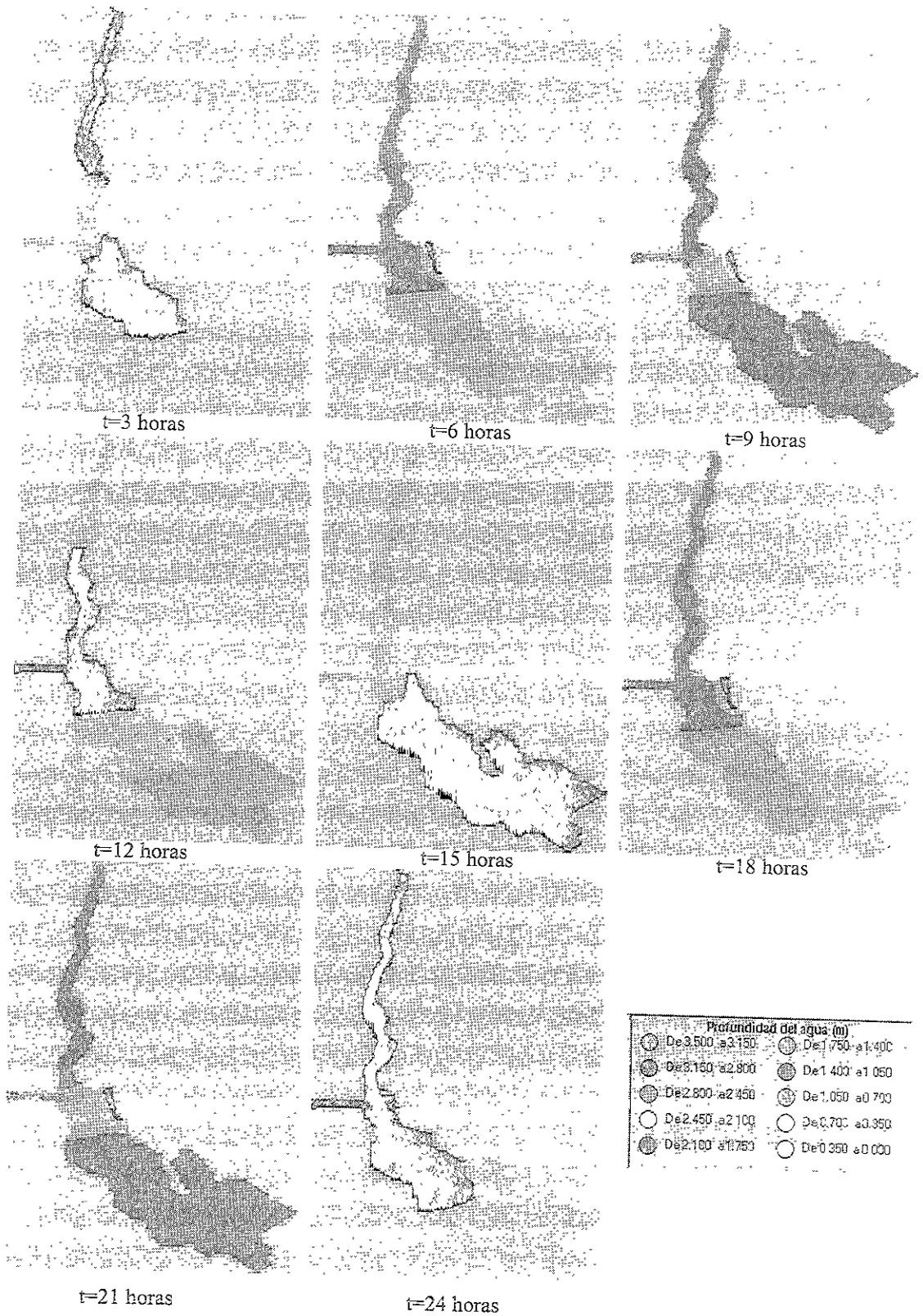
Módulos de velocidad en el estero "El salado", condiciones actuales, marea extraordinaria



Profundidades hidráulicas en el estero "El salado", condiciones de proyecto, marea máxima registrada

ANEXO

LAGUNA AGUA BRAVA  
CONDICIONES ACTUALES



Profundidades hidráulicas en la Laguna de Agua Brava, Nayarit, condiciones actuales

