



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTUDIO INTEGRAL SOBRE LA EROSIÓN DEL CANAL DE CUAUTLA PARA EL
DISEÑO DE UNA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CUAUHTÉMOC FRANCO OCHOA

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL, FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. ISMAEL DE JESÚS MARIÑO TAPIA, CINVESTAV, POSGRADO DE CIENCIAS DEL
MAR Y LIMNOLOGÍA

MÉXICO D.F., MAYO 2014

Jurado asignado:

Presidente:	Dr. Jesús Gracia Sánchez
Secretario:	Dr. Rodolfo Silva Casarín
Vocal:	Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin
1 ^{er} . Suplente:	Dr. Carlos A. Escalante Sandoval
2 ^{do} . Suplente:	Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria
Delegación Coyoacán, C.P. 04510
México Distrito Federal
MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

A mi padre y a mi madre
Eduardo y María de Jesús.

RESUMEN

En este trabajo se hace un análisis sobre las condiciones de equilibrio y estado evolutivo del canal artificial denominado “*Canal de Cuautla*”, construido en la década de los 70s en la costa norte del estado de Nayarit, México. También se evalúan las propiedades termo - salinas y dinámica de las masas de agua dentro del sistema lagunar – estuarino del que forma parte, esto con el fin de plantear una solución ingenieril a los problemas que acusa el sistema en la situación actual. Para ello fue necesaria la búsqueda de fuentes de información histórica y científica para identificar y analizar las causas de la evolución del canal así como los cambios sufridos por el sistema. Se presentan los resultados obtenidos de los muestreos y mediciones tomadas en dos campañas de campo, las cuales se realizaron con el fin de recabar datos sobre la hidrodinámica, las propiedades termo – salinas del agua y los sedimentos que constituyen el lecho del canal de Cuautla. Se describe el proceso de calibración y validación del modelo numérico que se empleó en este trabajo como herramienta para pronosticar las afectaciones o impactos que puede provocar una futura actuación ingenieril, bajo diferentes escenarios hipotéticos. Además se presentan los resultados del dictamen de una serie de alternativas de actuación planteadas como posibles propuestas de solución, en el que se incluye una discusión para resaltar las ventajas y desventajas de una alternativa de actuación sobre otras. Por último, se presentan las conclusiones a las que se llegaron con los resultados obtenidos en este trabajo y las recomendaciones para investigaciones posteriores como futuras líneas de trabajo.

ABSTRACT

This investigation presents an analysis of the equilibrium and evolution state conditions of the artificial channel called the "Cuautla channel" and built in the early 70s on the north coast of Nayarit state, Mexico. Both the thermo-saline properties and dynamics of salt water bodies within the estuarine lagoon system are evaluated in order to propose an engineering solution to the current problems affecting the system. This required finding sources of historical and scientific information to be able to identify and analyze the causes of evolution of the channel and the changes suffered by the system. Results are presented from sampling and measurements taken during two field trips, performed to collect data on the hydrodynamics, thermo-saline water properties and the sedimentary composition of the Cuautla channel bed. A numerical model was calibrated and validated, so as to be used as a prediction tool to assess the damages or impacts that may be induced by some future engineering intervention under different hypothetical scenarios. In addition, the analysis of a series of alternatives considered and proposed as for some possible solutions is presented and discussed, to highlight the benefits and drawbacks of the various options. Finally, the conclusions issued from the results obtained in this research are presented with some recommendations for further investigation and future work.

ÍNDICE

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1	INTRODUCCIÓN	16
1.2	ANTECEDENTES	18
1.3	OBJETIVOS.....	24
1.4	JUSTIFICACIÓN.....	24
2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	25
2.1	INTRODUCCIÓN	26
2.2	UBICACIÓN	27
2.3	EDAFOLOGÍA	27
2.4	FISIOGRAFÍA	27
2.5	CLIMA.....	28
2.6	VIENTO.....	32
2.7	PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	34
2.8	MAREA	34
2.9	OLEAJE	35
2.10	RÍOS.....	38
2.11	FLORA	43
2.12	FAUNA.....	44
3	CAMPAÑA DE CAMPO.....	45
3.1	INTRODUCCIÓN	46
3.2	BATIMETRÍA	46
3.3	HIDRODINÁMICA.....	49
3.4	PROPIEDADES DEL AGUA.....	52
3.5	MUESTREO DE SEDIMENTOS.....	66
3.6	DISCUSIÓN.....	68

4	CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN, Y APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	71
4.1	INTRODUCCIÓN	72
4.2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	72
4.2.1	ECUACIONES DE GOBIERNO	72
4.2.2	FORMULACIÓN NUMÉRICA.....	78
4.2.3	ESTABILIDAD NUMÉRICA DEL MODELO.....	80
4.3	DATOS DE ENTRADA	81
4.4	CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA	82
4.5	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	83
4.6	APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	87
5	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN.....	93
5.1	INTRODUCCIÓN	94
5.2	METODOLOGÍA	95
5.3	CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	96
5.4	ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 1	97
5.5	ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 2	98
5.6	ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 3	104
5.7	ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 4	109
5.8	ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 5	113
5.9	ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 6.....	115
5.10	DISCUSIÓN COMPARATIVA.....	117
6	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	121
6.1	CONCLUSIONES.....	122
6.2	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	124
	BIBLIOGRAFÍA	125
	ANEXO A.....	129

ANEXO B.....	137
ANEXO C.....	149
ANEXO D.....	161

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

En la costa, los canales o bocas artificiales son obras de ingeniería diseñadas para permitir el intercambio de agua del océano con un cuerpo de agua adyacente al litoral, que pueden necesitarse por razones tales como las de rehabilitación ecológica, incremento de productividad, apariencia estética o demandas sociales. Sin embargo, este tipo de solución suelen interferir con el transporte litoral (Ruiz et al., 1994), lo que a su vez genera nuevos problemas como la perturbación de la dinámica de las playas, la sedimentación de los propios cuerpos de agua, la alteración en los patrones de circulación del agua y cambios en la salinidad. A pesar de ser obras que pueden llegar a generar muchas alteraciones al medio ambiente, suelen ser una práctica común en muchos casos.

Las aperturas de bocas artificiales llegan a desarrollar características morfológicas similares a las bocas costeras de origen natural, las cuales están controladas por la geometría del cuerpo de agua que comunican con el océano, por la tasa neta de transporte de sedimento, el tipo de sedimento, la relación que exista entre el rango mareal y la energía del oleaje, la presencia y configuración de estructuras adyacentes, las actividades antropogénicas a su interior y en las playas adyacentes, la anchura y profundidad de su sección transversal, la magnitud y frecuencia de ciclones, así como de otros más factores (Krauss, 2009). En la **Figura 1-1** se muestra un ejemplo de una boca costera que conecta a una laguna con el Océano con algunas de sus principales características morfológicas.

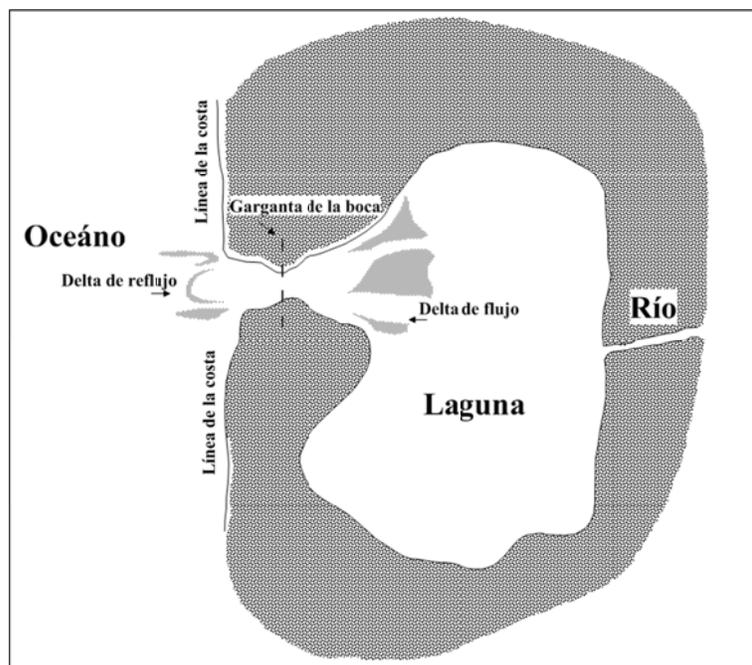


Figura 1-1.-Ejemplo de un sistema laguna – boca – océano alimentada con agua dulce por la descarga de un río.

En el diseño de estas obras suele considerarse una o más estructuras, como son rompeolas, espigones de escolleras, etc., con el fin de contribuir a la estabilidad de su sección transversal, orientación y dirección, así como proveer protección a la navegación. Sin embargo, independientemente de la geometría original de su diseño, estas obras buscan encontrar una condición de equilibrio según los procesos y forzamientos a los que estén expuestos, que pueden llevar a generar una intensa actividad morfológica que en algunos casos es difícil de predecir.

A la fecha, existen numerosas expresiones o relaciones tanto teóricas como empíricas que han sido muy útiles en ingeniería al momento de obtener una estimación aproximada de las condiciones de equilibrio de una boca natural. De estas la más utilizada es la relación entre el área de la sección

transversal, A y el prisma de marea, P (O'Brien, 1931, 1966). En la **Tabla 1-1** se muestran algunas expresiones, aunque todas indican que el prisma de marea es el factor predominante que determina la morfología de una boca. Sin embargo, algunos factores como el transporte litoral y el grado de protección pueden llegar a jugar un papel importante en la estabilidad de una boca, es decir, menos protección y alto acarreo litoral menor sección trasversal de equilibrio y, viceversa, más protección y menos acarreo litoral mayor sección transversal de equilibrio.

Además, se ha encontrado a partir de mediciones en campo, en donde se asumió la existencia de condiciones de equilibrio, que en una costa de arena una boca mantiene una sección transversal estable cuando durante marea viva la velocidad media máxima sobre su sección transversal es alrededor de 1 m/s (Escoffier, 1940; Bruun 1968, 1990). Esta es la velocidad con suficiente capacidad de transporte para remover el sedimento proveniente del acarreo litoral y mantener la sección de la boca sin erosionarla.

Tabla 1-1.- Algunas relaciones de equilibrio teóricas y empíricas para la morfológica de bocas (tomado de Krauss, 2009).

Autor	Característica morfológica	Relación
LeConte (1905), O'Brien (1931, 1969), Riedel & Gourlay (1980), Hume & Herdendorf (1990)	Área de la sección transversal del canal, A_c (nota: LeConte, Riedel & Gourlay, y Hume & Herdendorf consider la magnitud de la tasa de transporte de sedimento longitudinal)	$A_c = C_1 P$
Escoffier (1940)	Área de la sección transversal de equilibrio	Curva de Cierre
Floyd (1968)	Profundidad del canal y profundidad mínima sobre el delta de reflujo	-----
Jarret (1976)	Área de la sección transversal del canal, sin o con escolleras	$A_c = C_2 P^n$
Bruun & Gerritsen (1959)	Estabilidad del canal, tipo de bypassing de arena	P / M
Walton & Adams (1976), Marino & Mehta (1988); Hicks y Hume (1996)	Volumen del delta de reflujo, V_E (nota: diferentes relaciones de acuerdo con el clima de oleaje)	$V_E = C_3 P^m$
Shigemura (1981)	Ancho de la garganta del canal, W_e , ("e" denota equilibrio)	$W_e = C_7 P$
Gibeaut & Davis (1993)	Área del delta de reflujo, A_e	$A_E = C_4 P^k$
Krauss (1998)	Área de la sección transversal del canal relacionada con la tasa del transporte de sedimento longitudinal C_2	$A_c = C_2 P^n$
Carr de Betts (1999), Carr de Betts y Mehta (2001)	Área del delta de flujo, A_F y volumen, V_F	$A_F = C_5 P^p$ $V_F = C_6 P^q$
Buonaiuto y Krauss (2003)	Profundidad límite h_{cr} sobre la cresta del delta de reflujo; límite de la pendiente sobre el delta de reflujo	$H_{cr} \propto P^j$
<p>P = Prisma de marea; A = Área; V = Volumen; Subíndices C, E, y F = canal, delta de reflujo y delta de flujo, respectivamente; C = coeficiente empírico; j, m, n, p, q = exponente empírico; W = ancho de la garganta del canal; M = transporte longitudinal bruto en un año.</p>		

En cuanto a la compresión de los canales o bocas artificiales existen muy pocos estudios específicos que caractericen el proceso de ajuste que ocurre entre este tipo de obras y el medio ambiente. Aunque las expresiones o relaciones teóricas o empíricas existentes para bocas naturales suelen ser la base para el diseño o predicción del comportamiento de las artificiales, muchas veces estas expresiones no son suficientes porque pueden ocurrir eventos o alteraciones que generar incertidumbre al momento de estimar las condiciones de equilibrio de un canal o boca artificial.

1.2 ANTECEDENTES

Entre 1974 y 1976, la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) realizó la construcción del canal de Cuautla sobre la barra de Novillero en la costa norte del estado de Nayarit. Este canal fue diseñado con el propósito de incrementar la producción pesquera en las lagunas de la zona y que además sirviera de acceso para los pecadores hacia mar abierto. La geometría original del canal era de 40 m de ancho, 2 m de profundidad y casi 3 km de largo, y en su comunicación con el mar se construyeron dos escolleras de roca natural con separación de 200 m, pero por un diseño erróneo de la obra, los grandes volúmenes de agua que ingresan y egresan por el efecto de la marea y las descargas de varios ríos, causaron que el canal se ensanchara y se hiciera más hondo, al grado que hoy se puede observar que en algunos puntos rebasa los 800 m de ancho y los 25 m de profundidad. Además, este proceso erosivo, aunado con los efectos del oleaje, han contribuido al desequilibrio de las playas adyacentes al canal a lo largo de aproximadamente 3 km. En la **Figura 1-2** se muestran imágenes de satélite tomadas en fechas distintas, con el fin de observar la evolución en planta que ha seguido el canal a partir de su apertura. Obsérvese que actualmente la configuración de la línea de playa adyacente al canales curva, debido a que las playas al sur y norte del canal han sufrido una fuerte erosión, sin embargo, en los últimos años se ha observado una acumulación de sedimentos en la margen sur del canal, el cual se ha mantenido muy estable y se puede apreciar un incipiente proceso de colonización vegetal.

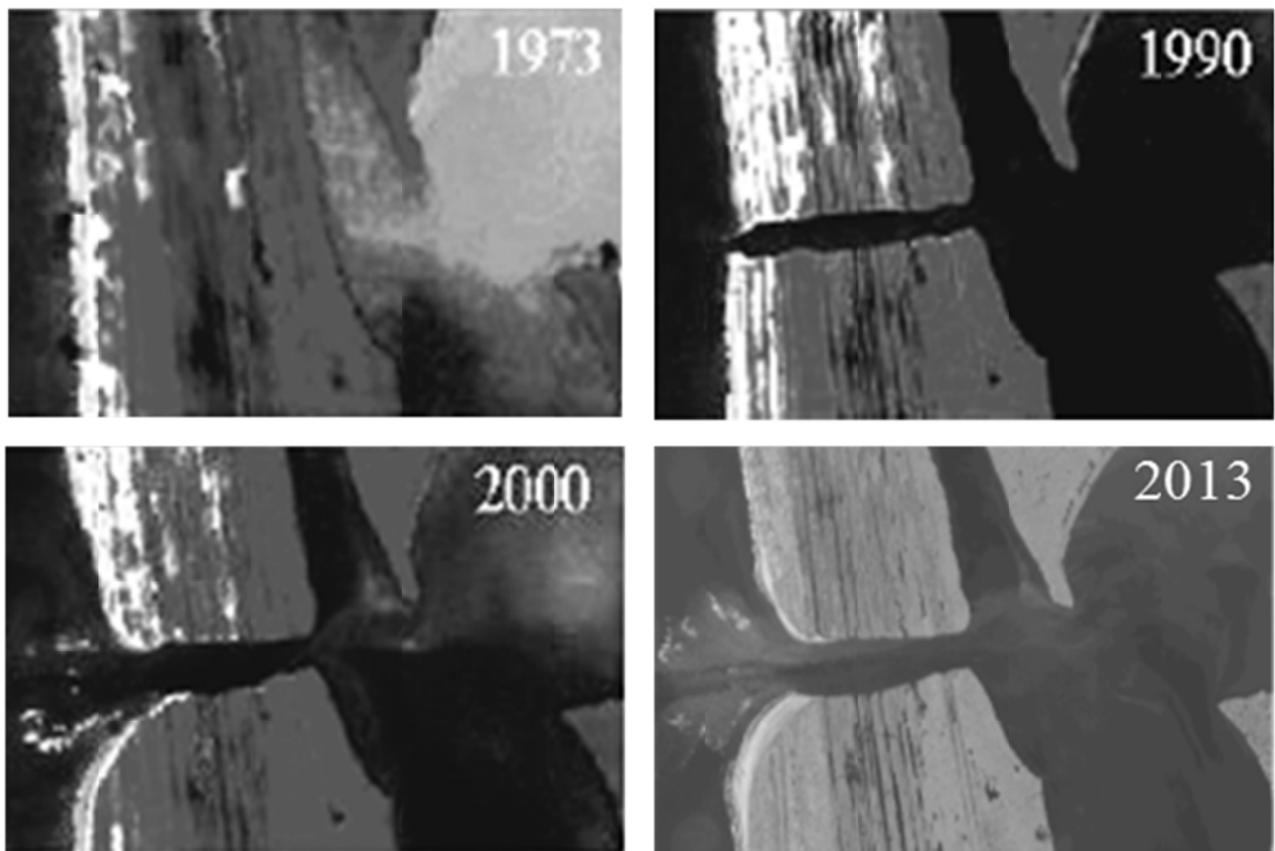


Figura 1-2. Apertura y erosión del canal de Cuautla. (Tomado parcialmente de Berlanga et al., 2005).

Un factor que acelera sustancialmente el comportamiento morfológico tanto del canal de Cuautla como la de las playas adyacentes, son los efectos provocados por los ciclones (precipitaciones, marea de tormenta y oleaje, principalmente), los cuales tienen una incidencia regular en la zona. En

promedio se presenta un meteoro a menos de 100 km del canal de Cuautla cada 4.5 años (Martínez R, 2014). En la **Tabla 1-2** se muestran los ciclones más significativos que han tenido impacto en la morfología del canal.

Tabla 1-2.-Principales ciclones en la zona en los últimos 40 años.

Nombre	Fecha de ocurrencia	Etapa de evolución
Naomi	Octubre 1976	Tormenta tropical
Otis	Octubre 1981	Huracán
Adolph	Mayo 1983	Huracán
Rosa	Octubre 1994	Huracán

En la **Figura 1-3**, Fuentes et al., 1999 presentó un registro de la evolución de una sección del canal de Cuautla entre 1976 y 1998. Obsérvese que el canal creció 20 veces respecto de su sección original en los primeros 8 años, muy probablemente asociado a avenidas muy importantes de los ríos y el efecto de refluo de la marea. En cambio, a partir de 1984 la sección del canal de Cuautla creció con menor rapidez, hasta 1994 que los efectos del ciclón Rosa provocara, por un lado, un grave deterioro a las escolleras, y por otro lado, que el canal se ensanchara a casi 500 m y se hiciera más profundo, alcanzando valores de hasta 20 m en su comunicación con el Océano Pacífico.

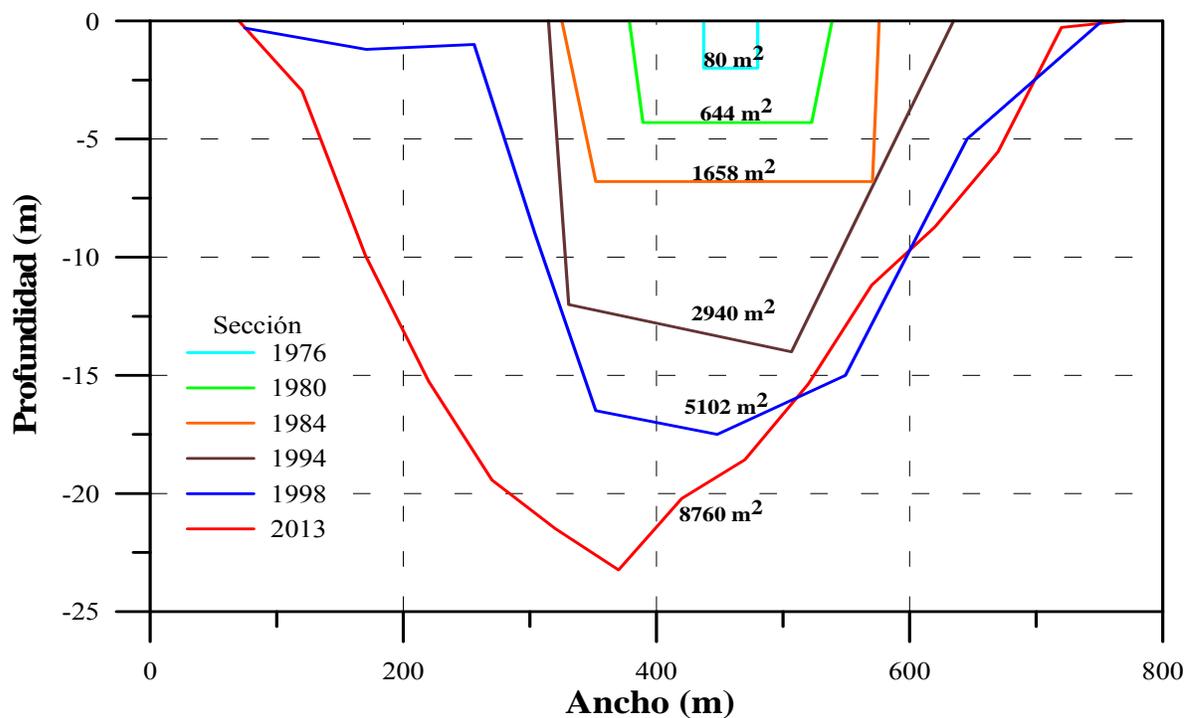


Figura 1-3. Evolución de una sección del canal de Cuautla (modificado de Fuentes et al., 1999)

En la **Tabla 1-3** se anotan estimaciones de la velocidad media máxima del canal de Cuautla y el prisma de marea a lo largo del tiempo, los cuales se obtuvieron aplicando un modelo numérico con las secciones transversales reportadas por Fuentes et al, 1999, considerando una señal de marea característica de la zona y caudales medios en las descarga de los ríos. Los valores de estas velocidades y prismas de marea corresponden a la máxima de marea viva, y refleja la inconsistencia del diseño original del canal, el cual ha aumentado su sección transversal más de 100 veces respecto de su sección inicial.

Tabla 1-3.-Velocidad media máxima y prisma de marea a lo largo del tiempo.

Año	Velocidad máxima media (m/s)	Prisma de marea (m ³)
1976	1.04	1,056,690.00
1980	1.23	8,260,007.40
1984	1.40	43,007,799.60
1994	1.33	57,883,010.40
1998	1.24	90,807,822.00
2013	0.90	118,697,755.00

En la **Figura 1-4** se representan gráficamente los valores de la **Tabla 1-3**, a fin de visualizar su tendencia en el tiempo. Obsérvese que la velocidad media tendía a incrementarse hasta 1984, cuando comenzó a disminuir, por lo que se estima que la sección transversal del canal está cerca de alcanzar su sección de equilibrio para condiciones reinantes. Por otro lado, el prisma de marea siempre ha tendido a incrementarse con el tiempo guardando una mejor relación con la evolución de la sección transversal del canal.

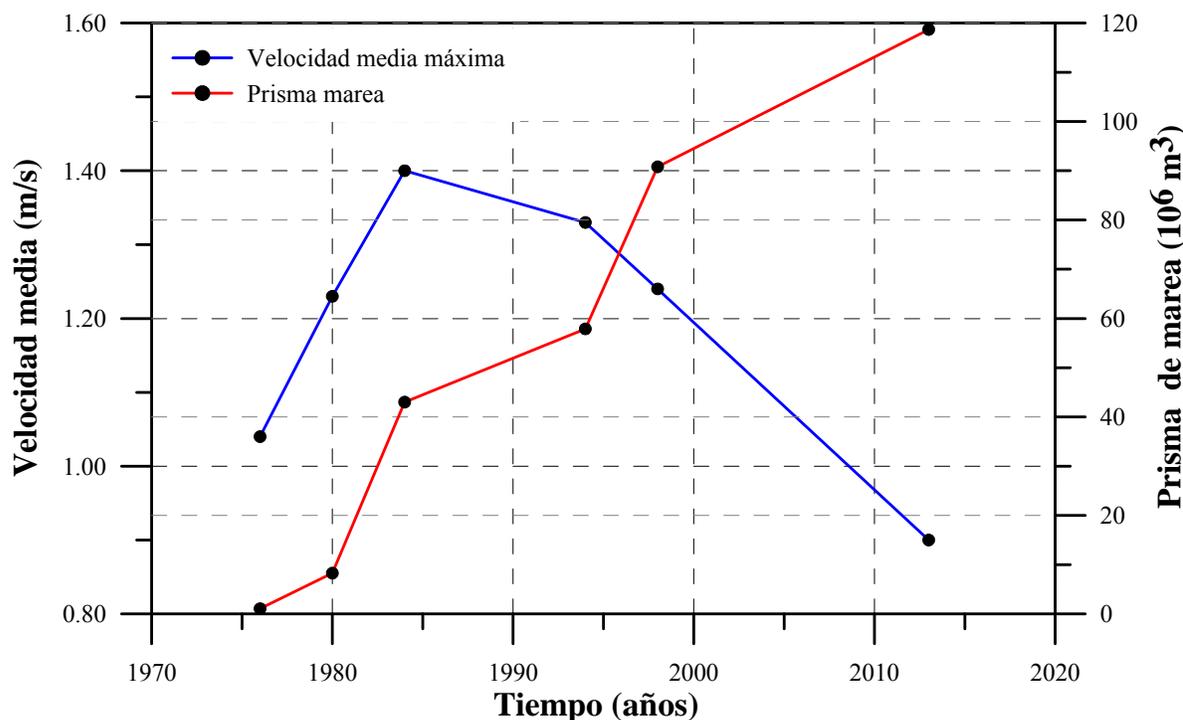


Figura 1-4.Variación histórica de la velocidad media máxima en el canal de Cuautla y el prisma de marea.

Como un primer esfuerzo para comprender la dinámica del canal, se analizó su sección transversal siguiendo a Stive and Rakhorst (2008), quienes desarrollaron una ecuación con la cual se puede estimar la sección transversal de equilibrio de la boca de una laguna en función del prisma de marea. Este enfoque acepta que el esfuerzo cortante en el fondo, debido a las corrientes de marea, que produce un transporte permanente de sedimento puede ser calculado. Esto se analiza derivando la velocidad de corte, a saber:

$$V_c A_c = A_b \frac{dh_b}{dt} \tag{1.1}$$

donde:

V_c Velocidad del flujo en la sección transversal de la boca

A_c Área de la sección transversal del canal

A_b Área de la superficie libre de los cuerpos de agua

$\frac{dh_b}{dt}$ Variación temporal de la elevación de la superficie libre del agua al interior del sistema. Al integrar este término se obtiene la velocidad media en el cuerpo lagunar, V_b .

Para simplificar el cálculo se despeja V_c de la ec. (1.1) y se expresa en términos del prisma de marea:

$$V_c = \frac{2P}{A_c T} \quad (1.2)$$

donde:

V_c Velocidad del flujo en la sección transversal del canal

P Prisma de marea

T Periodo mareal (2 veces el ciclo de marea)

A_c Área de la sección transversal del canal

Para estimar el inicio de transporte de sedimentos generalizado, se utiliza la expresión de Chezy, ec. (1.3), para esfuerzo cortante y el parámetro de Shields, ec.(1.4):

$$\tau_0 = \rho_w g \left(\frac{V}{C} \right)^2 \quad (1.3)$$

donde:

τ_0 Esfuerzo cortante crítico del sedimento

ρ_w Densidad del agua

g Aceleración de la gravedad

V Velocidad del agua

C Coeficiente de Chezy

$$\psi = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w) g d_e} \quad (1.4)$$

donde:

- ψ Parámetro de Shields
- τ_0 Esfuerzo cortante crítico del sedimento
- ρ_s Densidad del sedimento
- ρ_w Densidad del agua
- g Aceleración de la gravedad
- d_e Diámetro del sedimento

Sustituyendo (1.2) en (1.3) y despejando τ_0 de (1.4) para después igualar se llega a:

$$A_c = \left[\frac{4\rho_w}{\psi(\rho_s - \rho_w)d_e C^2 T^2} \right]^{1/2} P \quad (1.5)$$

Donde A_c es el área de la sección transversal de equilibrio del canal, P es el prisma de marea, T es el periodo de la marea (12.42 hrs \times 60 min/h \times 60 s/min ó 44712 s), ψ es el parámetro de Shields (0.50), C es el coeficiente de Chezy (50 m^{1/3}/s), d_e es el diámetro característico del sedimento (0.173 mm), y ρ es la densidad; sub – índices s y w representan el sedimento (2650kg/m³) y el agua (1030 kg/m³), respectivamente.

Usando los mencionados valores de los parámetros, la ecuación (1.5) se convierte en:

$$A_c = 7.6699 \times 10^{-5} P \quad (1.6)$$

Sustituyendo el prisma de marea calculado para el año 2013 de la tabla 2 se llega a $A_c = 9104 \text{ m}^2$. Al comparar el área de la sección transversal actual del canal de 8,760 m² con la sección de equilibrio estimada con la ecuación (1.6), se puede afirmar que el canal todavía no ha alcanzado la condición de equilibrio, por lo que continuará ganando área transversal en los próximos años. Por otro lado, por lo hasta aquí descrito, se puede suponer que el canal más bien se encuentra en condición meta estable, por lo que pudiera crecer su sección transversal hasta ser mayor a la sección de equilibrio estimada como respuesta a condiciones específicas, es decir, cuando las corrientes provocadas por algún evento o tipo de alteración sean lo suficiente para erosionar el fondo o/y las paredes del canal.

En cuanto a la evolución seguida por el conjunto de cuerpos de agua en la zona, con las diversas actuaciones realizadas a lo largo de los años tanto al interior como al exterior que llegaron a tener una influencia significativa, se puede decir que en el año de 1970 el sistema sin apenas modificaciones por la actividad antropogénica, se encontraba en su situación natural de equilibrio, como se ilustra en la **Figura 1-5a**. La descarga hidrológica de todo el sistema salía por la boca de Teacapán con un tiempo de residencia del orden de meses. Los cuerpos de agua al sur del sistema tenían escasa influencia marina por lo que predominaban las condiciones de agua dulce y salobre. No se tiene reportes de erosión en las playas cercanas ni cambios en la biodiversidad, a pesar de

que en ese mismo año, ya se tenía una ocupación importante de zonas de cultivo y pastoreo, pero no se tenía la presencia de granjas de producción acuícola.

Actualmente, se puede observar en el sistema importantes alteraciones en su entorno debido a las numerosas intervenciones antrópicas de las últimas décadas, como se ilustra en la **Figura 1-5b**. El funcionamiento del sistema se ha visto afectado a tal grado que se puede decir que trabajada en dos sistemas independientes, aunque en ambos sistemas existe intercambio de agua mar – laguna, el tiempo en que se logra este intercambio es distinto y por ello se sospecha que la interconexión entre ambos ya no es suficiente para que funcione como un solo sistema. Se ha reducido el aporte de agua hacia la parte norte del sistema a pulsos atenuados de marea menores a los 10 cm. Los cuerpos de agua al sur del sistema pasaron de ser predominantemente de agua dulce o salobre a predominantemente salobre o marina. En cada ciclo de marea parte importante de la descarga hidrológica que llega al sistema sale ahora por el canal de Cuautla. Se presenta erosión en las playas adyacente al canal de Cuautla, y cambios en la biodiversidad en todo el sistema. Hoy en día ya se tiene una presencia significativa de granjas acuícolas especialmente al norte del sistema.

De acuerdo con estudios previos orientados a detectar los cambios en el medio ambiente dentro de los límites de Marismas Nacionales, Berlanga y Ruiz, 2007 y Peralta et al., 2010, las principales causas de estas alteraciones son: la erosión del canal de Cuautla, la construcción de infraestructura que interrumpe el flujo de mareas como canales, bordos y caminos, y la retención del aporte de las corrientes de agua dulce en las cuencas vecinas. Aunque cabe destacar que de todas las causas mencionadas la erosión del canal de Cuautla es la que más impacto ha tenido en la zona.

Dado que la expectativa a corto y a mediano plazo es que el aporte de agua desde el sur no tenderá a incrementarse sino, posiblemente a disminuir, en consecuencia, si no se lleva a cabo alguna solución a la problemática actual, se gestará un deterioro ambiental aún mayor que el actual en el que los aspectos socio – económicos de la zona se verán afectados de forma importante.

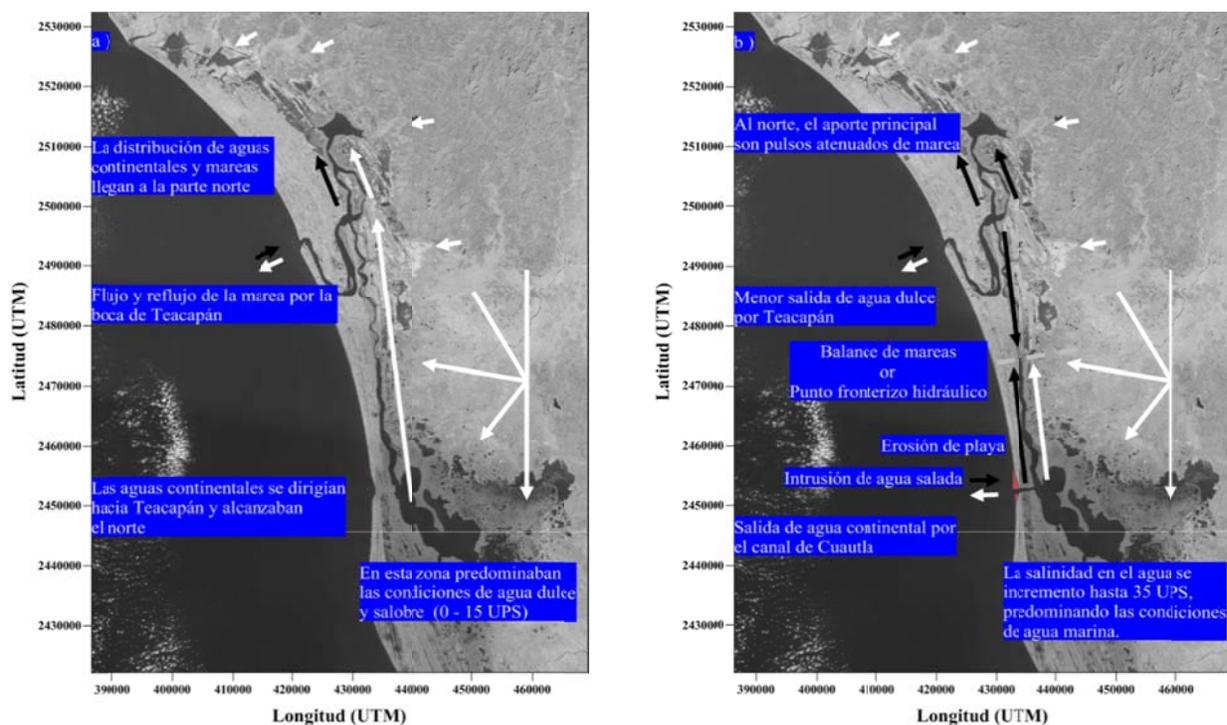


Figura 1-5. Diagnostico del sistema: a) año 1970, b) año 2013. Simbolos: Agua continental, agua marina y Erosión de playa.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es explicar el comportamiento hidrodinámico inducido por la construcción y erosión del canal de Cuautla, para integrar una metodología con la cual sea posible analizar y controlar los cambios inducidos por su erosión en este y otros sistemas con problemáticas similares.

Para alcanzar dicho objetivo se ha propuesto estudiar los componentes y procesos que se identifiquen como determinantes en el funcionamiento actual del sistema lagunar Teacapán – Agua Brava – Majahual. Para lo cual se han formulado los siguientes objetivos específicos:

- Analizar las causas de la evolución sufrida por el canal de Cuautla y demás actuaciones antropogénicas, y su relación con el cambio de los patrones de circulación y propiedades fisicoquímicas del agua al interior del sistema lagunar.
- Recopilar información base (batimetría, flujo, sedimento, corrientes), mediante campañas de campo, que permita la caracterización del sedimento, el campo de flujo, la morfología y las condiciones termo – salinas del agua en la zona de estudio. A partir de esta caracterización se tendrá una mayor comprensión sobre la dinámica de las masas de agua.
- Aplicar, calibrar y validar un modelo numérico hidrodinámico para el sistema lagunar Teacapán – Agua Brava – Majahual para evaluar su comportamiento bajo distintos escenarios de forzamiento (marea, ríos).
- Dictaminar una serie de propuestas de actuación planteadas con el fin de mejorar las condiciones ambientales del sistema lagunar. Mediante la adopción de alguna de las alternativas que se pretende controlar la erosión del canal de Cuautla.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Aunque existen numerosos trabajos para el área que comprende la zona de estudio, la mayoría orientados a detectar cambios en el medio ambiente y su posible origen, no hay trabajos realizados específicamente para estudiar el fenómeno de erosión del canal de Cuautla a pesar de los riesgos que representa para la población local y los servicios ambientales de la zona.

Ante esta situación, este trabajo pretende contribuir al conocimiento global de ecosistemas fuertemente alterados y proponer acciones para controlar la erosión del canal y de las playas adyacentes. Para tal fin es necesario investigar a detalle los procesos que actúan a lo largo del sistema lagunar que puedan verse afectados por actuaciones a favor de controlar la erosión, para así poder evaluar los impactos producidos en cada alternativa de actuación.

Los resultados obtenidos de este trabajo potencialmente contribuirán al desarrollo socioeconómico, agropecuario, turístico y urbano de la zona, y otorgarán una base para coadyuvar al cumplimiento, por parte del gobierno mexicano, del compromiso contraído en el marco de la Convención sobre Humedales de Importancia Internacional. Así mismo, la metodología desarrollada en este trabajo será una herramienta fundamental para una amplia gama de problemas en la costa.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 INTRODUCCIÓN

La zona de estudio comprende una planicie costera aluvial con una superficie aproximada de 255,005 hectáreas. Está conformada por un extenso complejo de esteros y lagunas costeras de agua salobre, grandes extensiones de vegetación natural, lodazales o pantanos y cañadas. Es alimentado por cuatro ríos y corrientes alternas como son los ríos Cañas, Acaponeta, Bejuco y Rosamorada, y mantiene comunicación con el Océano Pacífico a través de la boca de Teacapán y el canal de Cuautla, como se puede apreciar en la **Figura 2-1**.

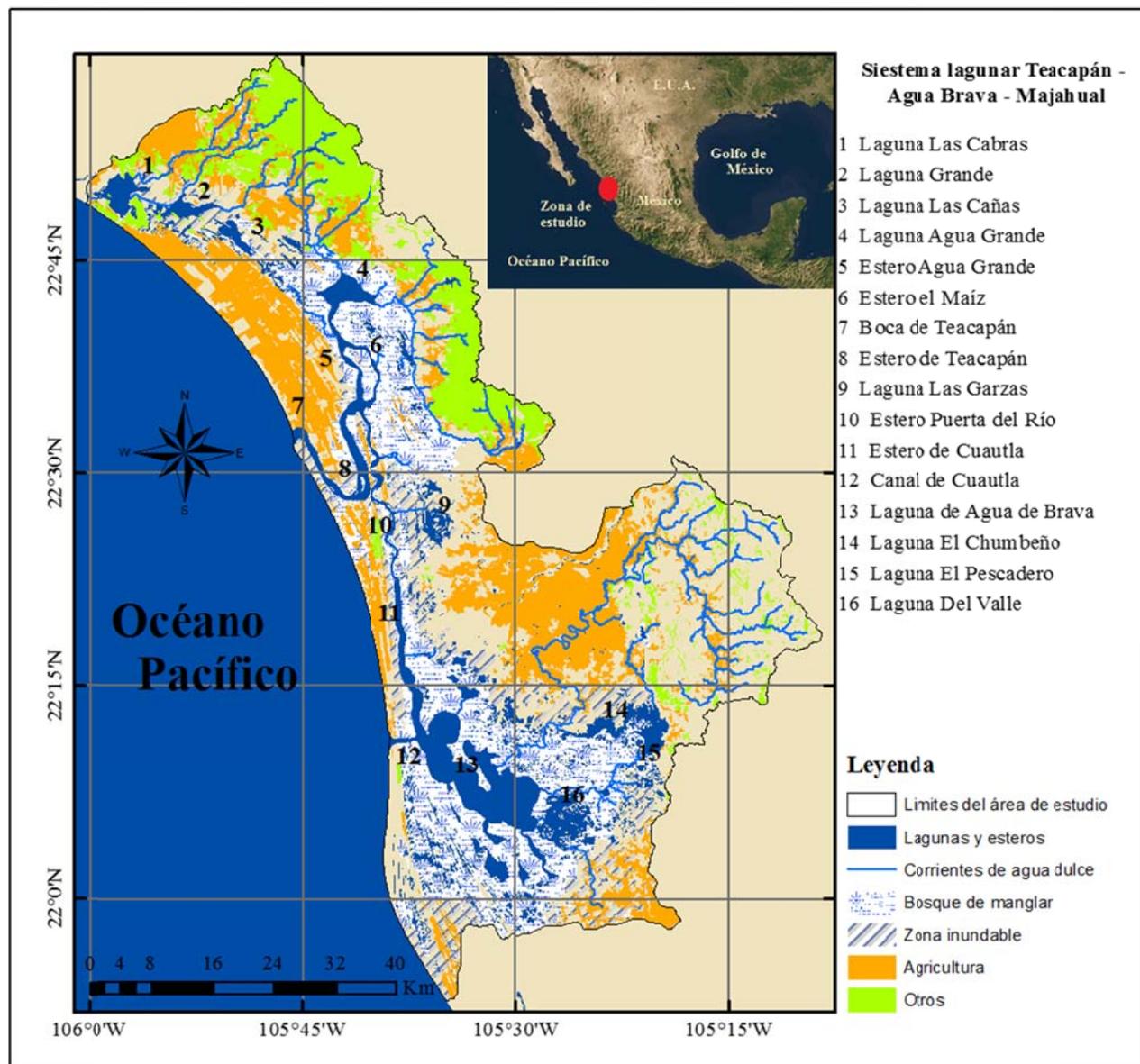


Figura 2-1.-Ubicación y características generales de la zona de estudio

Esta zona es considerada de gran importancia económica y ecológica, ya que en ella se realizan principalmente actividades de agricultura, pesca y acuicultura, específicamente el establecimiento y la operación de granjas camaronícolas.

2.2 UBICACIÓN

La zona de estudio se localiza en la planicie costera del pacífico mexicano al norte del estado de Nayarit y sur del estado de Sinaloa entre los paralelos 22° 59' y 21° 52' de latitud norte y meridianos 106° 01' y 105° 8' al oeste del meridiano de Greenwich.

Ideográficamente está limitada por el parteaguas de la sub cuenca El Palote – Higuera, colindando al norte con la cuenca del río Baluarte, al este con las sub cuencas Acaponeta, Las Conchas y Bejuco, al sur con la sub cuenca Rosamorada, y al oeste con el Océano Pacífico.

Políticamente la zona abarca total o parcialmente los municipios de Acaponeta, Rosamorada, Santiago de Ixcuintla, Tecuala y Tuxpan del estado de Nayarit, y los municipios de Escuinapa y el Rosario del estado de Sinaloa.

2.3 EDAFOLOGÍA

La zona de estudio está conformada principalmente por planicies y lomeríos a lo largo de la costa, en la que se forman grandes llanuras de inundación, lagunas y pantanos, que conforman la interface continental marino – terrestre fluvial.

Se presentan 8 tipos de suelo diferentes, mostrando los mayores niveles de concentración el Regosol, Solonchak, Feozem, Cambisol, Luvisol, Litosol, Fluvisol, Glaysol y en menor medida el Vertisol.

Por sus niveles de concentración, se definen sobre la planicie dos tipos de suelo principales: entre el mar y la zona de lagunas con regosoles formados a partir de depósitos fluvio – marinos, generalmente tienen más de 100 cm de profundidad, sus Ph varían de neutros a ligeramente alcalinos, con vocación predominantemente forestal de bosques, matorrales y selvas bajas, en tanto que su uso agrícola está condicionado principalmente a su profundidad y a la pedregosidad que presenten.

En las marismas y sus alrededores inmediatos, los suelos son de tipo Solonchak, caracterizados por su alta salinidad y por contener un alto porcentaje de sodio intercambiable. Por otra parte, la formación de estos suelos se caracteriza por presentar procesos con ciclos de movilización, redistribución y acumulación de cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonatos sódicos, cálcicos y magnésicos, cuya concentración y precipitación se renueva e incrementa anualmente por los procesos de inundación y evaporación a que están sometidos estos terrenos que funcionan como cubetas de decantación. Algunos de estos suelos se utilizan como salinas y sólo se cubren por pastos salados y manglares.

2.4 FISIOGRAFÍA

La planicie donde se localiza la zona de estudio se trata de una planicie costera acordonada (Strain Plain), es decir, una superficie aproximadamente horizontal, casi a nivel del mar, surcada superficialmente por cordones sucesivos de dunas de playas abandonadas (ver **Figura 2-2**), entre los cuales se disponen depresiones o canales naturales poco profundos típicamente espaciados entre 30 y 200 m (Curry et al., 1963). Estas depresiones o canales naturales se inundaban principalmente en época de lluvias, actualmente las cercanas al mar funcionan como canales de marea o esteros.

Cada uno de estos cordones de dunas de playa abandonadas se formó individualmente como un depósito de línea de costa; el más antiguo es el más lejano del océano y el más joven, el más cercano. La línea de costa actual es análoga en muchos aspectos a cada una de los cordones de duna en su época de formación. Cada cordón de duna comenzó como una barra sumergida a lo largo de la costa, frente a la playa existente. Ocasionalmente, mediante este proceso se puede aislar a un cuerpo de agua entre el cordón de playa antiguo y la nueva playa litoral. Este proceso parece haberse repetido cíclicamente desde que el nivel del mar alcanzó aproximadamente su posición actual, por lo tanto, se debieron haber mantenido relativamente uniformes las proporciones de aporte de sedimento, así como las condiciones hidrodinámicas de la marea y el oleaje. Esto sugiere un proceso cíclico regulado por sí mismo, que es independiente de la influencia periódica externa (Curry et al., 1963).



Figura 2-2.-Vista área oblicua de la planicie costera ondulada (Strand plain) que muestra los cordones de dunas de playa abandonadas parcialmente cubiertos por mangles y algunos cuerpos de agua. La anchura promedio de los cordones es de aproximadamente 80 metros. Los cordones jóvenes, más cerca del océano están construidas más altas y juntas que las antiguas, y la línea de costa fue reorientada antes de la formación de los cordones jóvenes. La línea de costa actual se observa en la esquina superior izquierda (tomado de Curry et al., 1963).