T=3 HORAS



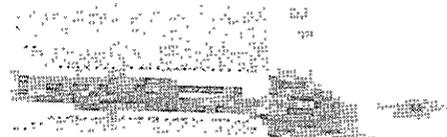
T=6 HORAS



T=9 HORAS



T=12 HORAS



T=15 HORAS



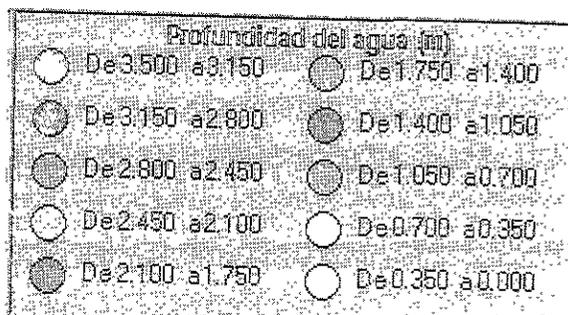
T=18 HORAS



T=21 HORAS

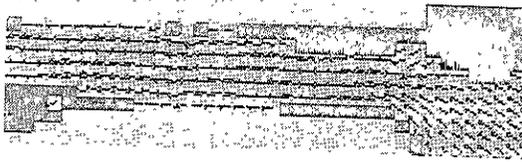


T=24 HORAS

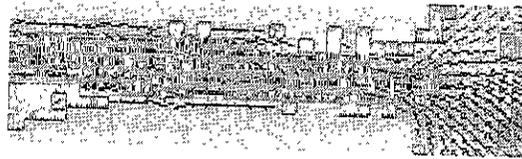


Profundidades hidráulicas en el canal de Cuantla, Nayarit, condiciones actuales

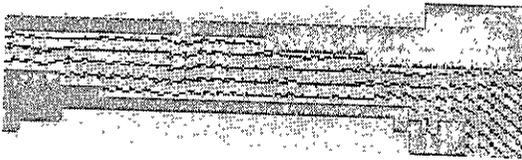
T=3 HORAS



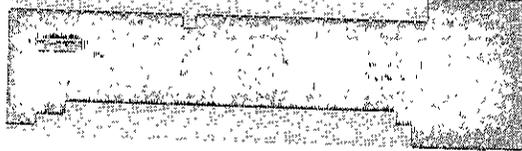
T=6 HORAS



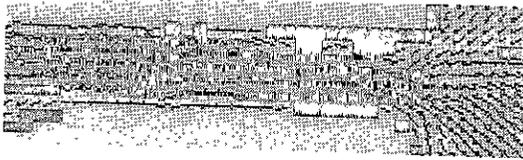
T=9 HORAS



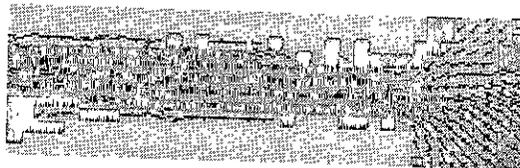
T=12 HORAS



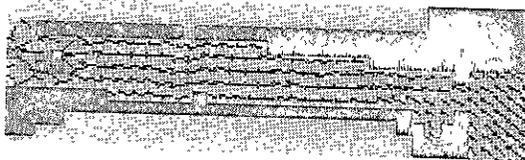