2.5 CLIMA

El clima de la zona de estudio corresponde al tipo Aw, subtropical cálido subhúmedo con lluvias principalmente en verano, según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1993). En cuanto a registros meteorológicos se analizó la temperatura, precipitación y evaporación de las estaciones meteorológicas que se enlistan en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1.-Ubicación de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

N°	Estación	Ubicación geográfica			Inicio de operación	Años con datos
		Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altitud (MSNM)		
18001	Acaponeta	22° 29' 24''	105° 21' 15''	24.00	1946	65
18028	Rosamorada	22° 07' 20''	105° 12' 14''	30.00	1957	53
18036	Tecuala	22° 24' 20''	105° 27' 30''	10.00	1961	35
18068	Pajaritos	22° 22' 40''	105° 15' 15''	76.00	1978	28
18072	Palmar de Cuautla	22° 13' 11''	105° 38' 45''	5.00	1981	28
18084	Mesa de Pedro y Pablo	22° 26' 00''	105° 10' 15''	806.00	1985	20

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

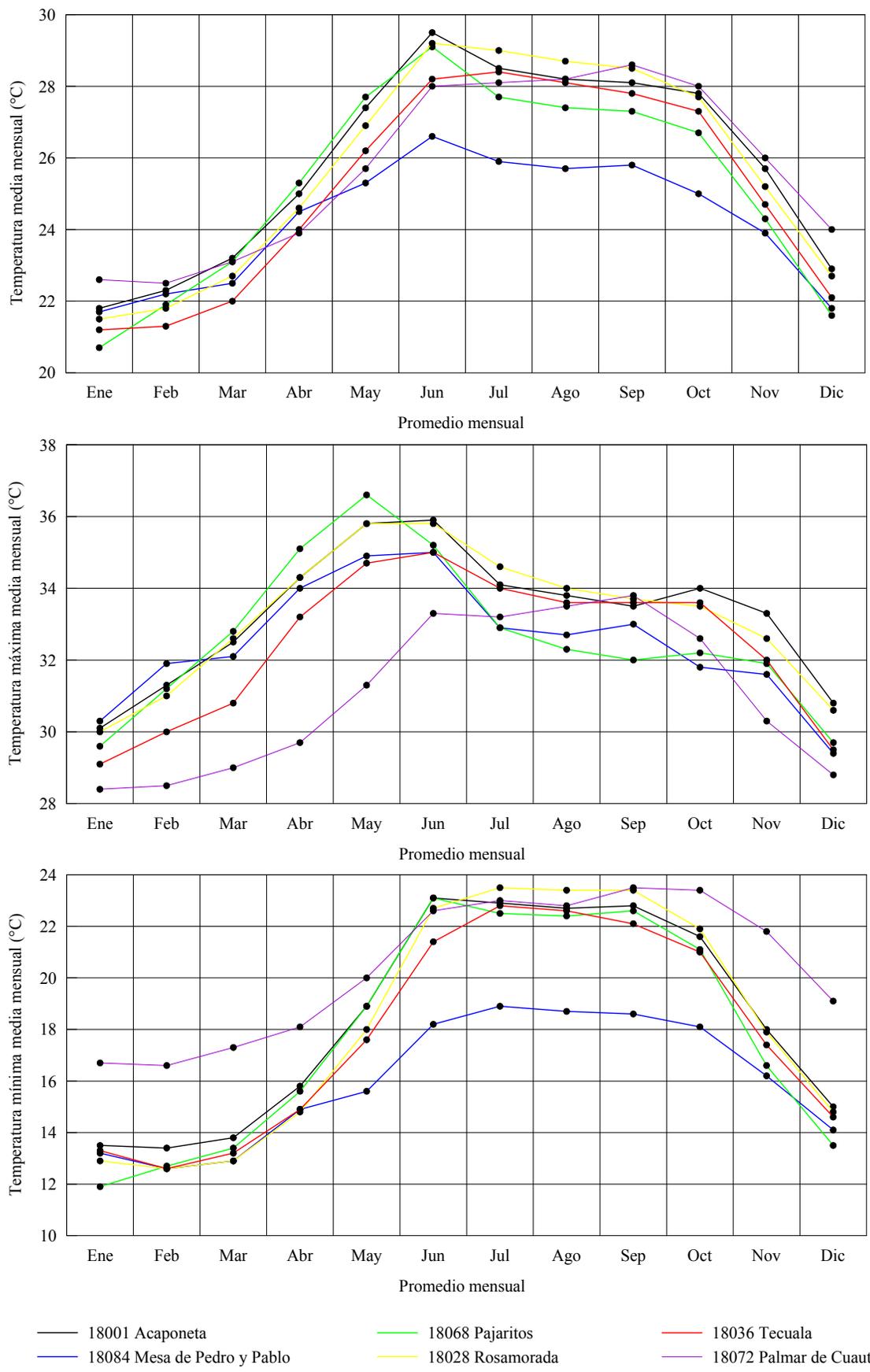


Figura 2-3.-Temperatura, periodo 1951-2010. (SMN, 2013)

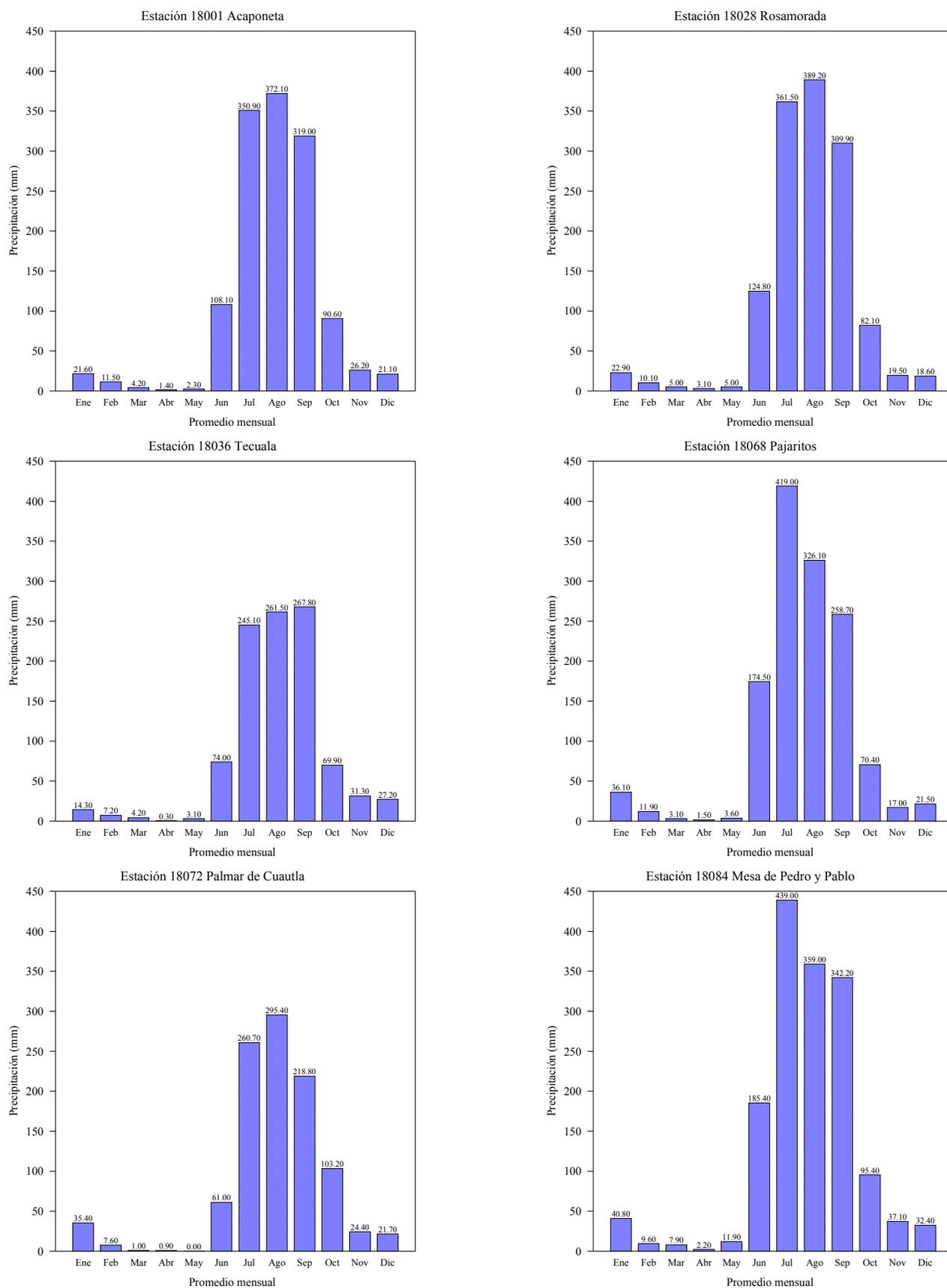


Figura 2-4.-Precipitación, periodo 1951-2010. (SMN, 2013)

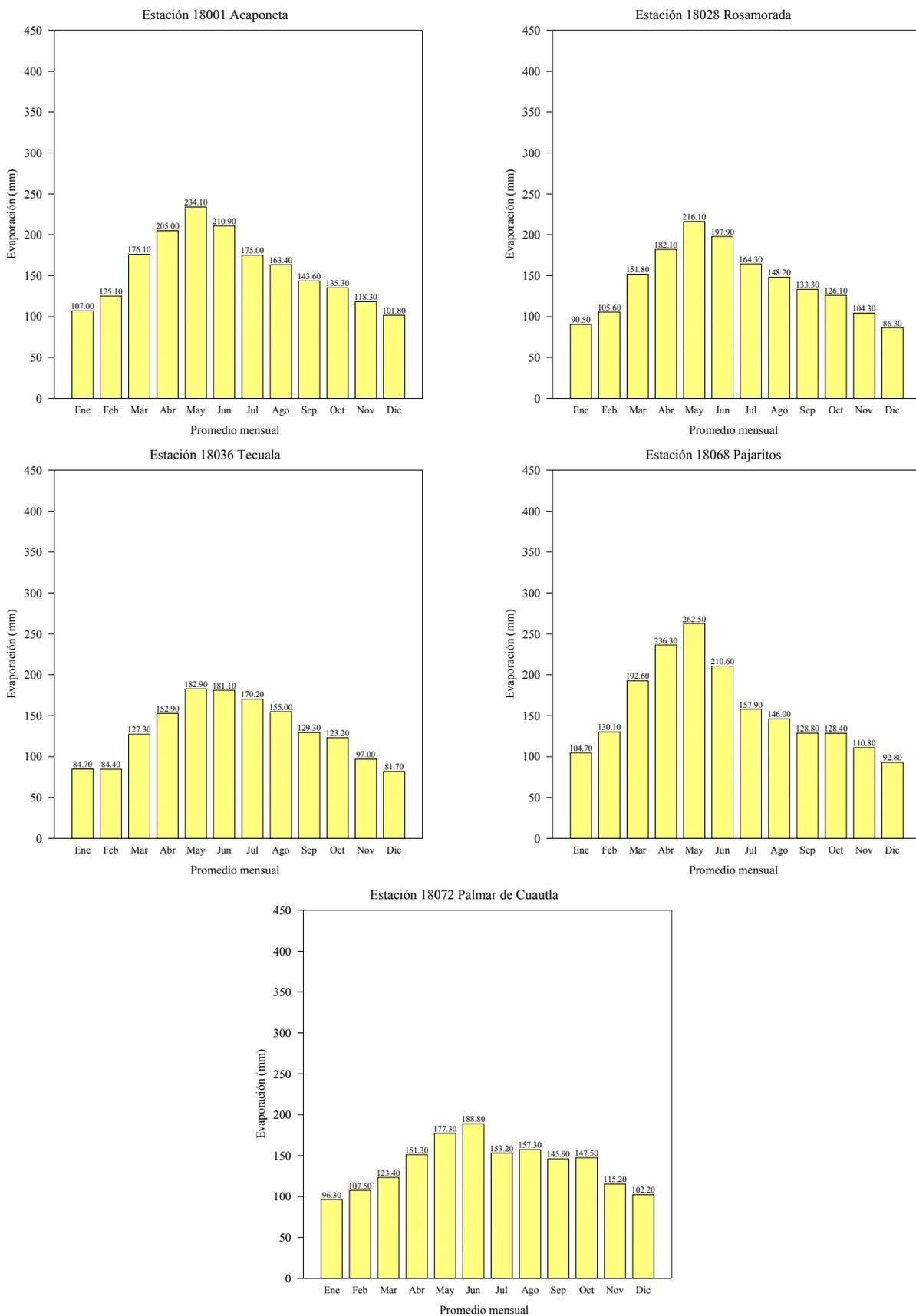


Figura 2-5.-Evaporación, periodo 1951-2010. (SMN, 2013)

En la **Figura 2-3** se muestra la información sobre la temperatura media, máxima y mínima mensual de las estaciones meteorológicas estudiadas. De la información registrada para la temperatura media mensual se puede observar que los registros de las estaciones son muy similares entre sí a lo largo del año, con excepción de la estación 18084 Mesa de Pedro y Pablo que registra en verano temperaturas más bajas a las demás, esto se debe probablemente a que se encuentra a mayor altitud. La temperatura media mensual oscila entre los 20 °C y los 29 °C, siendo los meses de junio a septiembre los más cálidos, y en los meses de diciembre a marzo la temperatura baja ligeramente.

Para la temperatura máxima media mensual se tiene que los registros más altos se presentan en los meses de mayo y junio alcanzando valores entre los 31 °C y 37 °C. Los registros más bajos de la temperatura mínima media mensual se presentan en los meses de enero y febrero, con valores entre los 12 °C y 17 °C.

La información pluviométrica, en promedios mensuales, se muestra en la **Figura 2-4**, donde se puede apreciar que las precipitaciones se producen mayormente en verano entre los meses de junio a septiembre, y son escasas a partir del mes de noviembre hasta mayo. Asimismo, se puede observar que existe una relación latente entre la altitud de la estación y la precipitación, observándose que a mayor altitud de la estación, las precipitaciones son mayores y viceversa con las estaciones en las zonas bajas.

En cuanto a la evaporación, en **Figura 2-5** se muestran los promedios mensuales de solo cinco estaciones, dado que la estación 18084 Mesa de Pedro y Pablo no cuenta con registros de este parámetro. De las gráficas, se puede observar que la evaporación media mensual inicia su ascenso a inicio del año y su descenso antes de la temporada de lluvias, situación que da lugar a que en los meses de febrero a mayo haya un déficit de humedad, lo cual es explicable ya que son los meses con menos precipitación y por tanto con menos días nublados y en el caso de los meses de abril y mayo también registran temperaturas medias mensuales altas, igualmente hay menos días con niebla, aspectos que sumados contribuyen a aumentar la evaporación.

2.6 VIENTO

Para proporcionar el régimen del viento en la zona se utilizaron los datos de la estación meteorológica Marismas Nacionales. Esta estación está ubicada dentro de la zona de estudio a una altitud de 1 m con respecto al nivel del mar e inició operaciones el 8 de diciembre del 2012, por lo que solo cuenta con 10 meses de registro.

En las rosas de viento de la **Figura 2-6**, se puede observar que en todas las estaciones del año los vientos más frecuentes provienen del este con una velocidad promedio del orden de 15 km/h, sin embargo, los vientos provenientes del tercer y cuarto cuadrante tienen una presencia significativa todo el año, principalmente en primavera y verano, además en estas dos estaciones del año se presentan las velocidades máximas de viento más frecuentes con valores en un rango de 45 a 75 km/h, mientras que en invierno se registran las menores velocidades con valores que varían más frecuentemente entre 1 a 15 km/h, pero que llegan eventualmente hasta los 40 km/h.

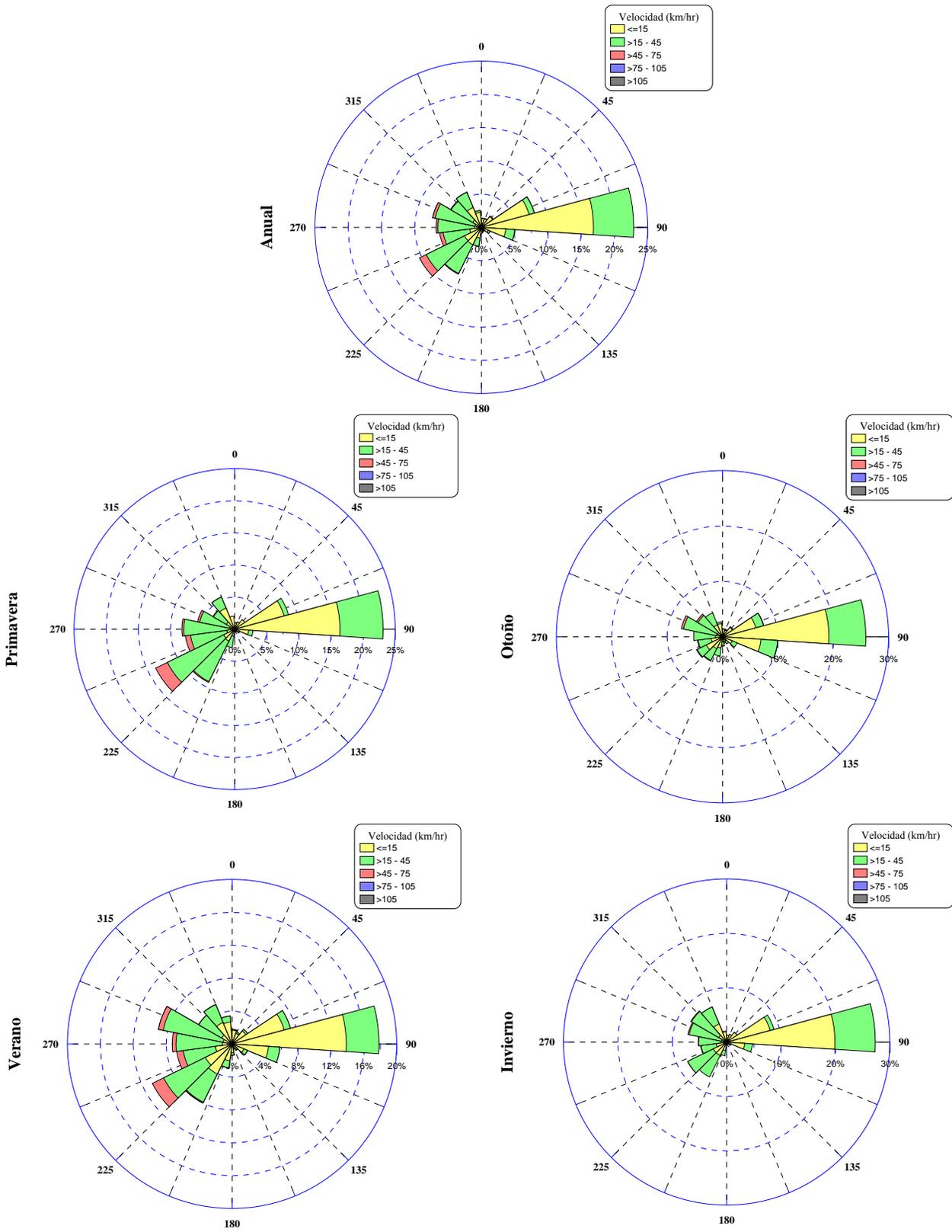


Figura 2-6.-Rosa de viento (SMN, 2013).

2.7 PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Este parámetro fue analizado con los datos de la estación meteorológica Marismas Nacionales que cuenta con apenas 10 meses de registros.

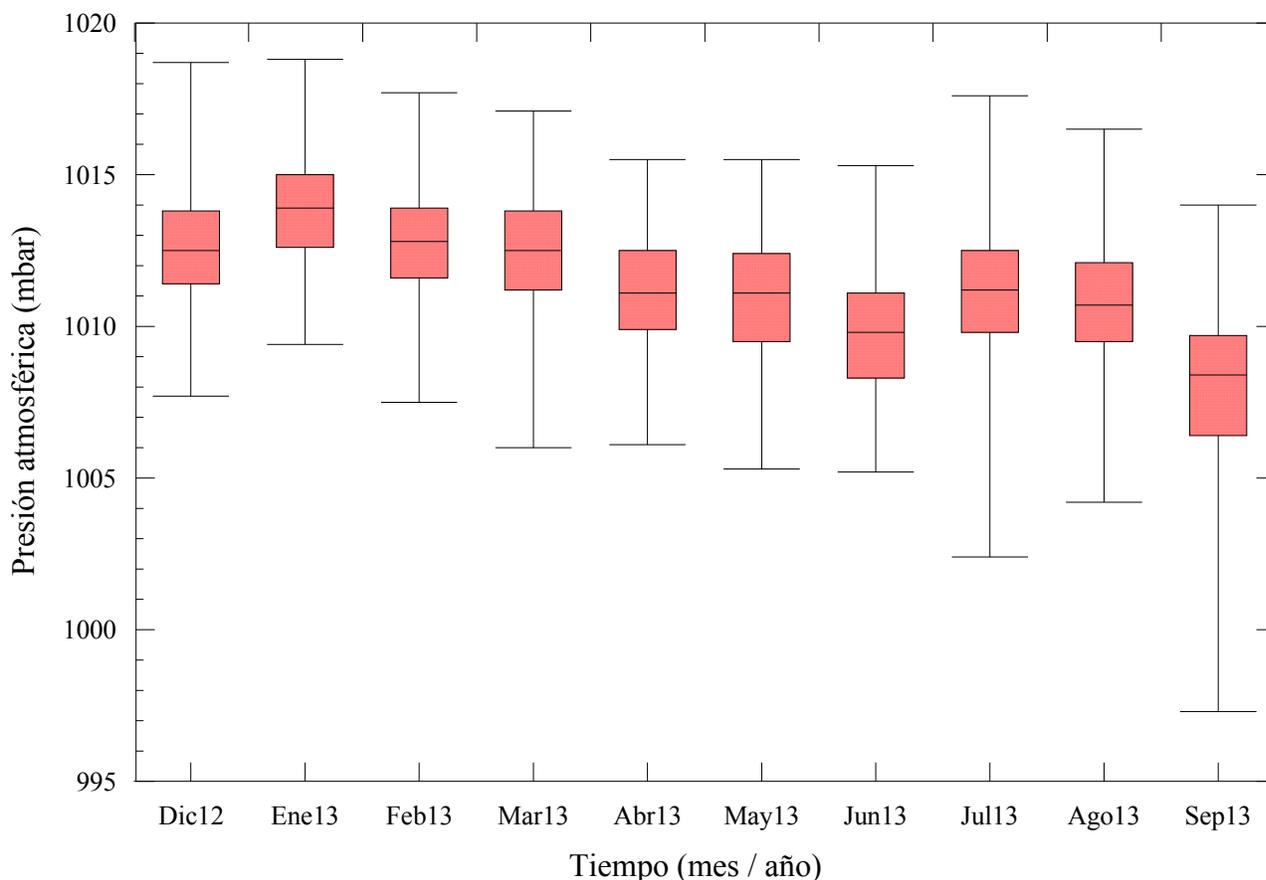


Figura 2-7.-Promedio mensuales y desviación estándar de los datos horarios de presión atmosférica (SMN, 2013).

Como se puede observar en la **Figura 2-7** la presión atmosférica a lo largo del año muestra una señal estacional, cuyos valores son mayores en invierno con el máximo (1013 ± 6 mb) en diciembre-enero y los valores menores ocurren en verano con un mínimo (1008 ± 10 mb) en septiembre. Lo anterior se relaciona a la presencia de masas de aire caliente en verano, así como los desplazamientos de los sistemas de alta presión al norte.

2.8 MAREA

La zona de estudio no cuenta con estación mareográfica que registre este parámetro, sin embargo, se escogió el registro de la estación mareográfica más cercana a la zona que contara con un registro suficientemente largo como para caracterizar el régimen de mareas. Los niveles de referencia según el mareógrafo de Mazatlán vienen reflejados en la **Figura 2-8**:



Nomenclatura

- AMR Altura Máxima Registrada
- PMR Pleamar Máxima Registrada
- NPMS Nivel de Pleamar Media Superior registrada
- NPM Nivel de Pleamar Media Superior
- NMM Nivel Medio del Mar
- BMR Bajamar Mínima Registrada
- NBMI Nivel Bajamar Media Inferior
- NBM Nivel de Bajamar Media

Figura 2-8.-Niveles de referencia del mareógrafo de Mazatlán (SM, 2013).

El régimen de marea es de tipo mixta predominantemente semidiurna, con un rango medio en marea viva de 1.10 m y 0.50 m para marea muerta. Las variaciones de la marea son relativamente pequeñas, menores a 2 m, por lo que se clasifica la zona con un rango micromareal de acuerdo a la clasificación de Davis (1964).

2.9 OLEAJE

Para la obtención del régimen de oleaje en la zona de estudio se han utilizado los datos del oleaje de Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Pacífica Mexicana en el punto 22 ° 30' de latitud norte y 106 ° 00' de longitud oeste. Este atlas es una serie obtenida vía un re-análisis de datos de 60 años de oleaje y viento (que incluye el análisis medio, extremal y de tormentas), generados mediante la aplicación de un modelo híbrido compuesto por modelos de generación de oleaje, uno energético y otro paramétrico (Silva, et al. 2008).

Según las rosas de oleaje de la **Figura 2-9** y **Figura 2-10**, aunque cada estación presenta distinta probabilidad de ocurrencia, los oleajes reinantes y dominantes en altamar provienen del Oeste y Oeste–Norte–Oeste con una probabilidad de ocurrencia del 37 % y 39 %, respectivamente. También tienen cierta relevancia los oleajes del Sur–Oeste y Oeste–Sur–Oeste que se presentan especialmente en verano y otoño y que representan un 2 % y 10 % del total de los datos, porque durante este lapso se pueden presentar un sistema de corrientes longitudinales en sentido Sur–Norte a lo largo de la playa.

Los oleajes del tercer cuadrante son los más energéticos, que se presentan, sobre todo en otoño, con alturas de ola significativa mayores a 6.15 m con periodos largos del orden de 9.25 s. En contraste con los oleajes del cuarto cuadrante que la altura de ola más probable que se presente es menor a 1.05 m asociado a periodos cortos menor a 4.75 s.

Dado que la ola de aguas profundas es modificada por los procesos de refracción y difracción en su avance hacia aguas bajas, la rosa de oleaje suministra únicamente información general, que deberá ser corroborada sobre olas que tienen influencia en el área de estudio al realizar proyectos específicos de instalaciones náuticas.

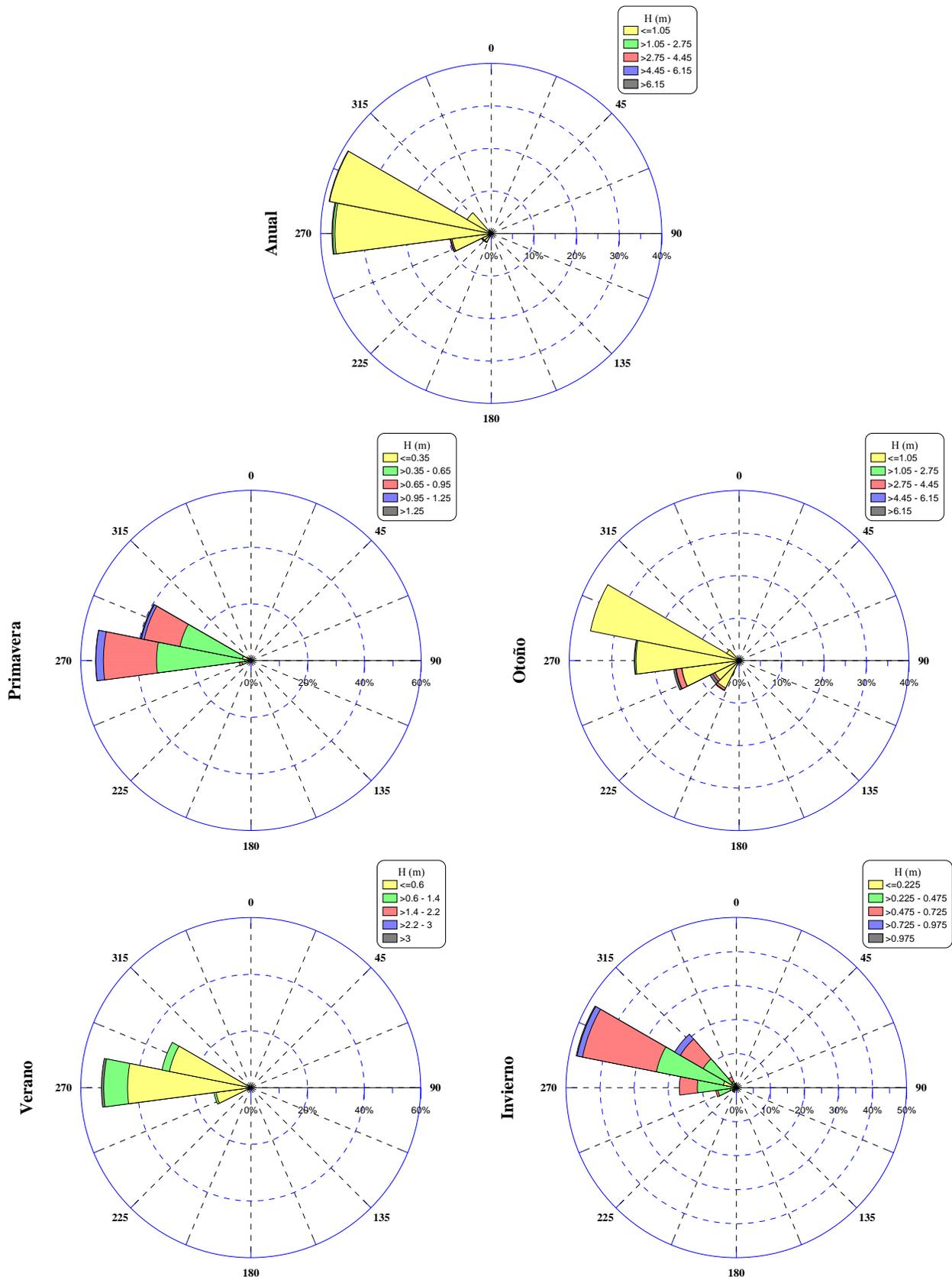


Figura 2-9.-Rosa de oleaje, alturas de ola (Silva et al., 2008).

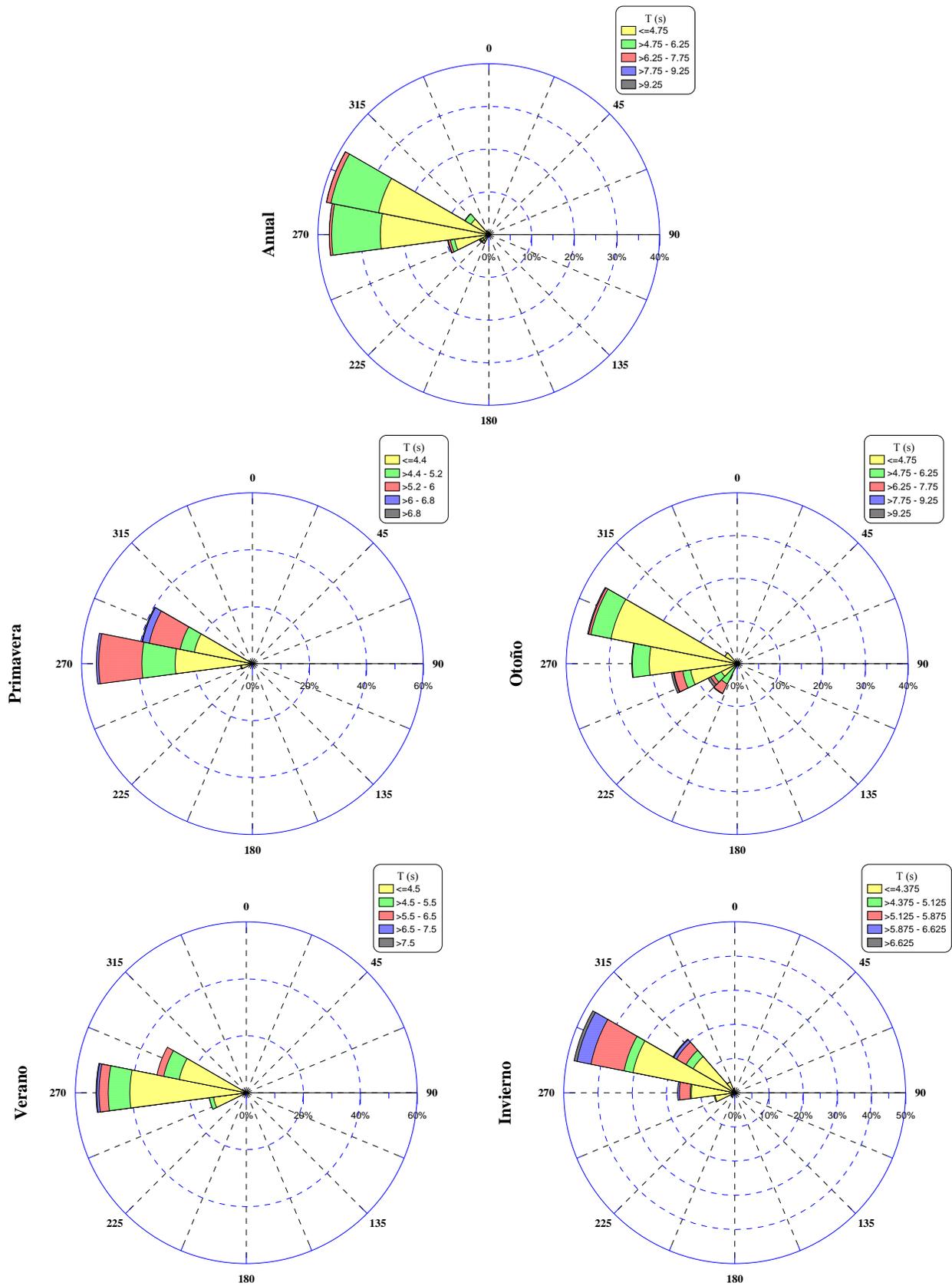


Figura 2-10.-Rosa de oleaje, periodos (Silva et al., 2008).

2.10 Ríos

Las principales fuentes de aporte de agua dulce en el sistema lagunar son los ríos Cañas, Acaponeta, Bejuco y Rosamorada, por esta razón en este trabajo únicamente se consideró analizar el caudal de dichos ríos.

La relación de las estaciones hidrométricas de donde se obtuvieron los datos se muestra en la **Tabla 2-2**

Tabla 2-2.-Ubicación de las estaciones hidrométricas consideradas.

Nº	Estación	Cuenca	Área (km ²)	Inicio función	Años de observación	Ubicación geográfica		Observaciones
						Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	
11014	Acaponeta	Acaponeta	5092.00	1945	65	22° 29' 00"	105° 20' 30"	Funciona
11030	El Bejuco	El Bejuco	342.20	1958	43	22° 00' 45"	105° 09' 00"	Funciona
11035	La Ballona	Las Cañas	435.50	1960	47	22° 32' 00"	105° 27' 00"	Funciona
11046	Rosamorada	Rosamorada	231.40	1963	44	22° 08' 00"	105° 12' 00"	Funciona

Fuente: IMTA; Banco Nacional de Aguas Superficiales.

En las **Figura 2-11**, **Figura 2-12**, **Figura 2-13** y **Figura 2-14** se muestran la función de distribución del caudal medio diario de los cuatros ríos para cada estación del año. Obsérvese que en el caso de los ríos Cañas, Bejuco y Rosamorada existe la probabilidad de que, al menos, durante algunos días no aporten agua o lo hagan de forma efímera, principalmente en invierno y primavera. Estos tres ríos solo son significativos en periodos de lluvia. Únicamente el río Acaponeta aporta agua al sistema de forma continua a lo largo del año.

En la **Tabla 2-3** se presenta el caudal medio diario aportado por los ríos superado el 50 % de los días para cada estación del año.

Tabla 2-3.-Caudal medio diario para cada estación del año (m³/s).

Río	Estaciones del año			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Cañas	0.00	6.99	0.73	0.22
Acaponeta	1.66	76.03	6.45	3.04
Bejuco	0.00	2.81	0.34	0.04
Rosamorada	0.00	2.81	0.34	0.04

En cuanto a la magnitud y frecuencia de eventos extremos, en la **Tabla 2-4** se presentan el gasto máximo asociado a un cierto periodo de frecuencia. Obsérvese que el río Acaponeta puede llegar a supera los 1,000 m³/s al año con una probabilidad del 20 %, mientras que los otros tres ríos tienen poca probabilidad al año de superar los 1,000 m³/s., especialmente los ríos Bejuco y Rosamorada.

Tabla 2-4.-Caudal asociado a cierto periodo de retorno (m³/s).

Periodo de retorno	Ríos			
	Cañas	Acaponeta	Bejuco	Rosamorada
2	331.36	861.22	175.54	80.58
5	769.40	1630.76	250.71	130.23
10	1100.02	2712.08	290.77	164.59
20	1432.13	4154.16	320.13	197.15

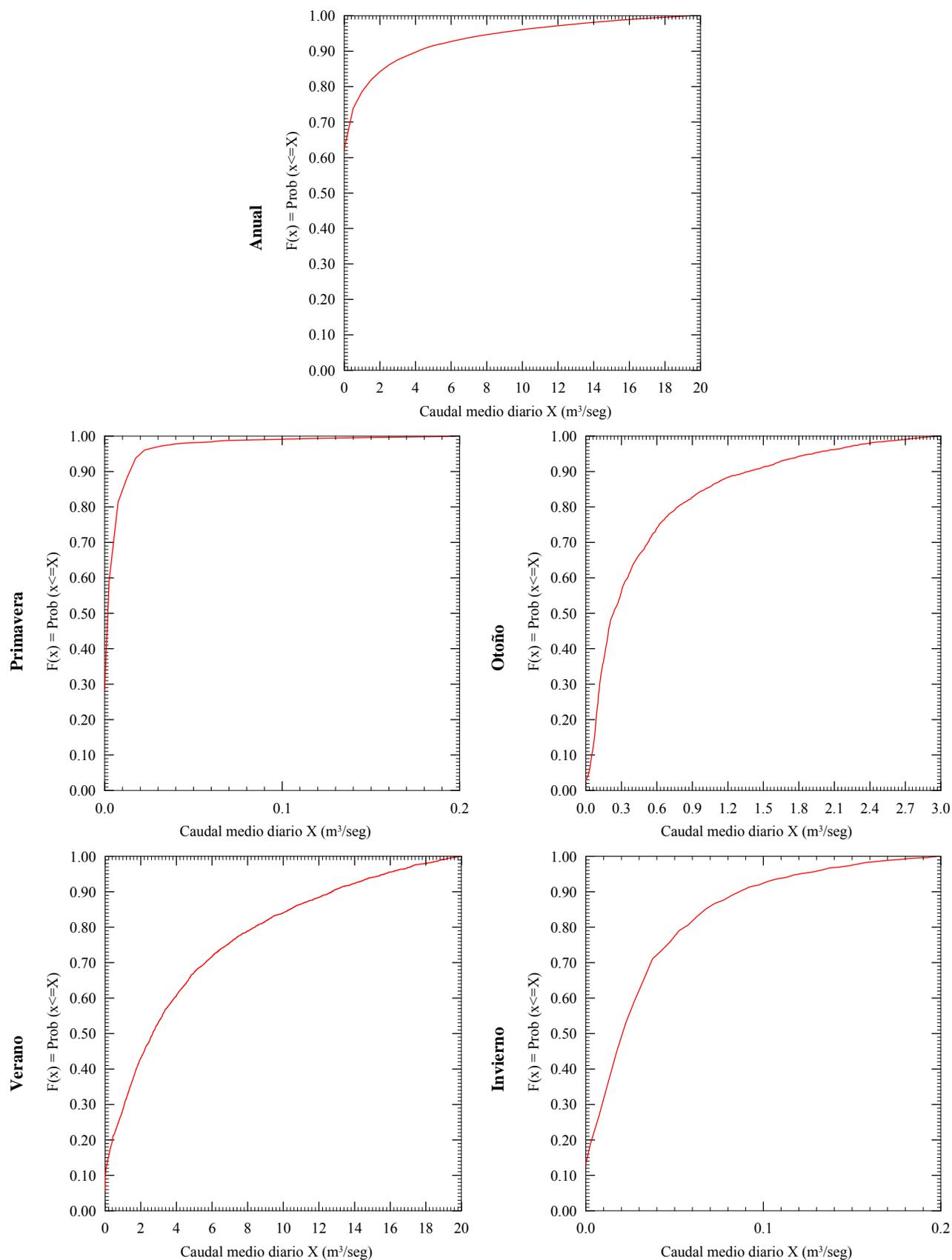


Figura 2-11.-Función de distribución del caudal medio diario (1945 – 2005) del río Cañas (IMTA, 2013).

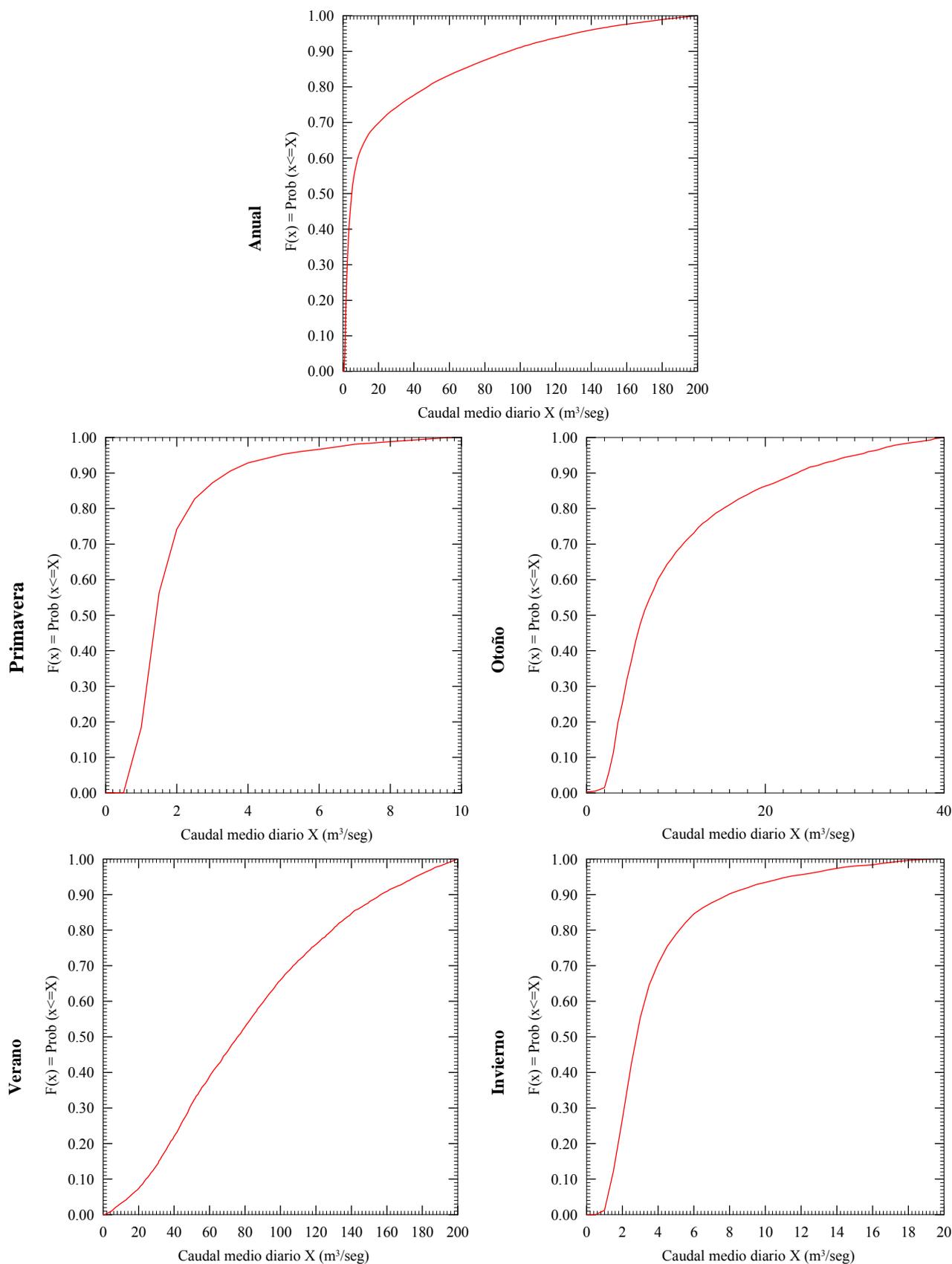


Figura 2-12.-Función de distribución del caudal medio diario (1945 – 2005) del río Acaponeta (IMTA, 2013).

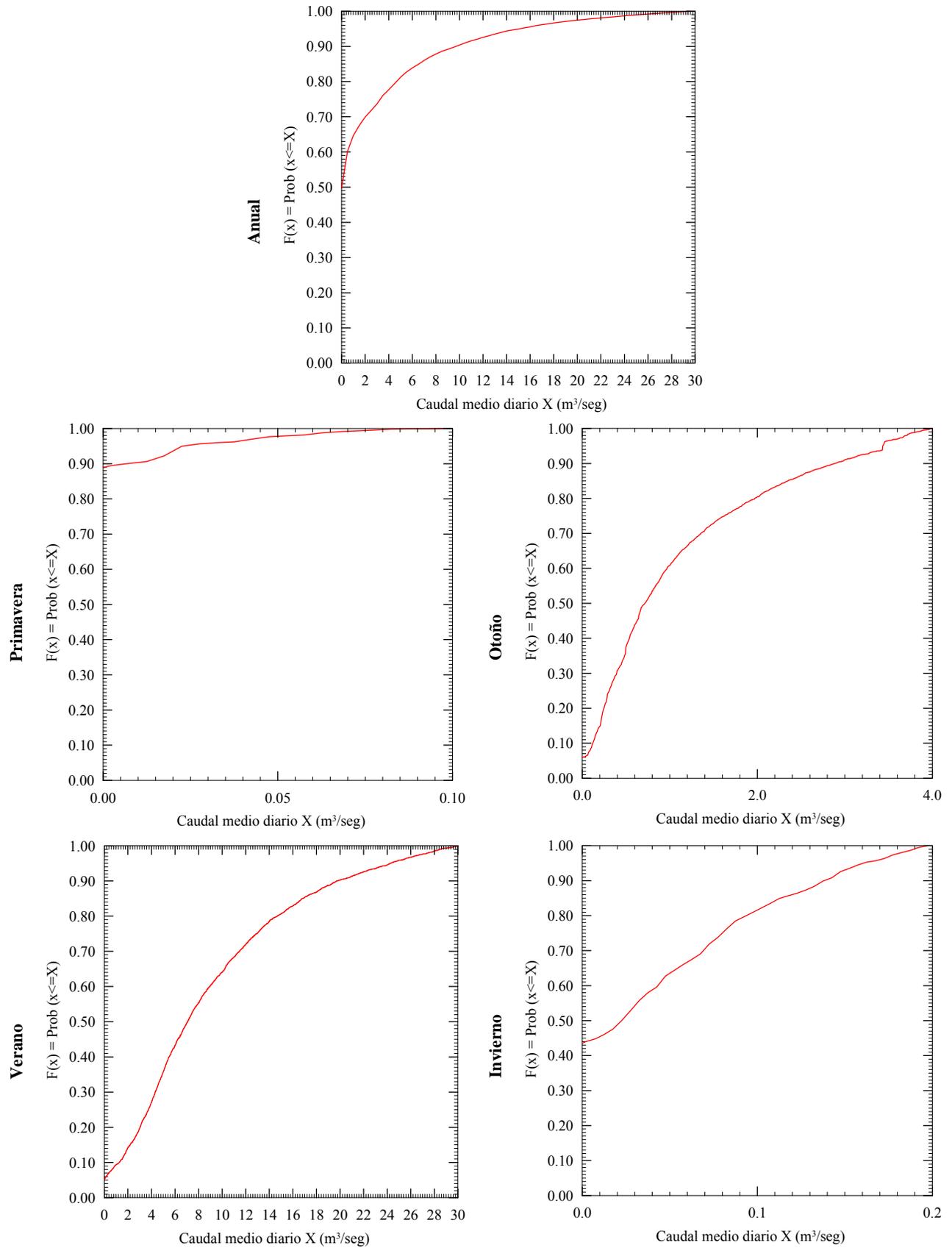


Figura 2-13.-Función de distribución del caudal medio diario (1945 – 2005) del río Bejuco (IMTA, 2013).

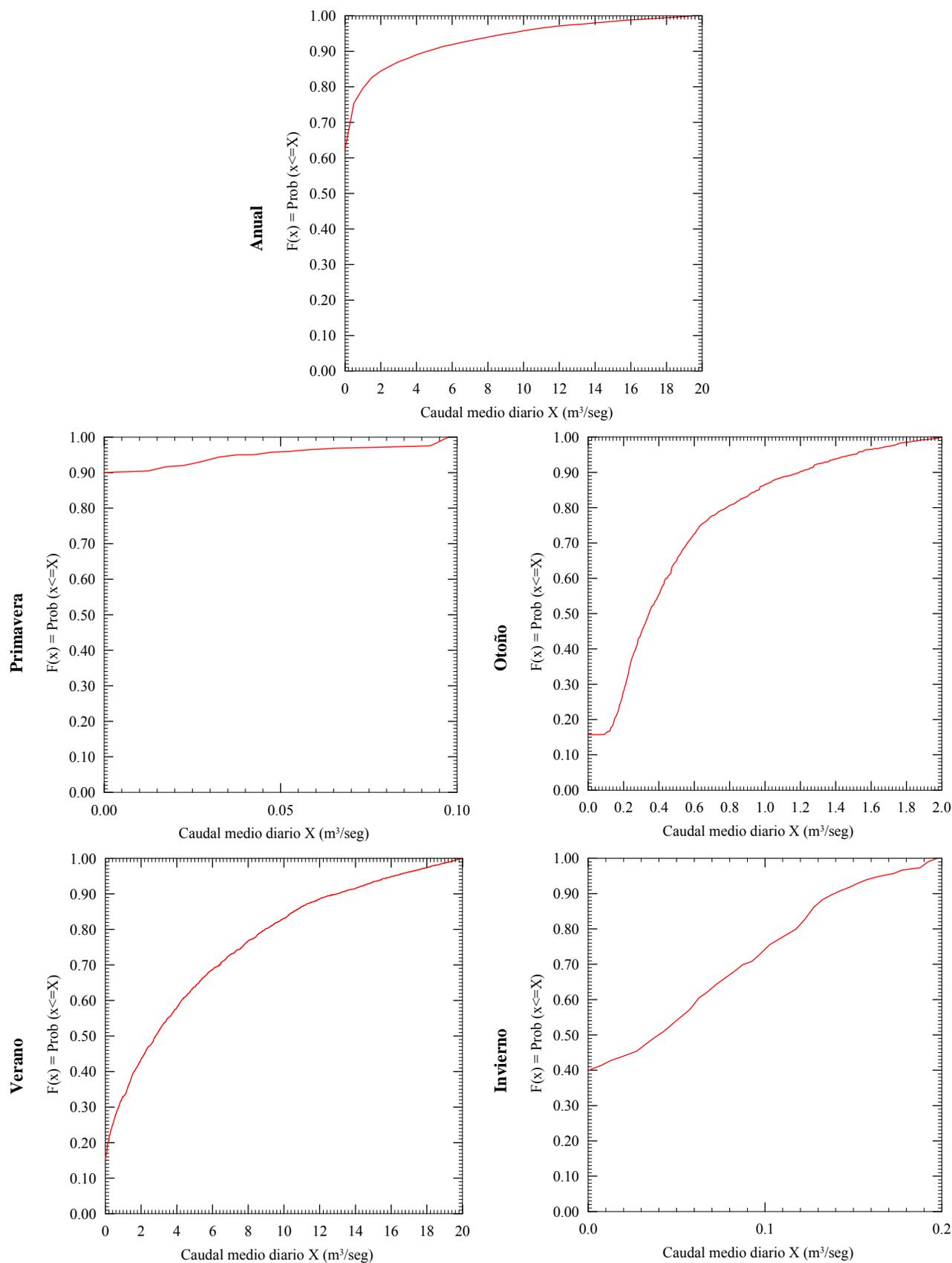


Figura 2-14.-Función de distribución del caudal medio diario (1945 – 2005) del río Rosamorada (IMTA, 2013).

2.11 FLORA

Los tipos de vegetación que se presentan en la zona de estudio son el manglar, la vegetación halófila, la vegetación de dunas costeras, el palmar, la vegetación acuática, la selva baja espinosa, la selva baja caducifolia, el matorral sarcocaula, la selva mediana subperenifolia y el bosque de encino. Dentro de estos tipos de vegetación, las selvas bajas caducifolias son de los ecosistemas que albergan un mayor número de especies de flora y fauna.

A continuación se hace una descripción general de los principales tipos de vegetación que se presentan en la zona de estudio (Fuentes et al., 1999):

Manglares: Los manglares de Nayarit son los más extensos del Pacífico mexicano. El manglar es característico de las orillas de los esteros, la desembocadura de ríos y otros cuerpos de agua costeros. Los árboles de mangle forman densos bosques, que llegan a alcanzar 25 m de altura. Se presenta en suelos de origen aluvial, inundados periódicamente por aguas salobres o salinas. Este tipo de vegetación carece de elementos herbáceos y está dominada por los siguientes tipos de manglares:

Nombre Científico	Nombre Común
<i>Laguncularia recemosa</i>	Mangle blanco
<i>Rhizophora mangle</i>	Mangle rojo
<i>Avicenia germinans</i>	Mangle negro
<i>Phyllanthus elsiae</i>	Ciruelillo
<i>Pachira acuatica</i>	Zapotón
<i>Anona glabra</i>	Anona

Vegetación halófila: Se localiza a lo largo de la costa, en elevaciones de hasta 10 msnm, sobre terrenos planos sujetos a inundaciones marinas y que tienen depresiones, en las que la acumulación de sal es alta y el drenaje es lento en las especies de plantas halófitas más comunes son: *Salicornia spp* y *Batis spp*.

Vegetación de dunas costeras: Está dominada por plantas rastreras, como *Ipomoea pescaprae*. Este tipo de vegetación es importante ya que ofrece protección a los sitios expuestos al oleaje y al viento.