T=15 HORAS



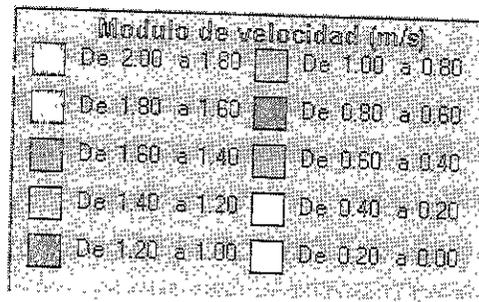
T=18 HORAS



T=21 HORAS

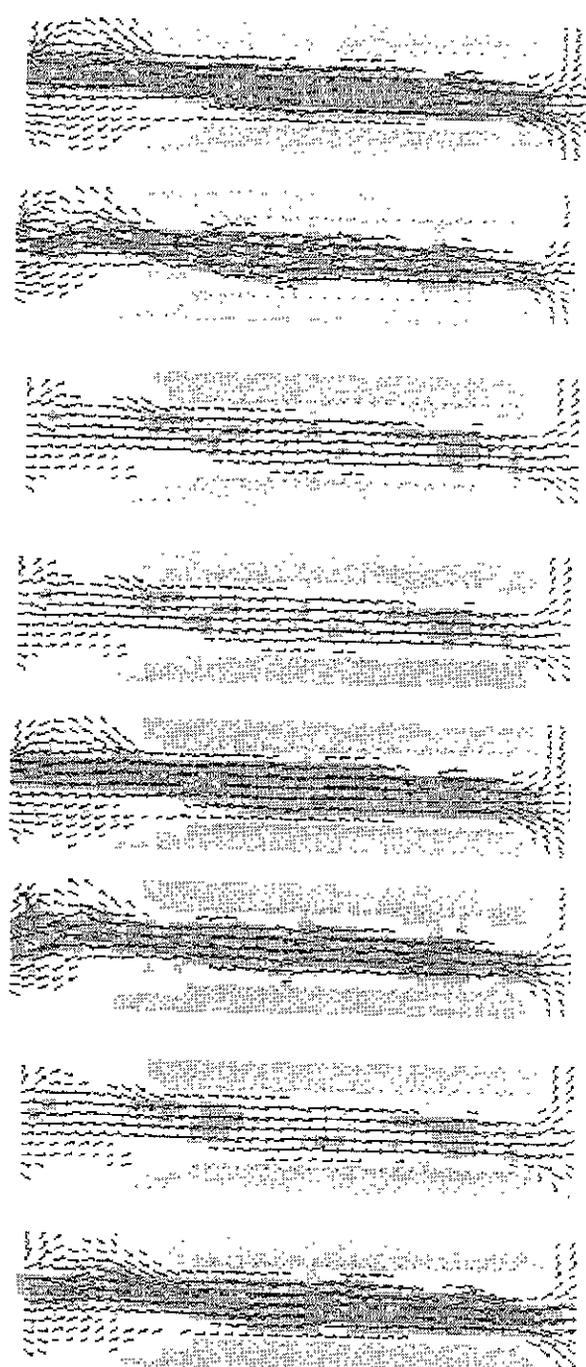
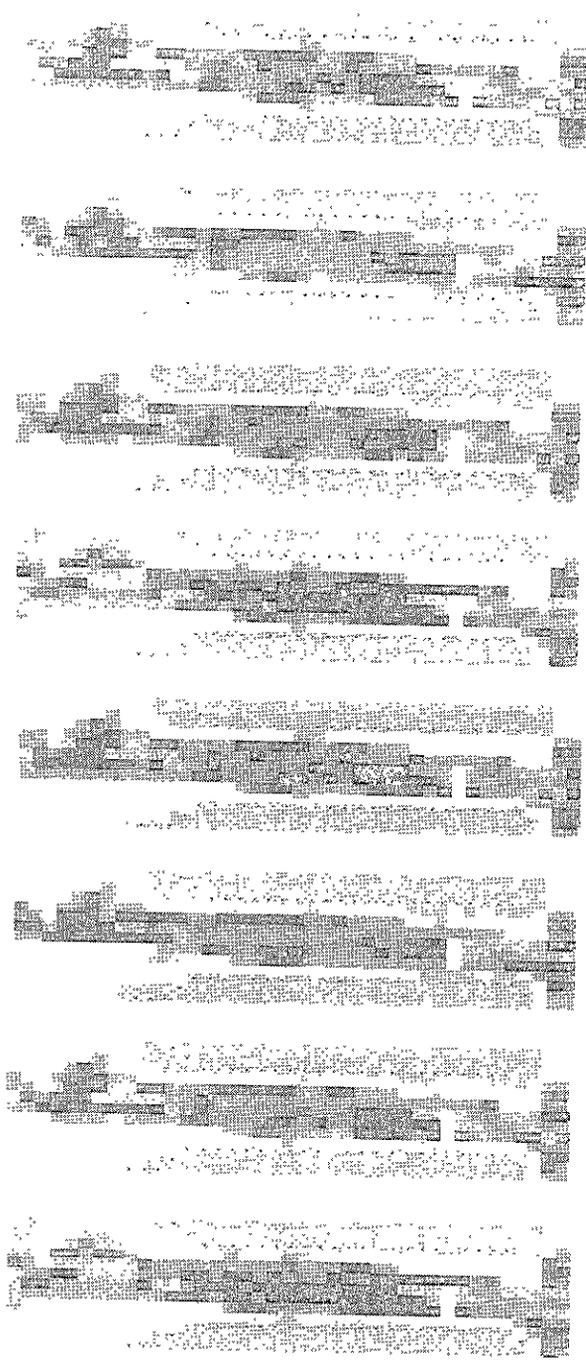


T=24 HORAS

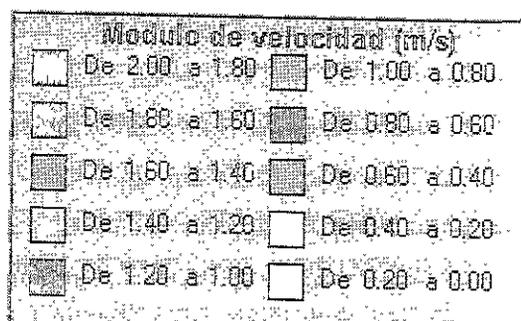
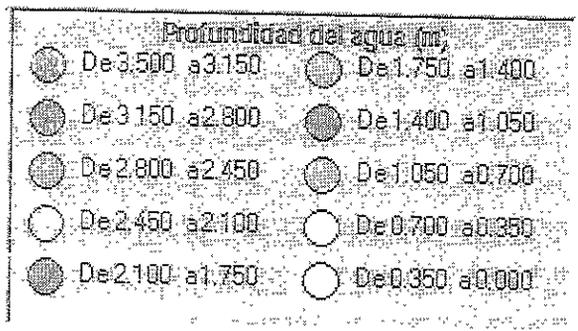


Módulos de velocidad en el canal de Cuautia, condiciones actuales

LAGUNA AGUA BRAVA  
CONDICIONES DE PROYECTO



T=3 HORAS  
 T=6 HORAS  
 T=9 HORAS  
 T=12 HORAS  
 T=15 HORAS  
 T=18 HORAS  
 T=21 HORAS  
 T=24 HORAS



Profundidades hidráulicas y módulos de velocidad en el canal de Cuautia, Nayarit, condiciones de proyecto