Palmar o bosque de Orbign: Se presenta en sitios perturbados, próximos al litoral, sobre arenas profundas y bien drenadas. La especie dominante es *Orbignya cohune*. Otras especies como *Ficus sp.*, se presentan esporádicamente.

Vegetación acuática: Está constituida por especies cosmopolitas de amplia distribución. Se distinguen dos tipos de comunidades: tular y vegetación flotante. La primera está conformada por monocotiledoneas de hasta 3m de alto con hojas angostas o que carecen de órganos foliares arraigadas al fondo en cuerpos de agua poco profundos y de corriente lenta; las asociaciones más frecuentes están denominadas por *Typha spp.*, *Scirpus spp.*, y *Cyperus spp.* La vegetación flotante, está compuesta por plantas que flotan en la superficie del agua, ya sea arraigadas o desprovistas de órganos de fijación, distribuidas en aguas dulces o someramente salobres de corriente lenta; las especies dominantes son *Eichornia crassipes* y *Nymphaca spp.*

2.12 FAUNA

La fauna está clasificada como neotropical, es diversa y presenta un número considerable de especies endémicas, migratorias, en peligro de extinción y de importancia económica.

Se encuentran 252 especies de aves, de las que el 60% son residentes y el resto son migratorias. Estas últimas pueden clasificarse dentro de dos grandes categorías: las acuáticas y las de selva. Las especies acuáticas incluyen a especies de grupos como chorlitos, zancudos, patos y pelícanos.

Las aves acuáticas migratorias son visitantes de invierno y su distribución local está restringida a cuerpos de agua que les proveen refugio y alimento. Este hecho resalta la importancia de los sistemas lagunares costeros de Nayarit, ya que en ellos se encuentran las mayores concentraciones de aves acuáticas migratorias de Latinoamérica. Las especies de aves acuáticas que destacan son los patos arborícolas (*Dendrocygna autumnalis*), las cigüeñas (*Mycteria americana*), y las águilas pescadoras (*Pandion haliaetus*).

En un estudio realizado por el Instituto de Ciencias del mar y Limnología de la UNAM (Fuentes et al., 1999) se presentan las especies que predominan en cada estación del año, para el sistema lagunar:

Primavera: Consiste principalmente en jaibas (*Callinectes arcuatus* y *C. toxotes*), lisas (*Mugil cuerna* y *M. cephalus*) y algunos Sciénidos. Los moluscos se encuentran en mucha menor proporción, consisten en mejillones (*Mytilus*).

Verano: Durante las lluvias, los crustáceos son importantes en número y volumen, aunque predominan camarones (*Penaeus*) además de *Callinectes*, *Petrolisthes* y otros géneros en poca cantidad. También destacan por su biomasa los peces del género *Gobionellus* y *Pomadasys* (en especial *P. macranthus*).

Otoño: Los crustáceos son relevantes en número, no en volumen y peso, están representados por camarones (especialmente *P. vannamei*) y jaibas. Sucede lo contrario con el puyequé (*Dormitator latifrons*) y el Chihuil prieto (*Cathorops liropus*), que presentan mayor biomasa y volumen. En un porcentaje muy pequeño aparecen gasterópodos del género *Neritina*.

Invierno: Los crustáceos dominan plenamente y están representados en orden de importancia por *Gecarcinus*. En esta época no aparecen moluscos.

CAPÍTULO 3

CAMPAÑA DE CAMPO

3.1 INTRODUCCIÓN

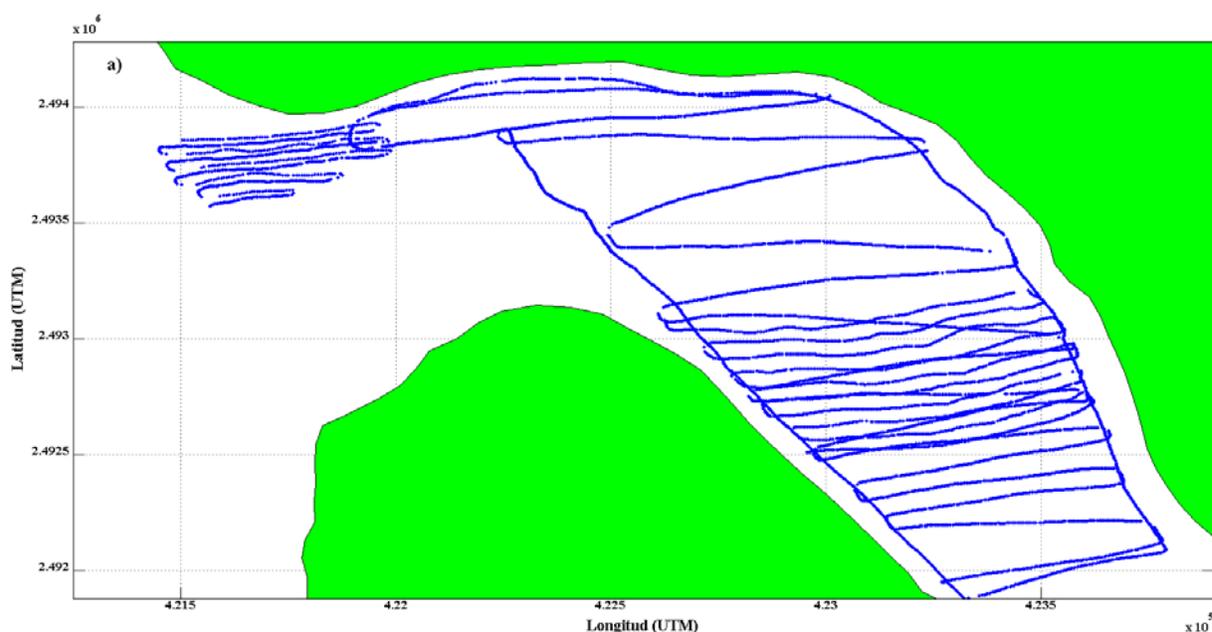
Conocer la dinámica y propiedades de las masas de agua que convergen en una zona costera es de suma importancia para entender sus patrones de circulación. Asimismo, el conocimiento acerca de las propiedades de sus sedimentos y la configuración de su fondo puede proporcionar información sobre si las aguas a lo largo del tiempo se comportan de manera muy similar o si son muy dinámicas o no. Por eso resultan indispensables en el estudio de una zona costera en particular los muestreos y mediciones de campo, con el fin de describir y caracterizar la zona en base a los datos recabados. Además, en tal caso, estos mismos datos pueden servir para calibrar y validar algún modelo numérico, por lo que contar con la mayor cantidad y calidad de datos de campo es doblemente importante.

En este trabajo se realizaron dos campañas de campo con el fin de recabar datos de batimetría, sedimentos, mareas, corrientes y propiedades termo – salinas del agua. La primera campaña se llevó a cabo durante el 20 al 29 de septiembre del 2012 y la segunda del 16 al 22 de agosto del 2013. Ambas campañas se planearon dándole especial énfasis a la interacción entre el sistema lagunar y el mar, y se definieron de tal suerte que se presentaran las condiciones mínimas y máximas de la marea astronómica.

A continuación se muestran los resultados más relevantes y la metodología que se siguió para el procesamiento y análisis los datos recabados, también se muestran los puntos y trayectorias de muestreo y medición que se realizaron.

3.2 BATIMETRÍA

En la primera campaña de campo la configuración del fondo de la boca de Teacapán, el canal de Cuautla y de las lagunas adyacentes, se obtuvo mediante mediciones continuas con una ecosonda marca Knudsen modelo SOUNDER 1612 con GPS, colocada en una lancha con motor a una velocidad baja, intentando acercarse lo más posible a tierra, aproximadamente a una profundidad de 1.50 m para evitar golpear el equipo. La **Figura 3-1**, muestra los transectos recorridos donde se llevaron a cabo las mediciones.



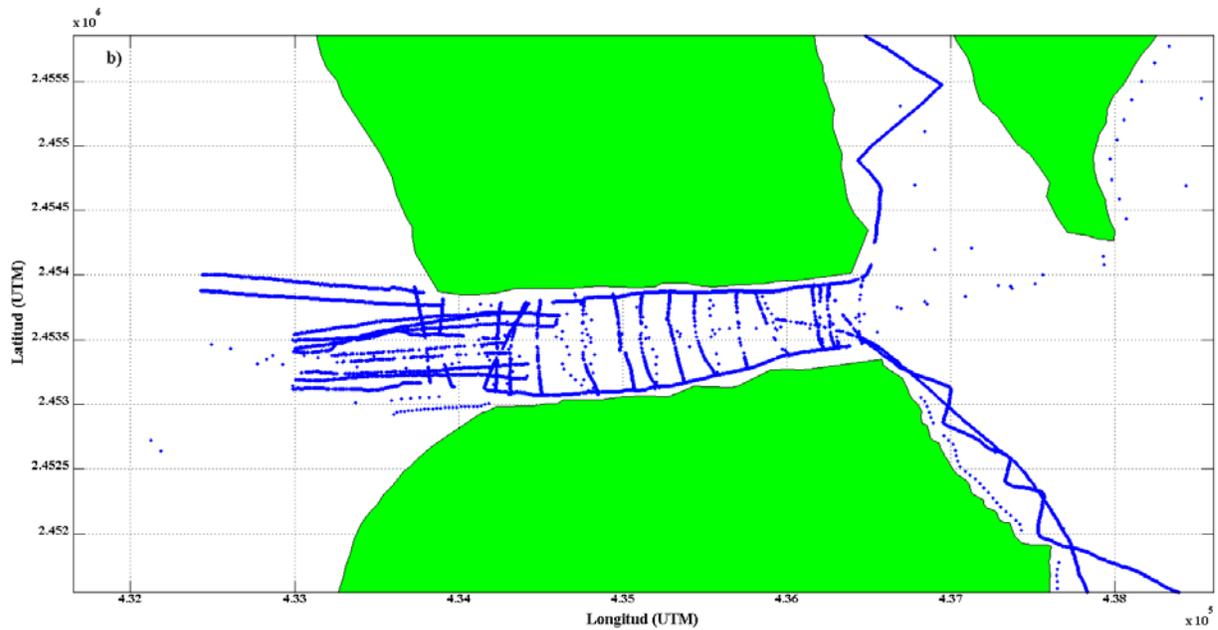


Figura 3-1.- Trayectoria de los transectos durante la primera campaña.

Para la segunda campaña solo se midió la configuración del fondo del canal de Cuautla y de las lagunas adyacentes, básicamente con el mismo equipo y método que en la primera campaña. En la **Figura 3-2**, se muestran los transectos recorridos.

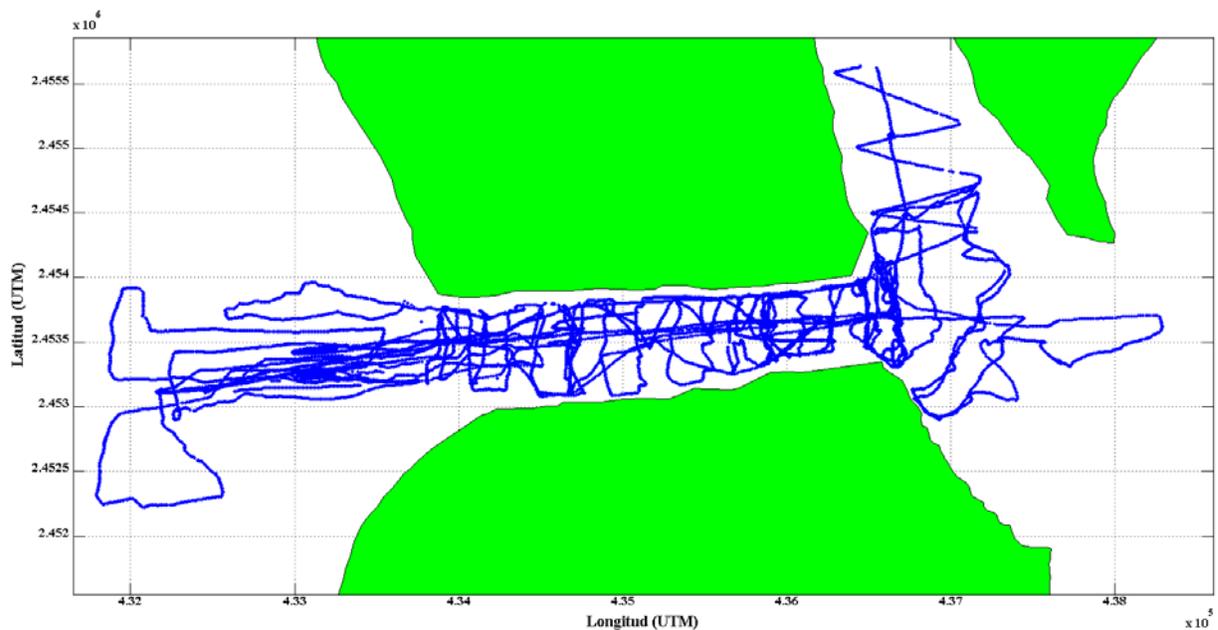
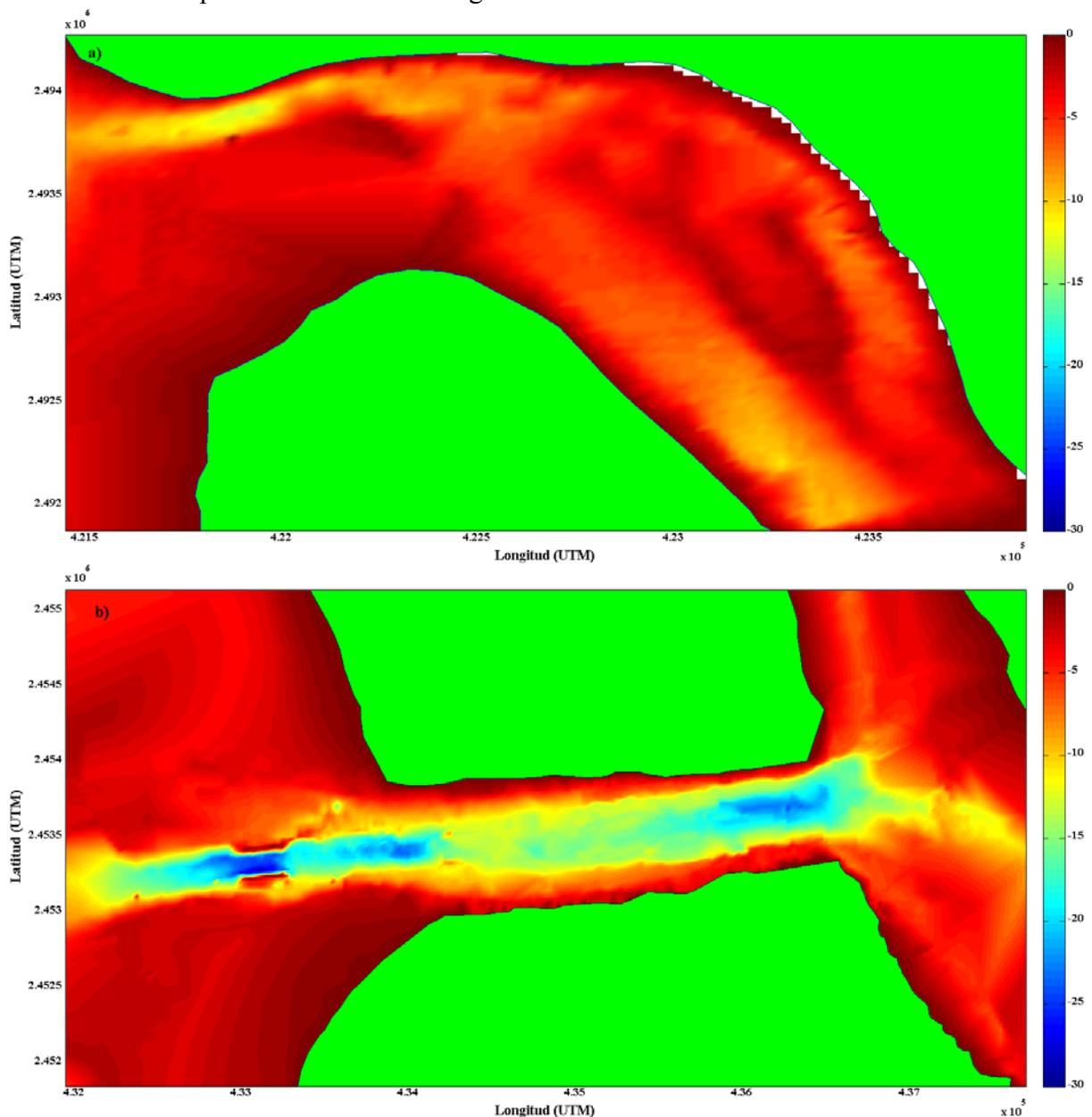


Figura 3-2.- Trayectoria de los transectos durante la segunda campaña.

Los datos de batimetría obtenidos en las dos campañas se corrigieron por marea según la fecha y hora en que se registraron, utilizando para ello las curvas de marea del CICESE. Las zonas que quedaron sin sondear se interpolaron de manera lineal. Los mapas batimétricos resultado del procesamiento se muestran en la **Figura 3-3**.

Los mapas batimétricos revelan la presencia de zonas someras a lo largo de la boca y el estero de Teacapán, que en marea viva apenas llegan a alcanzar 1.00 m de profundidad, por lo que durante la fase de reflujos queda expuesta parte del fondo sedimentario, efecto que durante el reflujos de

mareas vivas se observa aún más marcado al quedar al descubierto mayor área del fondo sedimentario. Esta característica impide la mayor parte del tiempo la navegación al centro y sur de la boca y pone de manifiesto un cierto grado de azolvamiento al interior del estero. En cuanto al canal de Cuautla se puede observar que su periferia es más somera con menos de 5 m de profundidad. Las zonas más profundas del canal se encuentran entre 25 y 30 m y coinciden con los extremos oeste y este. En el extremo oeste del canal puede observarse, entre las escolleras remanentes, una profundidad cercana a 30 m rodeada por un área menos profunda que va de 7 a 5 m aproximadamente. Esta situación particular puede ser resultado del efecto que produce el relativo acceso estrecho entre las escolleras que genera un “chorro” de agua durante flujo y refluo de la marea. En el extremo este del canal, en su comunicación con la laguna de Agua Brava, la sección más profunda tiene alrededor de 27 m, es también la sección más estrecha y se le conoce como la garganta del canal. Al comparar los mapas batimétricos de 2012 y 2013 del canal de Cuautla, no se observan cambios significativos, lo que significa que en el último año el canal no ha sufrido cambios importantes en su morfología.



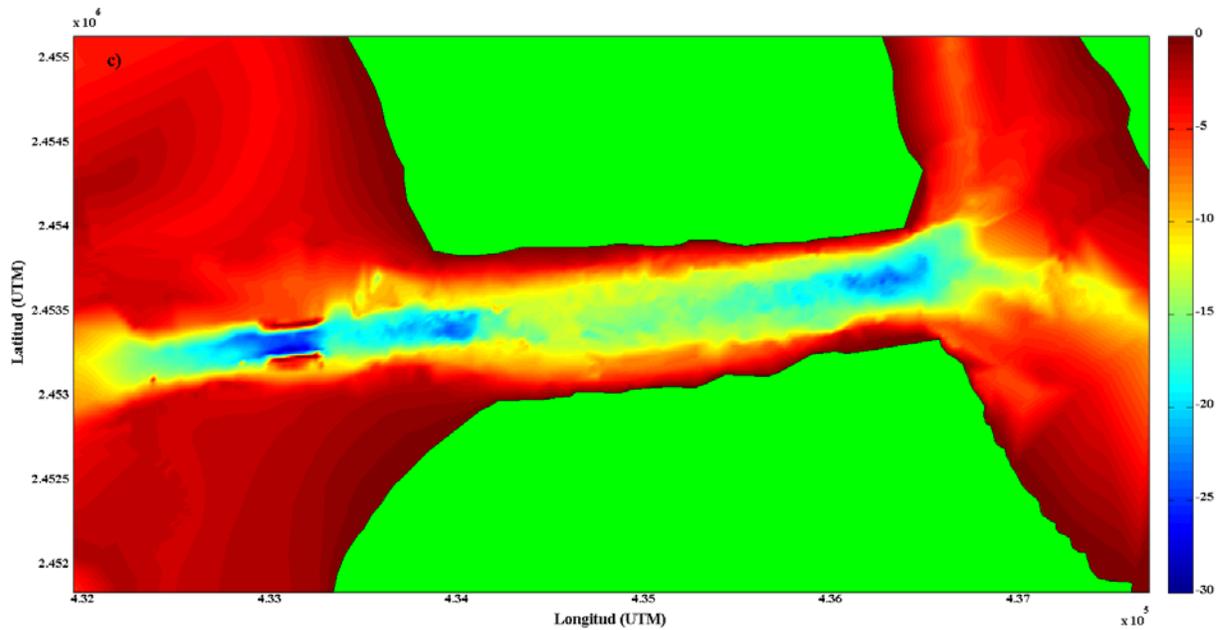


Figura 3-3.-Mapas batimétricos: a) boca de Teacapán y b) canal de Cuautla, fueron obtenidos con datos de la primera campaña, y c) canal de Cuautla, con datos de la segunda campaña.

3.3 HIDRODINÁMICA

En la primera campaña de campo se instaló, cerca del puente de Novillero, un velocímetro acústico “Vector” (Nortek, AS) a 0.50 m del fondo para medir la superficie libre y las corrientes sub superficiales del agua. Esta profundidad se eligió para no medir corrientes superficiales que son altamente afectadas por el viento y podrían sobrestimar las mediciones. En la **Figura 3-4** se ilustra la ubicación del velocímetro.

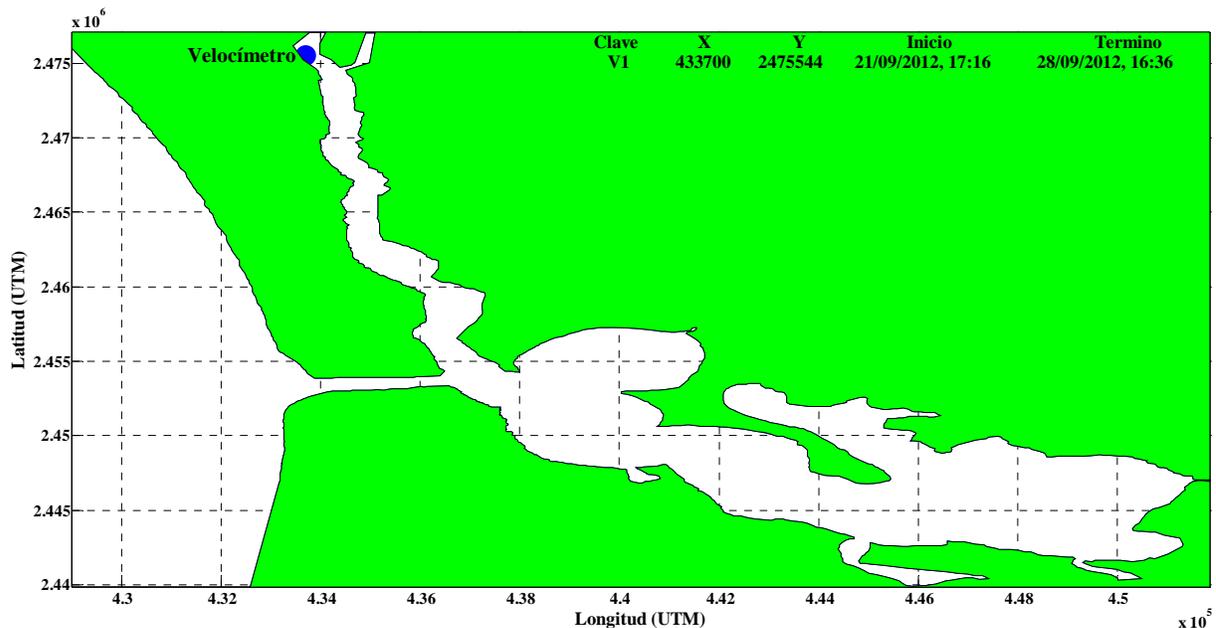


Figura 3-4.-Ubicación del velocímetro acústico “Vector” (Nortek, AS).

Para la segunda campaña de campo se instaló un perfilador de corrientes “AWAC” (Nortek, AS) a 0.90 m del fondo para mediar la superficie libre y las corrientes a cada 0.50 m a lo largo de la

columna de agua en un punto al interior del canal de Cuautla. La ubicación del perfilador se muestra en la **Figura 3-5**.

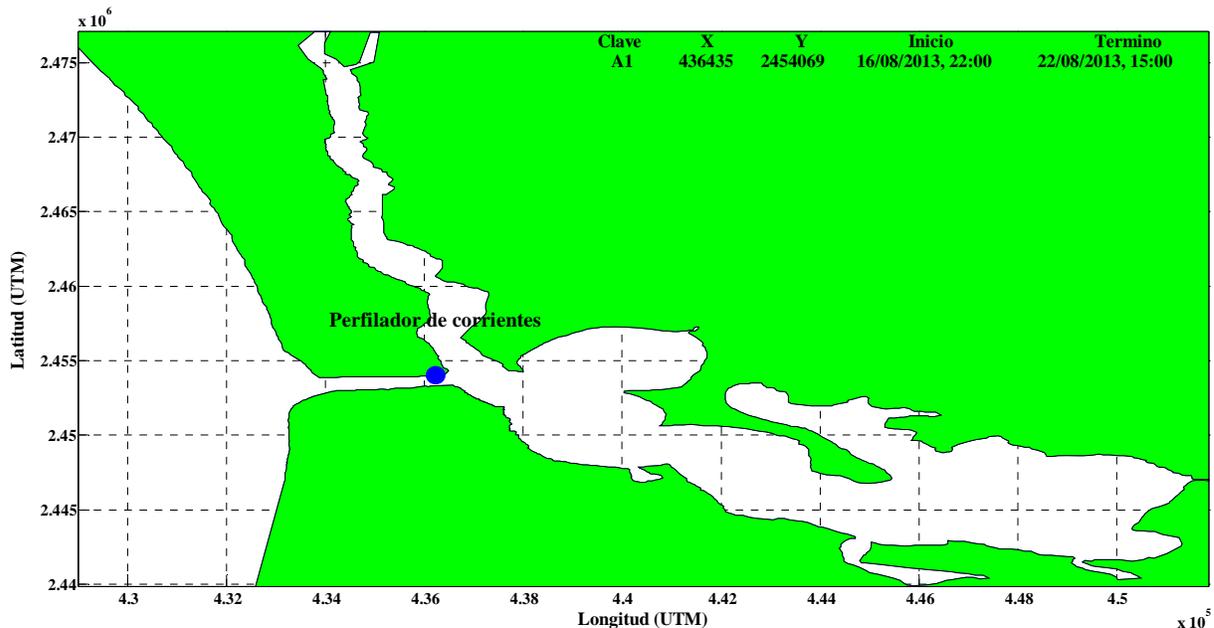


Figura 3-5.-Ubicación del perfilador de corrientes “AWAC” (Nortek, AS).

Para el procesamiento de los datos obtenidos con el velocímetro y el perfilador de corrientes fue necesario exportarlos a formato ASCII utilizando el software provisto por el fabricante Nortek, en seguida se les aplicó un filtro promedio corrido, y después fueron analizados mediante técnicas estadísticas convencionales.

A fin de observar el comportamiento de la superficie libre y las corrientes de agua en los puntos donde se instalaron el velocímetro y el perfilador de corrientes, se graficaron sus mediciones, lo cual se muestra en las **Figura 3-6** y **Figura 3-7**.

El comportamiento de los datos de superficie libre obtenidos en ambas campañas presenta una variación mixta semi diurna, al igual que los datos de velocidad. Las velocidades menores ocurrieron durante la fase de flujo de marea cuando comienza el nivel a subir, y las velocidades mayores cuando el nivel comienza a bajar en la fase de refluo. En la primera campaña el velocímetro “Vector” registró un valor medio de velocidad de 0.29 m/s, y valores máximos entre 0.57 y 0.72 m/s, la amplitud promedio de la superficie libre fue de 0.75 m. Para la segunda campaña el perfilador de corrientes “AWAC” registró un valor medio de velocidad de 0.66 m/s, y los valores máximos entre 1.28 y 1.30 m/s, la amplitud promedio de la superficie libre fue de 1.18 m.

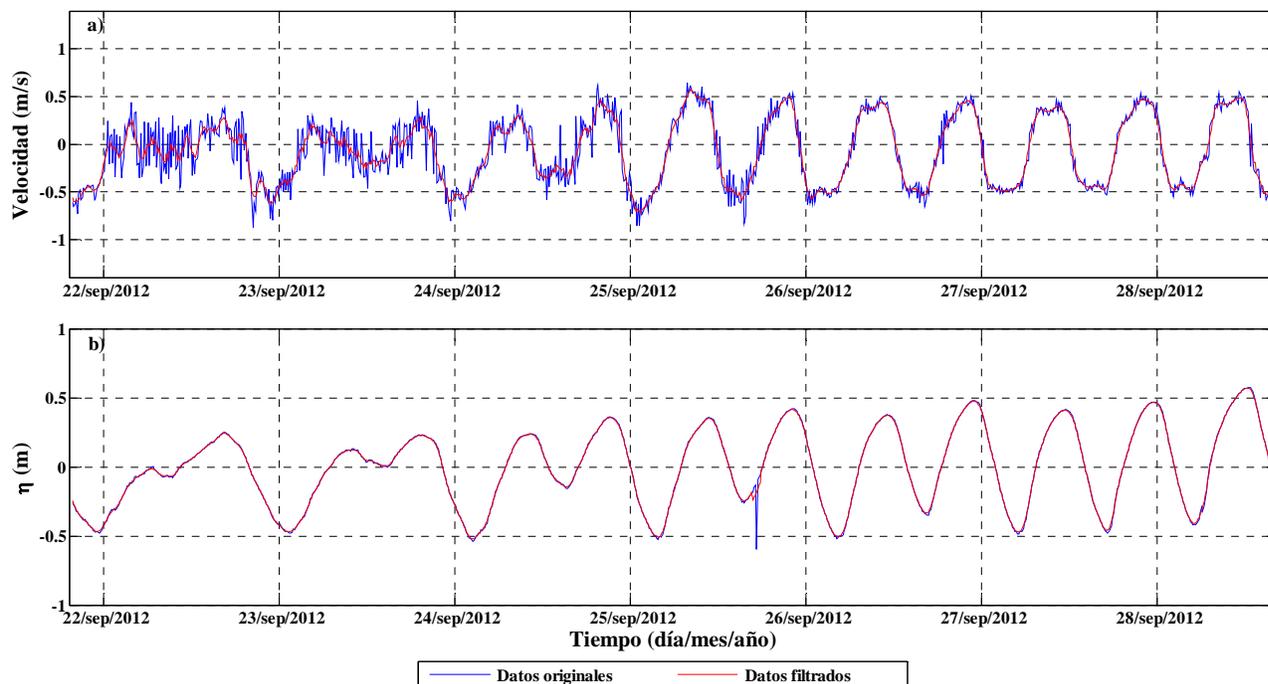


Figura 3-6.-Mediciones con el velocímetro durante la primera campaña: a) velocidad y b) superficie libre.

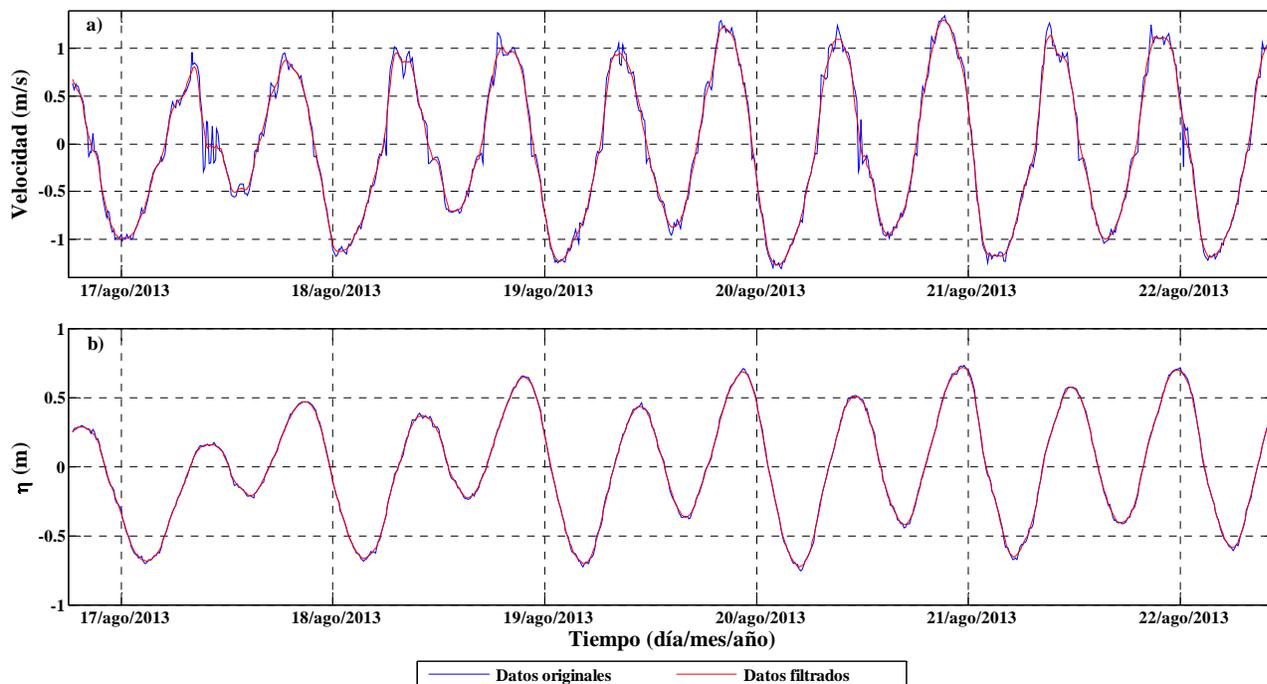


Figura 3-7.-Mediciones con el perfilador de corrientes durante la segunda campaña: a) velocidad y b) superficie libre.

Adicionalmente, con el propósito de conocer la relación entre la marea en la zona de estudio y la del mareógrafo de Puerto Bayeto, se llevó a cabo una comparación entre las curvas de marea medida con el perfilador de corrientes "AWAC" y la de pronóstico emitida por el programa marea del CICESE. Se encontró un pequeño desfase en los picos de la onda de marea y una pequeña contribución residual, esto se puede apreciar en la **Figura 3-8**.

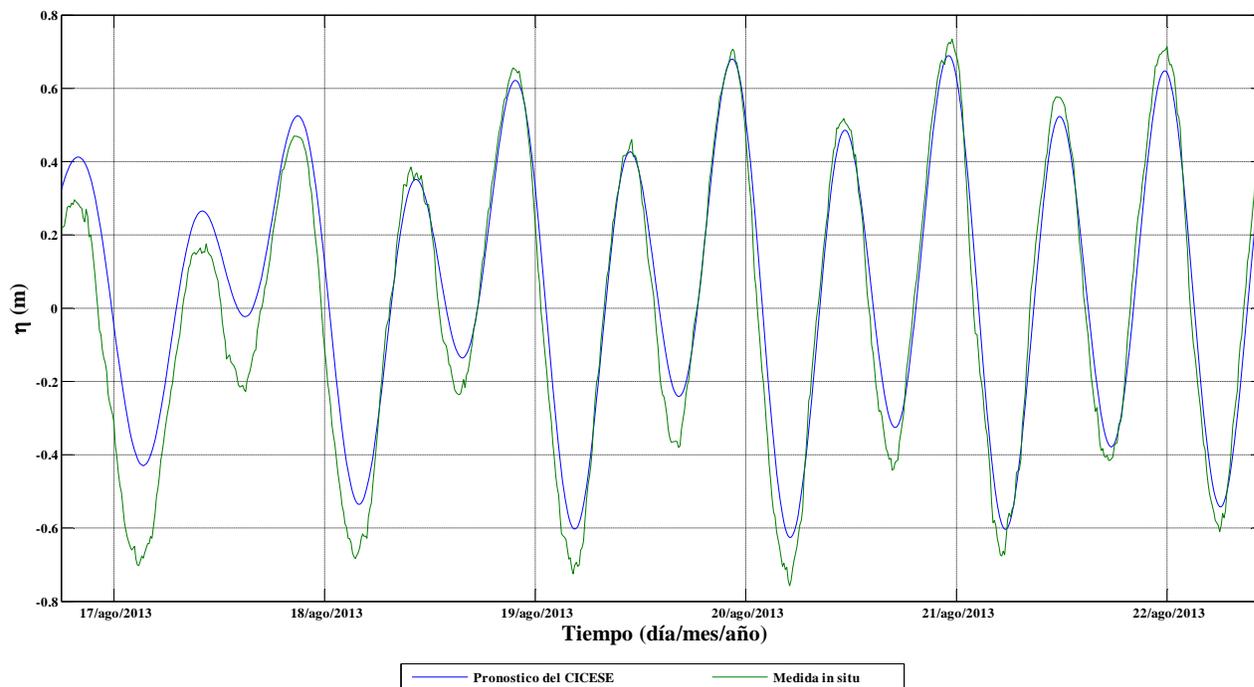
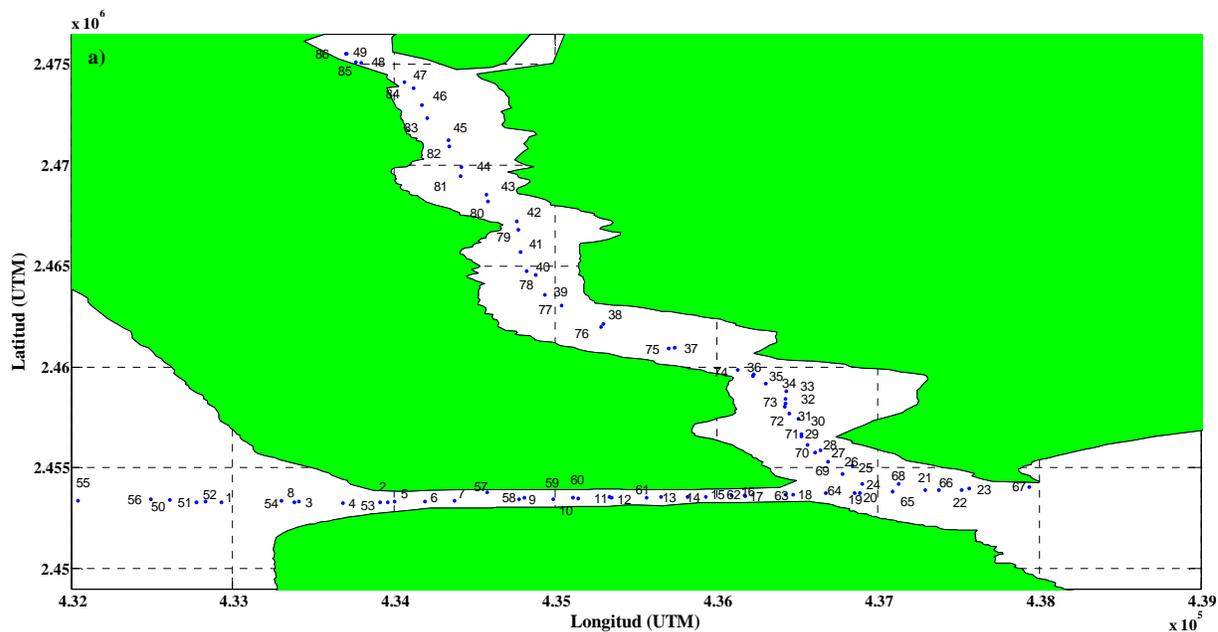


Figura 3-8.-Comparación de mareas pronosticada en Puerto Bayeto y medida en el canal de Cuautla.

3.4 PROPIEDADES DEL AGUA

Las mediciones de salinidad, temperatura y densidad a lo largo de la columna de agua, se realizaron utilizando el instrumento CTD SBE 19, el cual era lanzado desde una lancha sin desplazarse y conforme se sumergía iba registrando continuamente los parámetros del agua. Durante la primera campaña de campo se realizaron 252 lances de CTD SBE 19 en distintos puntos dentro del canal de Cuautla y las lagunas adyacentes, los puntos de medición se muestran en la Figura 3-9.



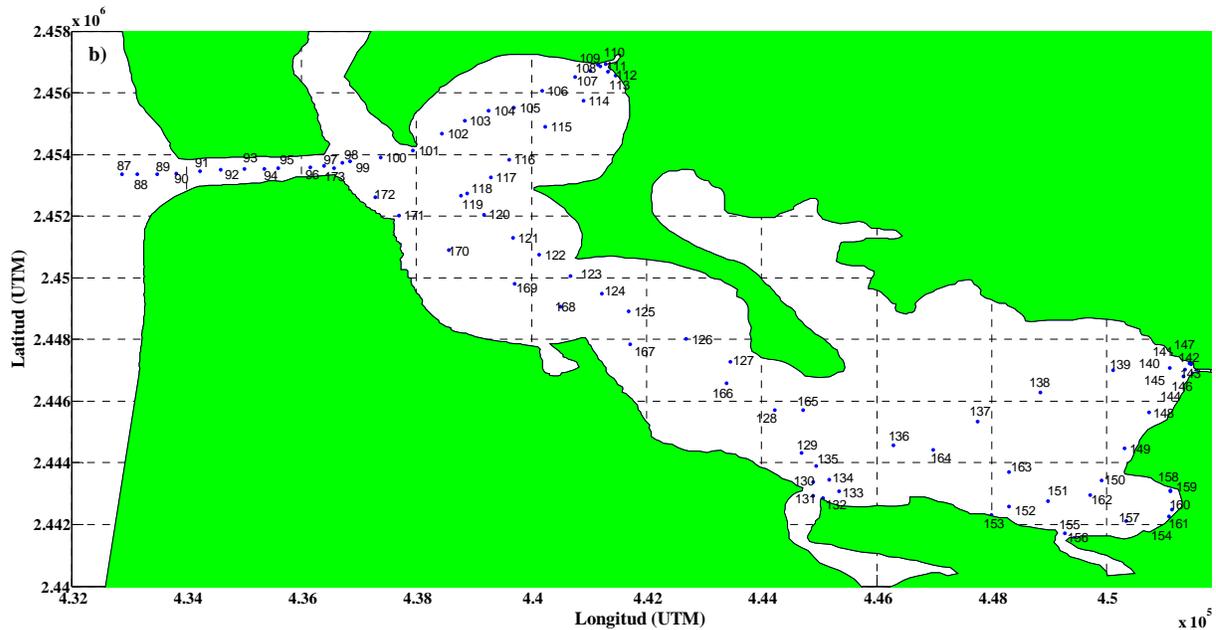


Figura 3-9.-Ubicación de los lances con CTD durante la primera campaña: a) 23 de septiembre, y b) 24 de septiembre del 2012.

Adicionalmente, se definieron 4 sitios de monitoreo permanente durante la duración del trabajo de campo, como se muestra en la **Figura 3-10**, y en cada sitio se instaló un CTD diver a una profundidad aproximada de 2 m con respecto al nivel medio del mar.

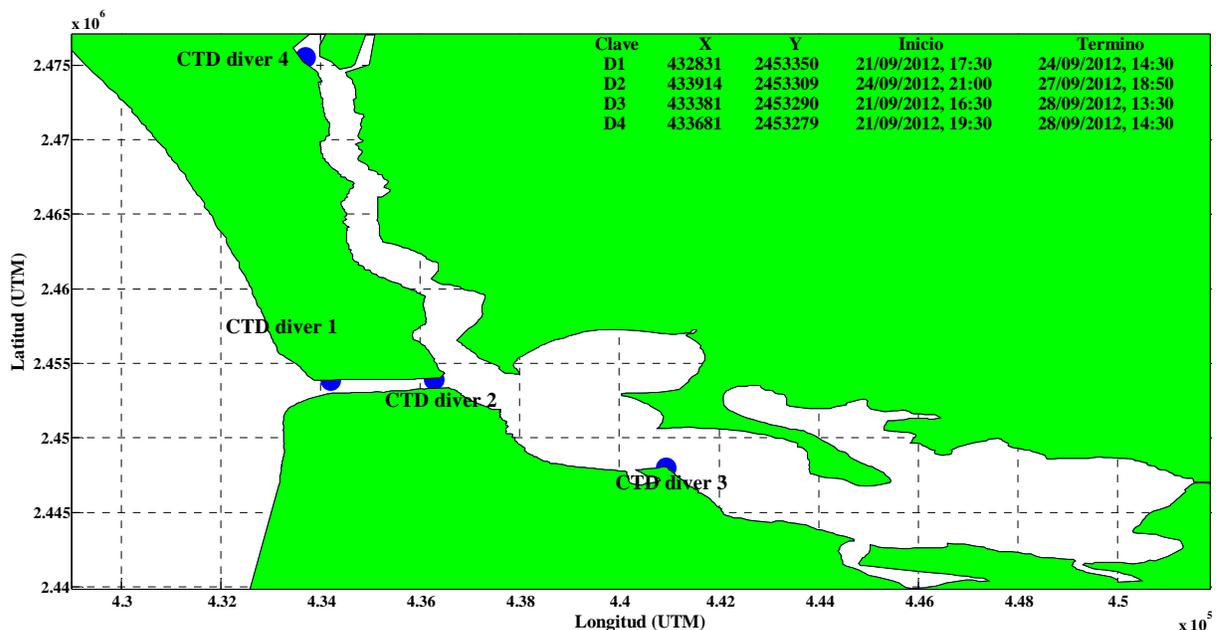
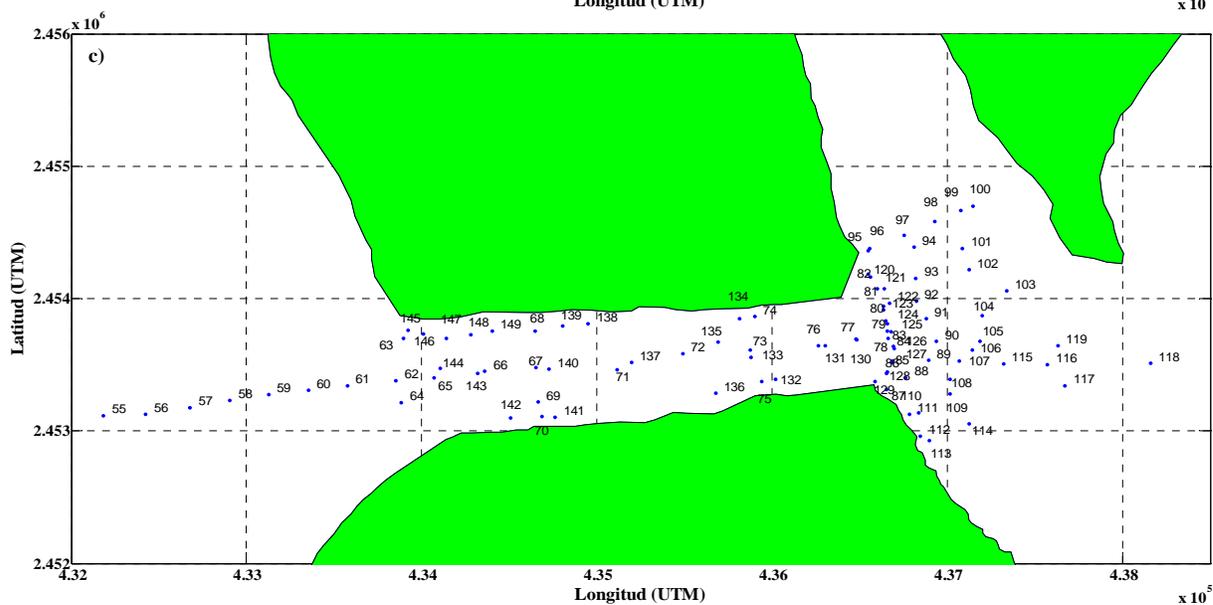
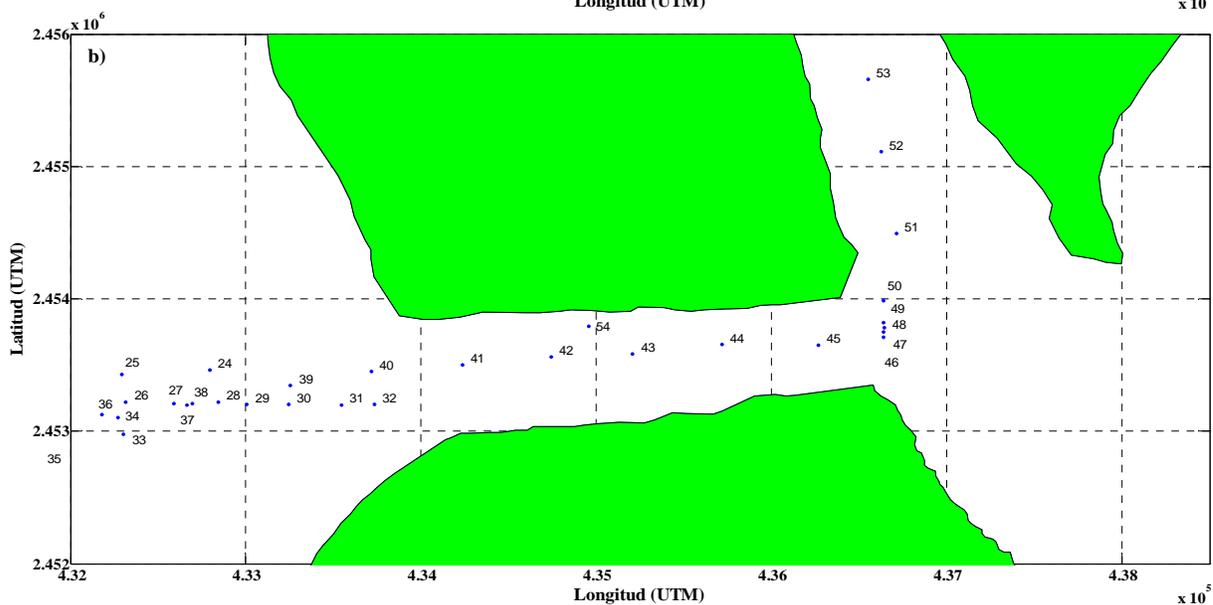
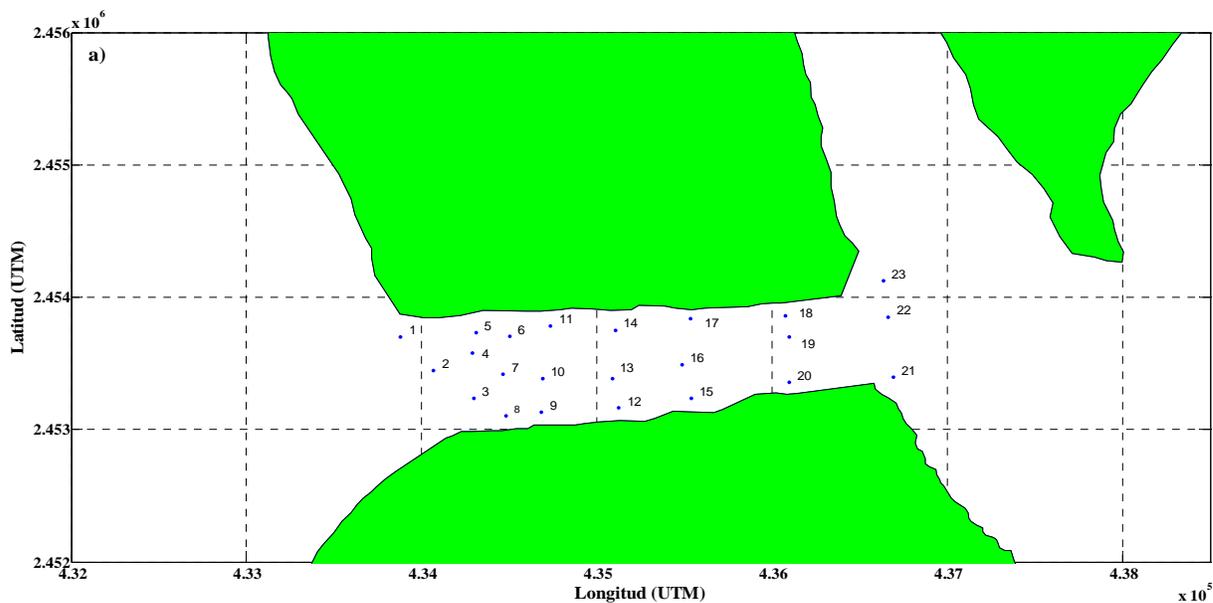


Figura 3-10.-Ubicación de los CTD divers durante la primera campaña.

Durante la segunda campaña realizada en agosto de 2013 y con base en los resultados de la campaña anterior, se realizaron 224 lances con CTD SBE 19 en distintos puntos a lo largo del canal y en las comunicaciones con el mar y la laguna, como se muestra en la **Figura 3-11**. Para esta campaña no se instalaron CTD divers.



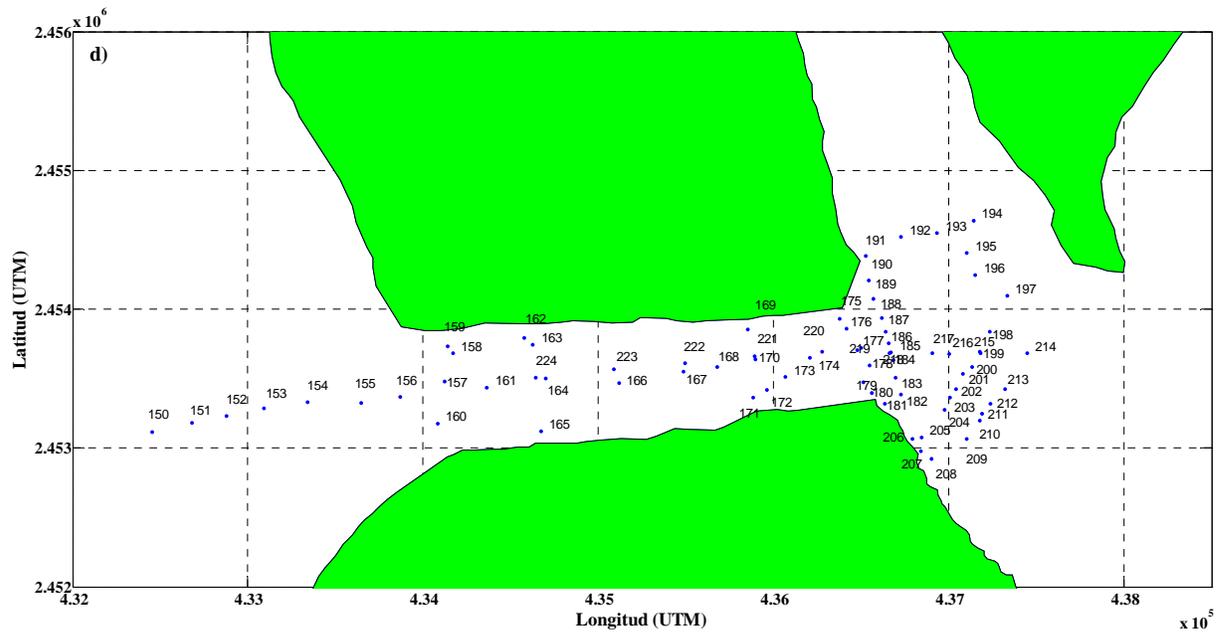


Figura 3-11.-Ubicación de los lances con CTD durante la segunda campaña: a) 16 de agosto, b) 17 de agosto, c) 19 de agosto, y d) 20 de agosto del 2013.

En el anexo A se muestra el número secuencial de los lances de CTD SBE 19, la ubicación, y la hora y fecha de inicio de cada lance.

Los datos generados en cada lance se almacenaron en la memoria interna del CTD SBE 19, lo cual generó un archivo por cada lance con los datos crudos. El primer tratamiento que se dio fue convertir los datos crudos con el software provisto por el fabricante Sea Bird Seasave V7, a valores de las variables medidas usando el archivo de configuración que contiene la información de las constantes de calibración. El tratamiento incluyó tanto datos provenientes del descenso como del ascenso del CTD SBE 19. Debido al diferente tiempo de respuesta de los sensores y la posición de éstos dentro del CTD SBE 19 se presentó un desfase en las mediciones de temperatura, por lo que fue necesario ajustar dichos datos 0.5 s. En seguida, a partir de los datos de los sensores se calcularon variables secundarias, las cuales son salinidad (ups), densidad (sigma - theta) y profundidad (m). Por último se realizaron promedios de los datos por bloques de profundidad, se seleccionó una profundidad 0.30 m y se separaron los lances de bajada y de subida, aunque para el análisis se tomaron los datos de subida para eliminar el error que se pueda obtener por los segundos de encendido y el posterior descenso al agua.

Para los datos generados por los CTD divers, el primer tratamiento consistió en recuperarlos de su memoria interna utilizando el software provisto por el fabricante Diver – Office de SWS y de ahí exportarlos con formato ASCII, en seguida se les aplicó un filtro promedio corrido, y después fueron analizados mediante técnicas estadísticas convencionales.

Previo a la construcción de los mapas verticales de salinidad, temperatura y densidad, a partir de los datos de generados con los lances del CTD SBE 19, se definieron los transectos a lo largo de los cuales se analizaría la variación espacial de estos parámetros. Para la primera campaña se definieron dos transectos, T1 y T2, a fin de evaluar la penetración de la marea a lo largo del canal de Cuautla y al interior del sistema lagunar. En la **Figura 3-12** se muestra la localización de los transectos T1 y T2 en el campo.

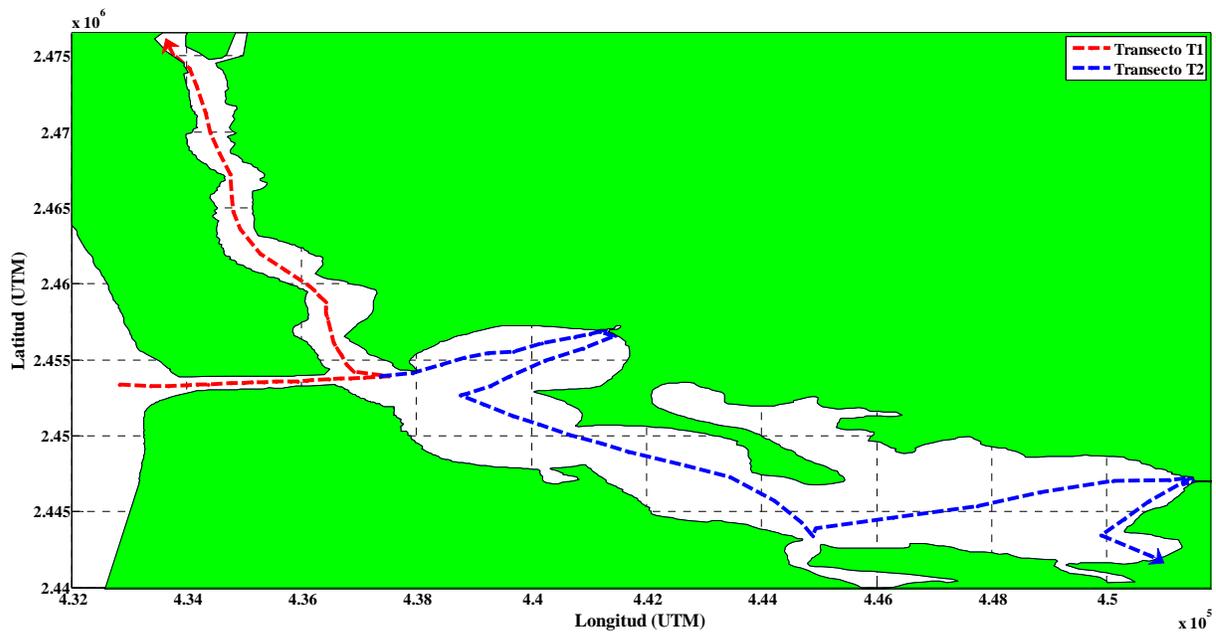


Figura 3-12.-Localización de los transectos T1 y T2 en el campo.

Para la segunda campaña, con el propósito de examinar más a detalle el comportamiento de la salinidad, temperatura y densidad del agua al interior del canal de Cuautla se definieron 6 transectos, T3, T4, T5, T6, T7 y T8, a lo largo del canal de Cuautla y en algunas de sus secciones transversales. En la **Figura 3-13** se muestra la localización de los transectos T3, T4, T5, T6, T7 y T8 en el campo.

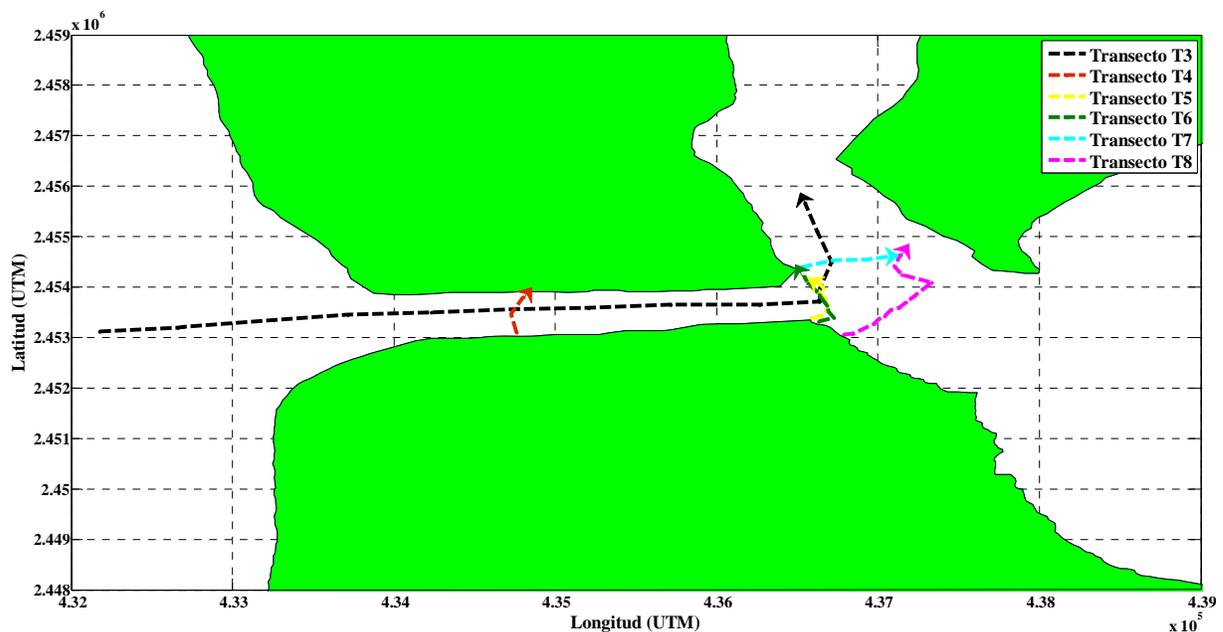


Figura 3-13.-Localización de los transectos T3, T4, T5, T6, T7 y T8 en el campo.

La **Figura 3-14** muestra la distribución a lo largo del transecto T1, que atraviesa el canal y el estero de Cuautla. En esta figura se puede observar que las mayores concentraciones de salinidad se ubicaron a lo largo del canal, obviamente por influencia del mar. Así mismo, es posible observar, al norte del estero, la presencia de agua salobre debido a la mezcla con agua dulce proveniente del río

Acaponeta. Respecto a la temperatura, la variación fue de apenas 2 grados, siendo más cálidas las aguas provenientes del mar. En cuanto a la densidad, se puede observar que está más íntimamente ligada a los cambios de salinidad que a los de temperatura.

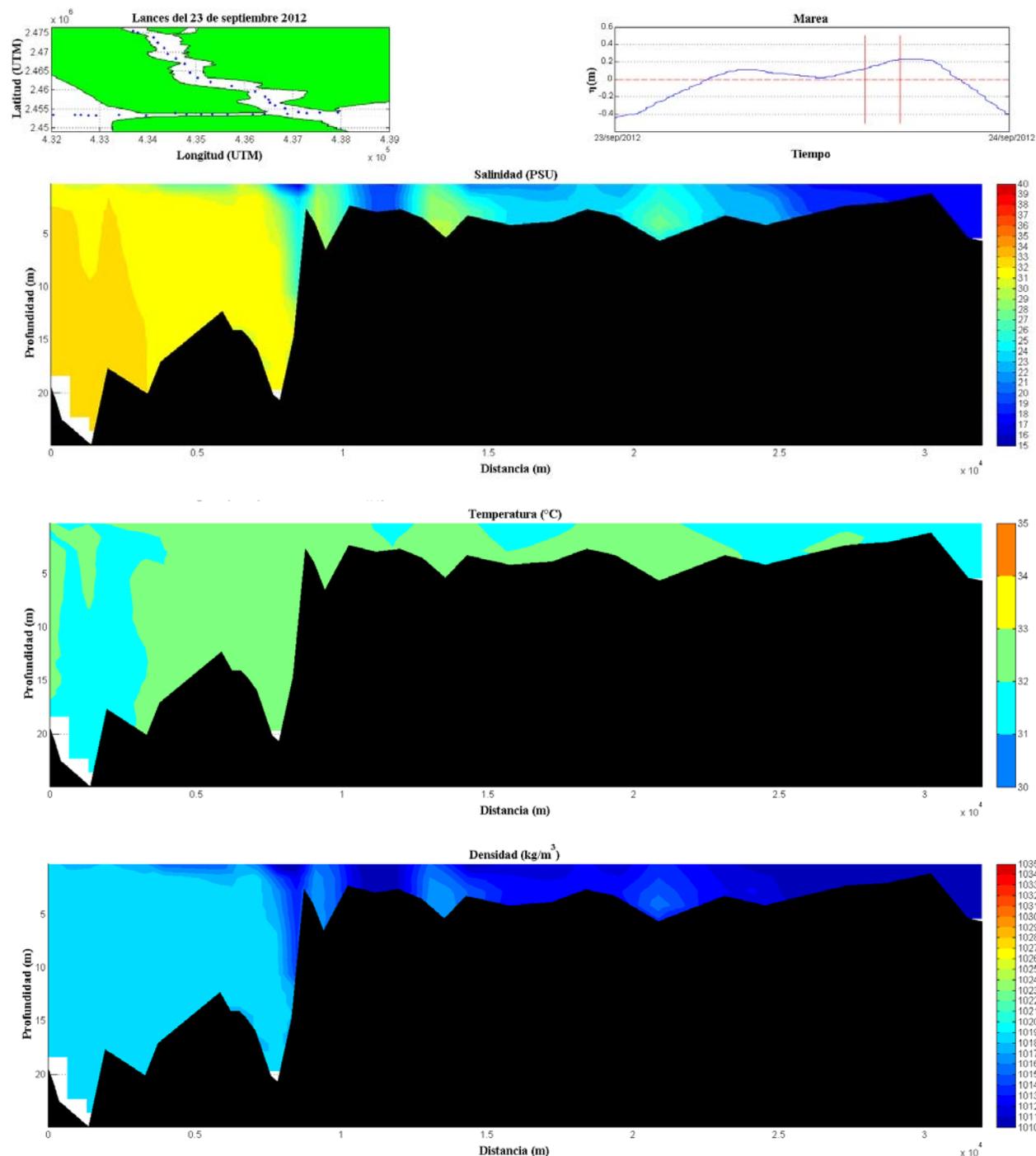


Figura 3-14.-Mapa de distribución vertical del transecto T1.

En la **Figura 3-15** se muestra la distribución a lo largo del transecto T2 que recorre el canal de Cuautla y la laguna de Agua Brava. En esta figura, si se compara con la figura anterior, se puede observar un comportamiento espacial similar, es decir, salinidades altas en el canal, del orden de

los 33 ups, y bajas, del orden de los 15 ups en la parte distal de los transectos, y salinidades diferentes al centro que indican mezcla de las masas de agua; la variación de la temperatura en ambos casos fue de apenas 2 grados, siendo más cálidas las aguas provenientes del mar; y en cuanto a la densidad, en ambos casos se observó que está más íntimamente ligada a los cambios de salinidad que a los de temperatura.

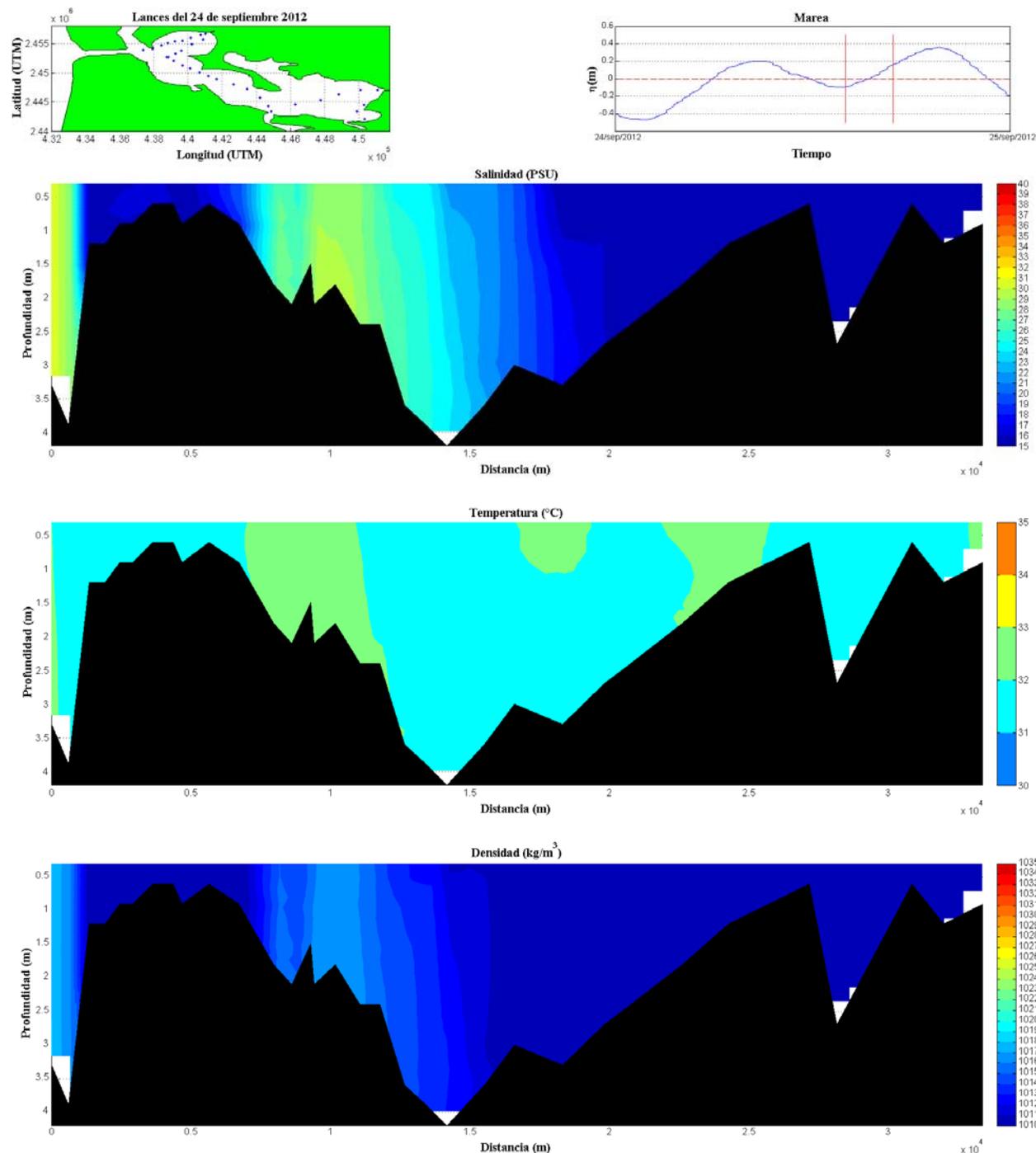


Figura 3-15.-Mapa de distribución vertical del transecto T2.

La **Figura 3-16** presenta la distribución vertical correspondiente al transecto T3 que durante la fase de reflujó de marea atraviesa el canal de Cuautla desde el oeste hasta el este y luego hacia el norte

introduciéndose un poco al estero de Cuautla. En este transecto se puede apreciar una estratificación de salinidad, temperatura y densidad a lo largo del canal, además a una distancia de 5000 m se puede apreciar valores de estos parámetros que indican una posible circulación de una masa de agua salobre en dirección hacia el canal.

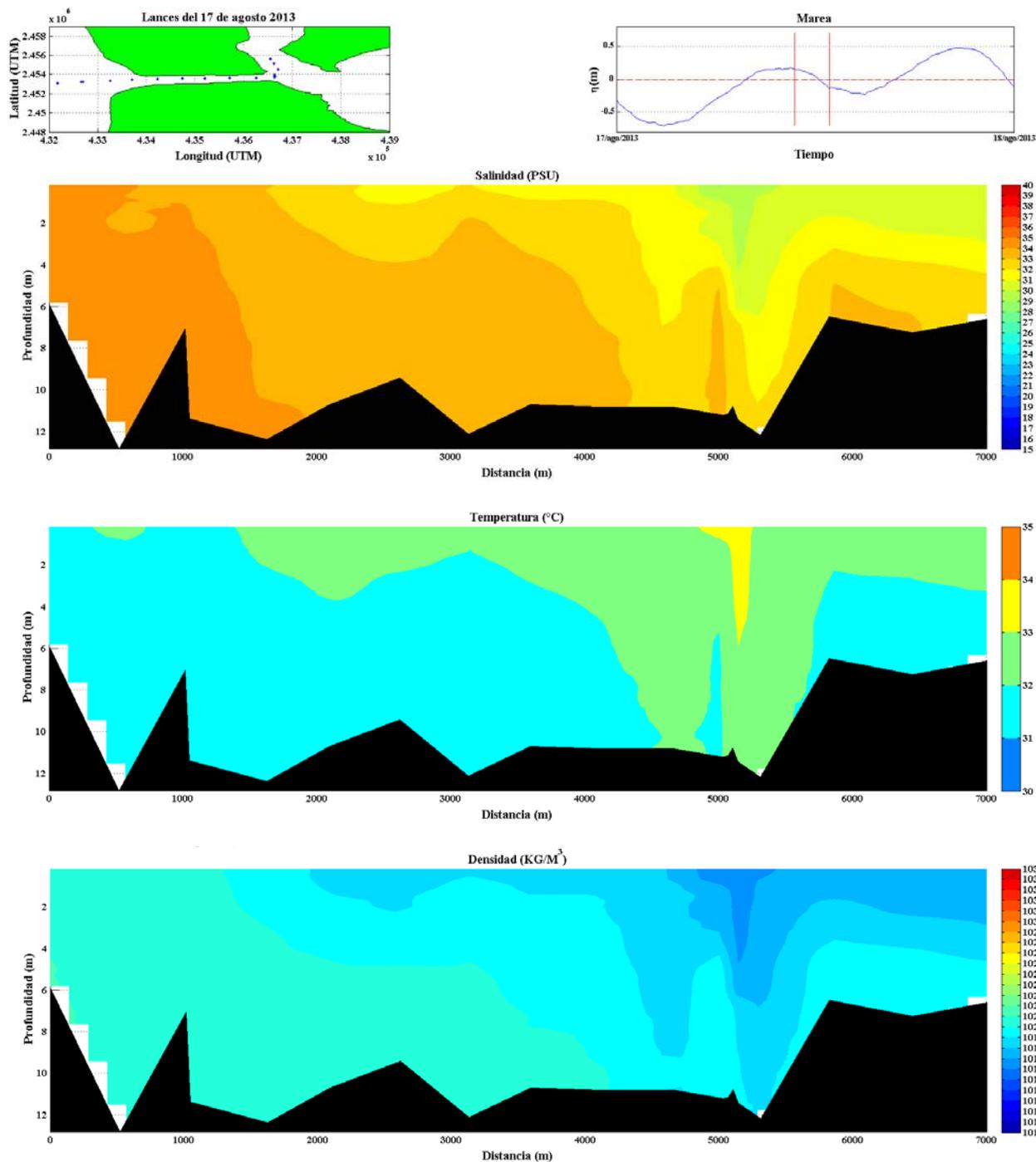


Figura 3-16.-Mapa de distribución vertical del transecto T3.

La distribución vertical correspondiente al transecto T4 se presenta en la **Figura 3-17**. En este transecto que corta transversalmente al canal de Cuautla de sur a norte, es posible identificar de

forma sutil una masa de agua salobre en la margen sur del canal. Esto se debe a la influencia de un aporte de agua dulce que se mezcla con las masas de agua salobre al interior del sistema lagunar, que es expulsada hacia el mar por efecto del reflujo de la marea.

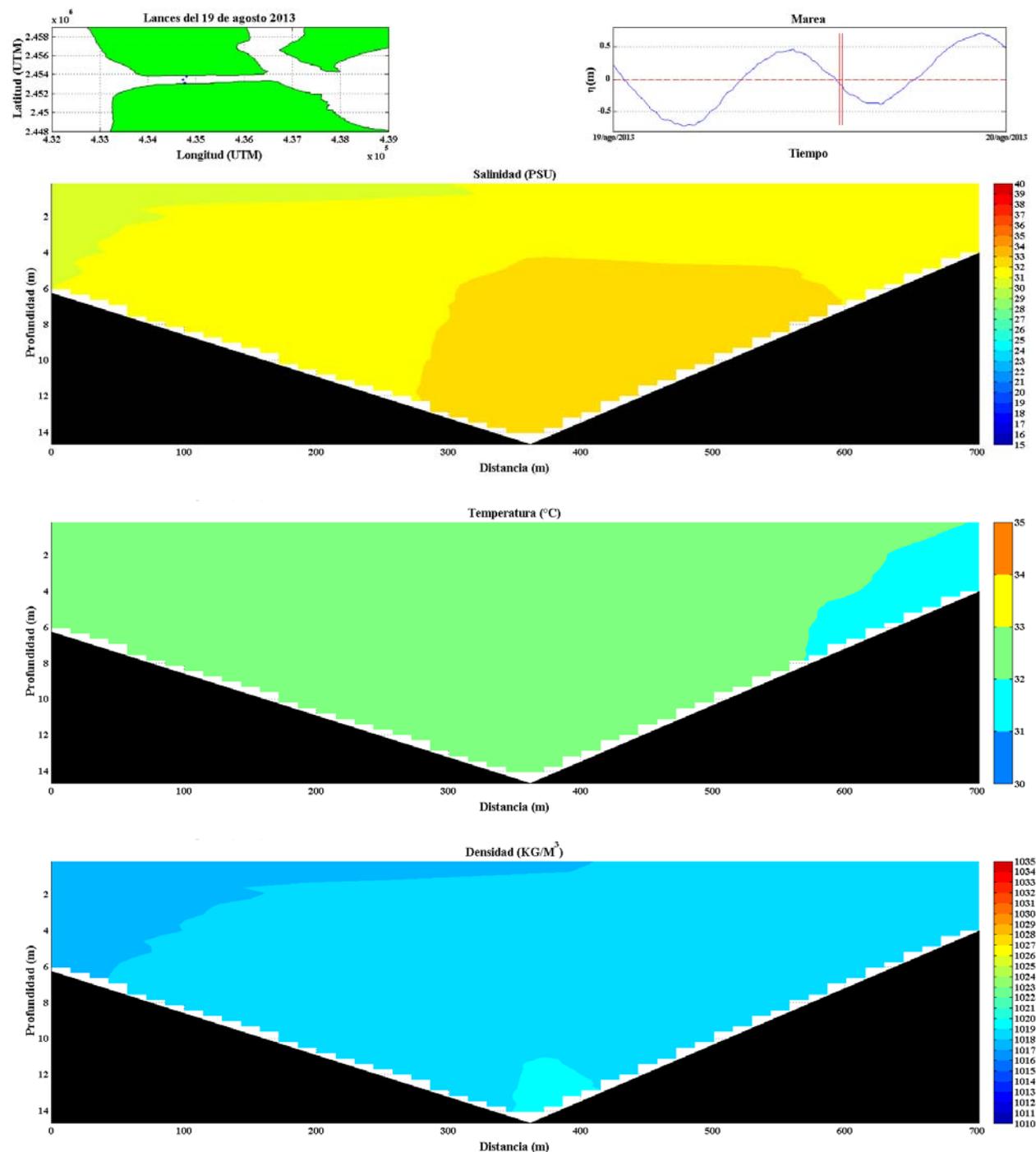


Figura 3-17.- Mapa de distribución vertical del transecto T4.

En la **Figura 3-18** se muestra la distribución vertical del transecto T5. Este transecto sigue una trayectoria de sur a norte, y en ella se puede observar las masas de agua en dirección hacia el canal de Cuautla provenientes del estero de Cuautla y la laguna de Agua Brava. En las figuras resalta una

masa de agua salobre más cálida que el resto de las demás, proveniente del este de la laguna de Agua Brava. La diferencia en la temperatura de esta masa de agua se deba, tal vez, a la poca profundidad de esta parte de la laguna y al hecho de que permanece más tiempo el agua estancada.

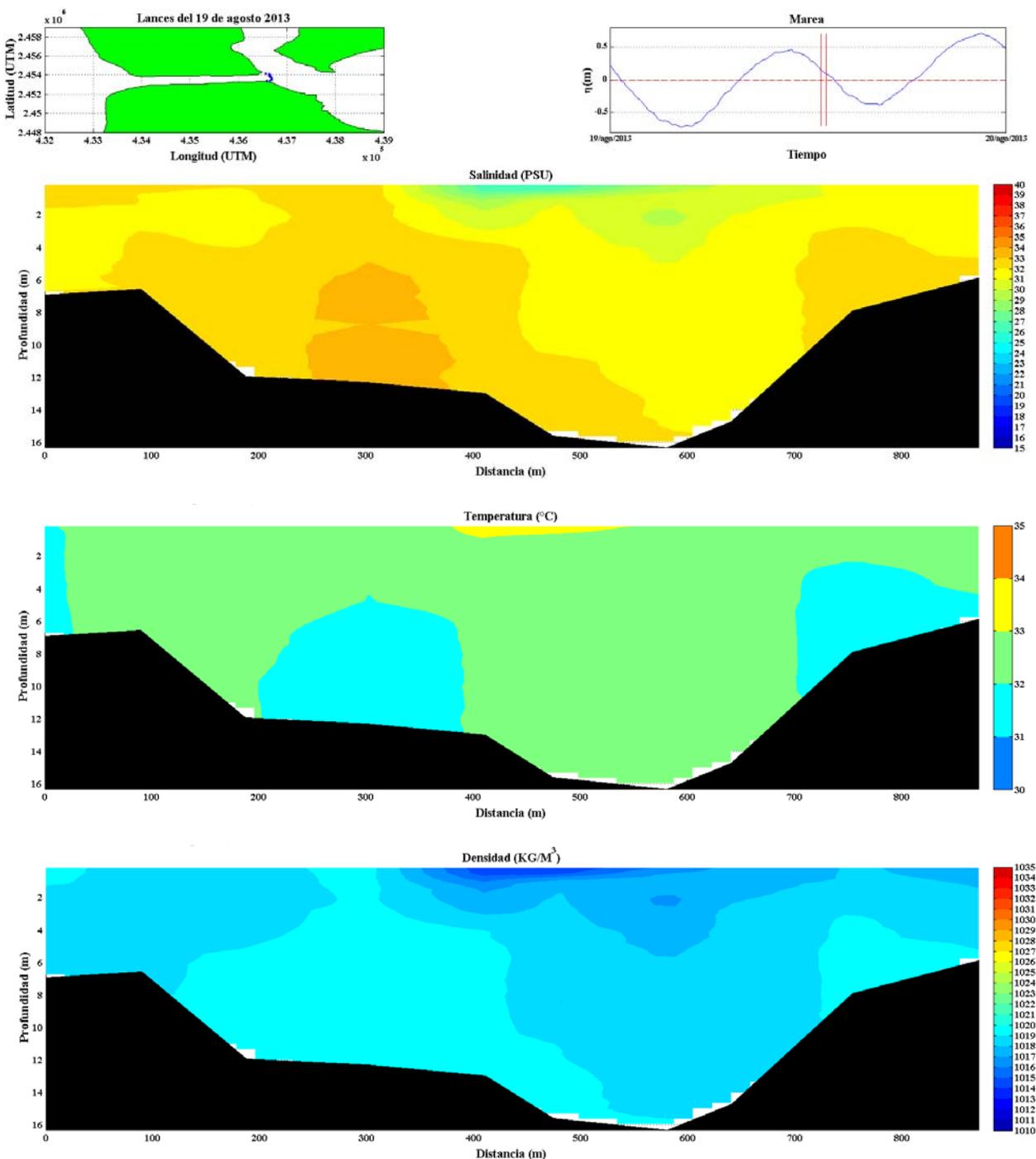


Figura 3-18.-Mapa de distribución vertical del transecto T5.

La **Figura 3-19** muestra la distribución vertical del transecto T6. Este transecto sigue una trayectoria de sur a norte, similar al transecto T5, sin embargo en ella se puede observar la masa de agua en dirección hacia sistema lagunar proveniente del mar que se introduce a través del canal de

Cuautla. La distribución que presenta este transecto indica una homogeneidad en la temperatura y densidad, sin embargo, en la salinidad se puede observar la presencia de tres masas de agua con predominancia de agua de agua salada en la mezcla.

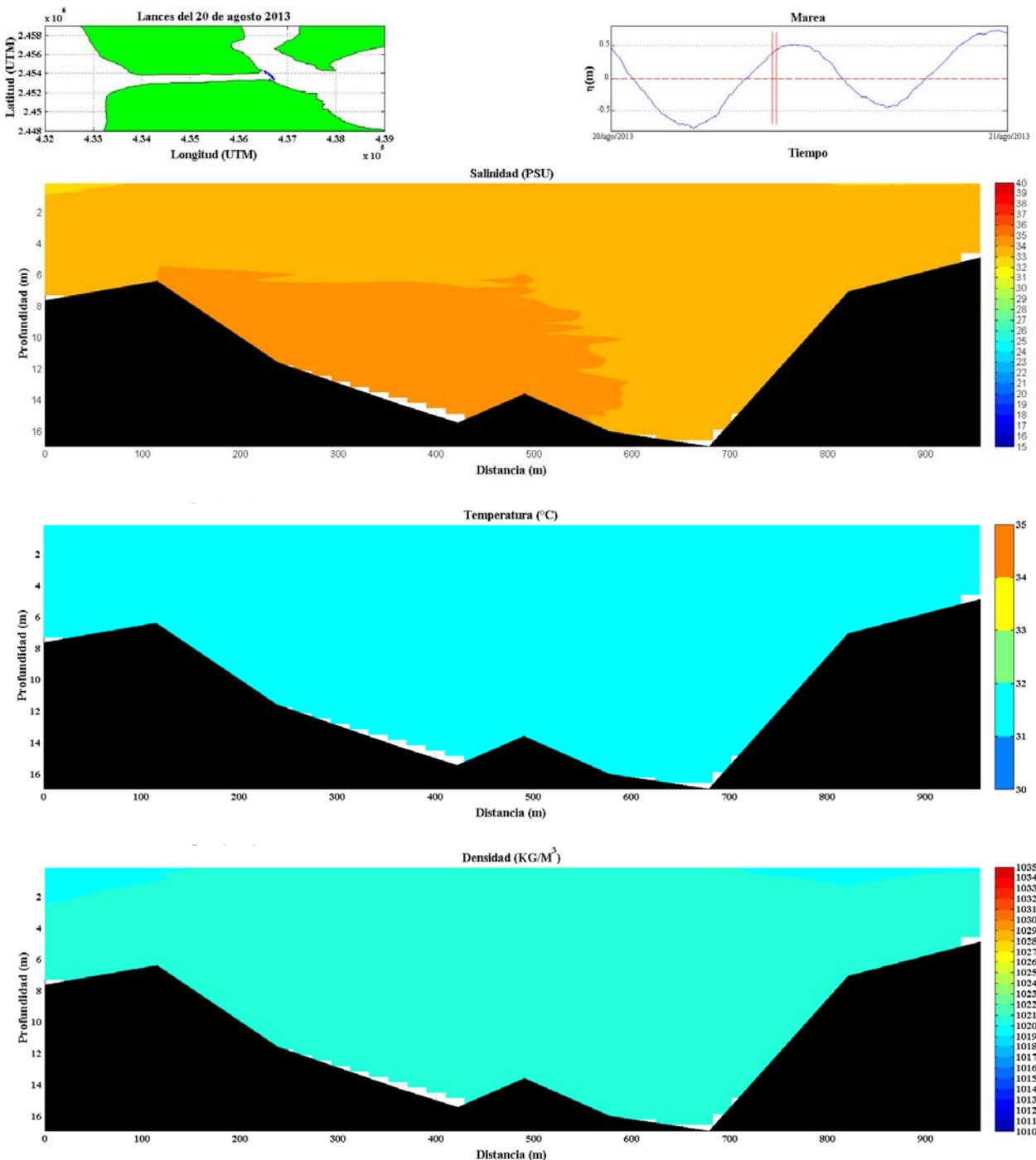


Figura 3-19.-Mapa de distribución vertical del transecto T6.

La distribución vertical correspondiente al transecto T7 se presenta en la **Figura 3-20**. En este transecto ubicado en las inmediaciones del canal con el estero de Cuautla y que sigue una trayectoria de oeste a este, es posible observar más a detalle la variación de los parámetros del agua

que viaja hacia el norte durante el flujo de marea. Se observa que la mayor parte del transecto refleja una homogeneidad para los tres parámetros a lo largo de la columna de agua, a excepción de la parte oeste del transecto que se observa en la superficie una masa de agua que contienen menor cantidad de sal, lo que probablemente resulta de un pequeño aporte de agua dulce.

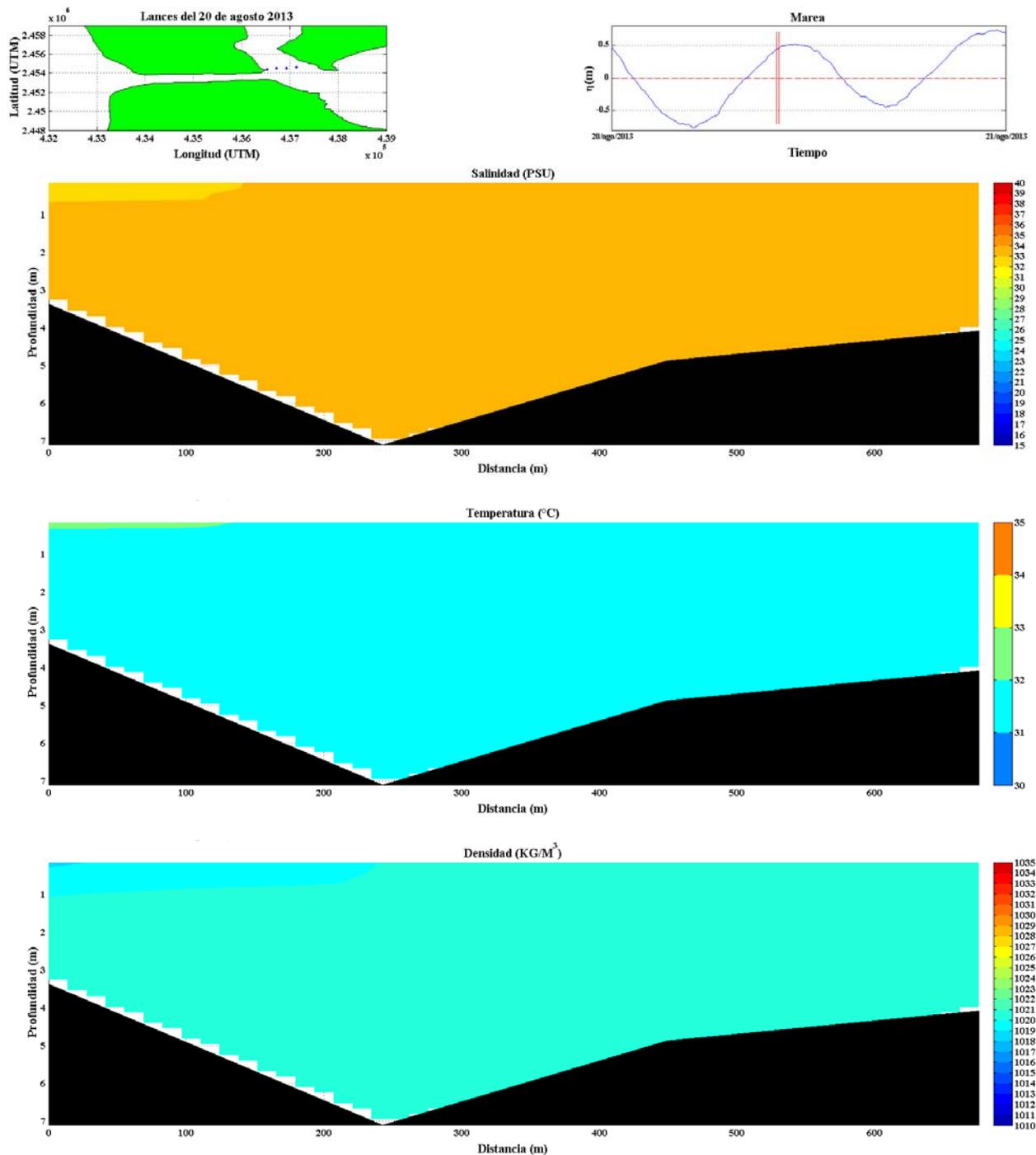


Figura 3-20.-Mapa de distribución vertical del transecto T7.

Por último, en la **Figura 3-21** se muestra la distribución vertical del transecto T8. En este transecto se puede observar la variación de los parámetros del agua que viaja en dirección hacia la laguna

durante el flujo de marea. Está ubicado en las inmediaciones del canal de Cuautla con la laguna de Agua Brava, y sigue una trayectoria de sur a norte. La distribución en este transecto refleja una homogeneidad en la temperatura, y una variación en los parámetros de salinidad y densidad, debido a la influencia de agua salobre al interior de la laguna.

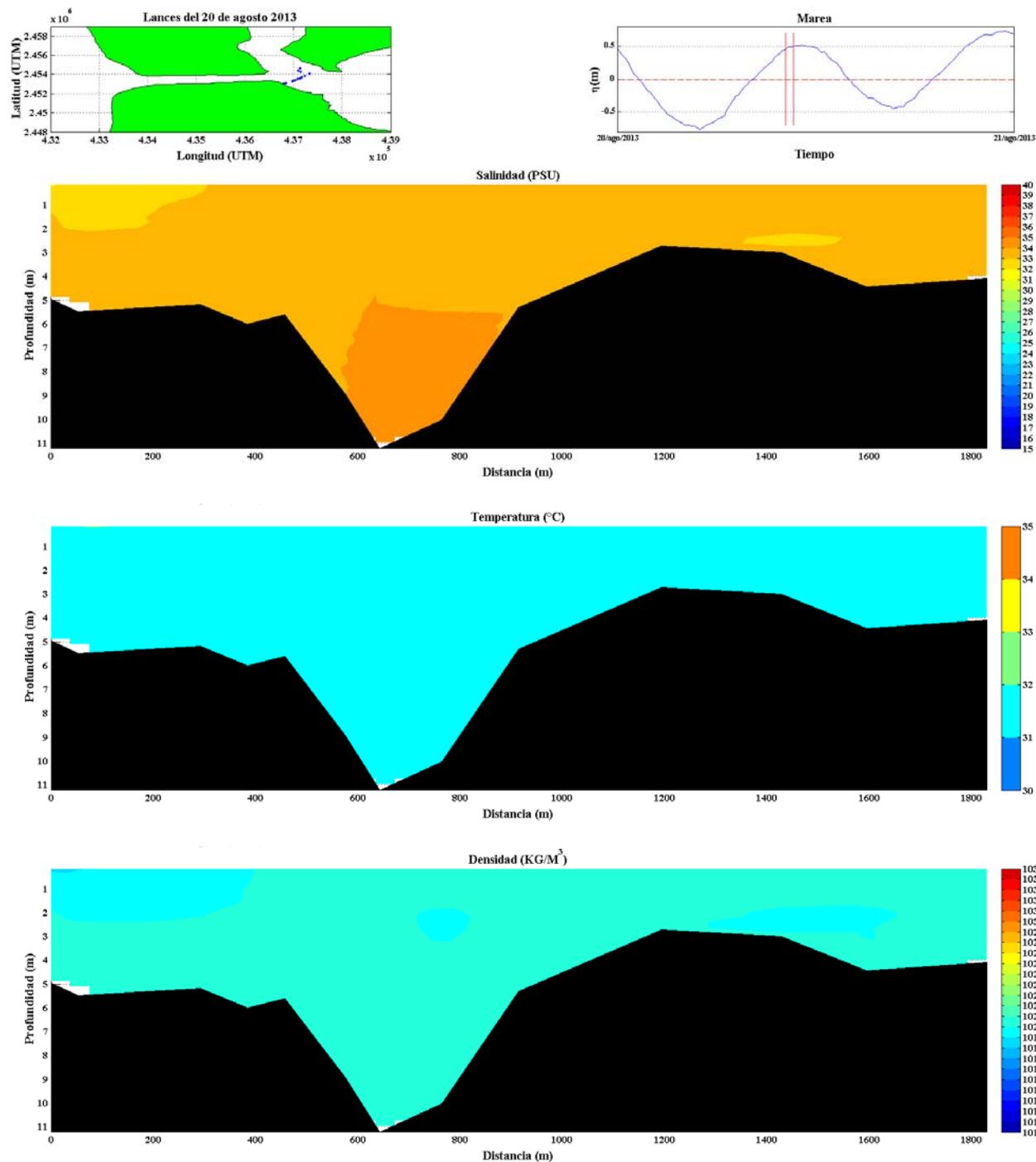


Figura 3-21.-Mapa de distribución vertical del transecto T8.

Con el objeto de observar la variación de estos parámetros con el tiempo en un punto de la columna de agua, se representan gráficamente los valores registrados con los CTD divers, tal y como se

muestran en las **Figura 3-22** y **Figura 3-23**. Se puede apreciar que el CTD diver 1 instalado al oeste del canal registro mayor variación en la salinidad y temperatura, valores altos durante el flujo de marea y bajos durante el reflujos de marea, mientras que el CTD diver 4 instalado al norte cerca del puente de Novillero registró poca variación en ambos parámetros.

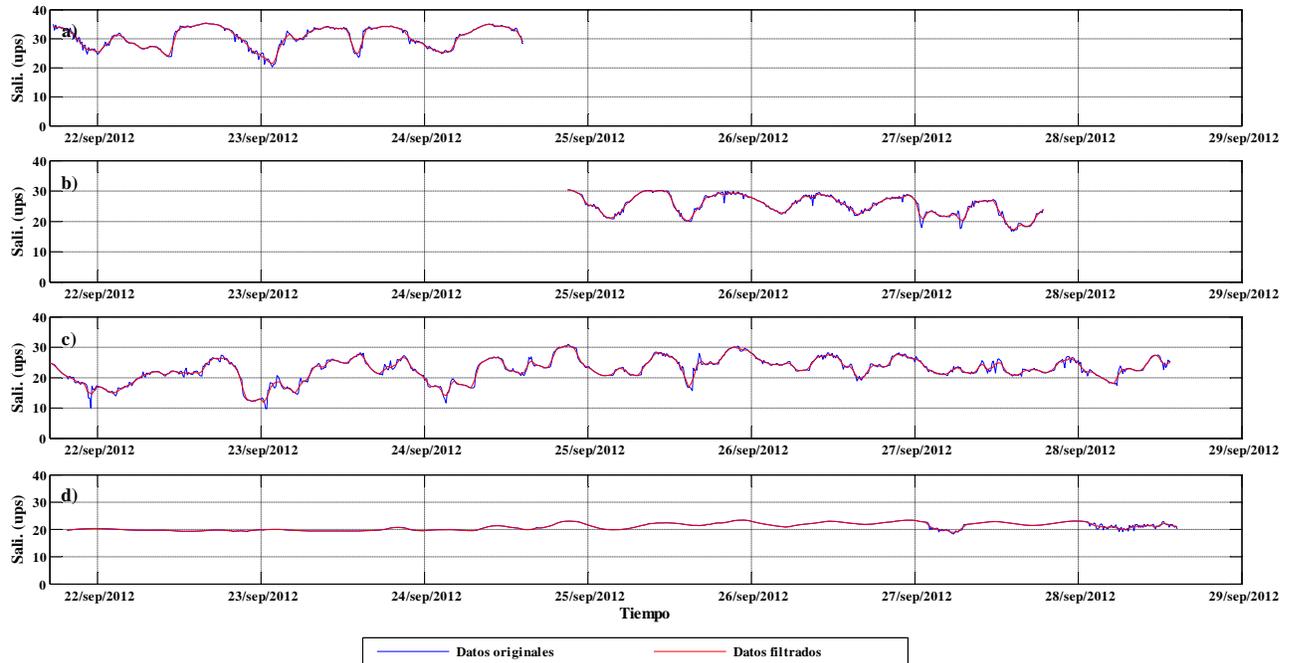


Figura 3-22.-Variación de la salinidad del agua: a)CTD diver 1, b)CTD diver 2, c)CTD diver 3 y d)CTD diver4.

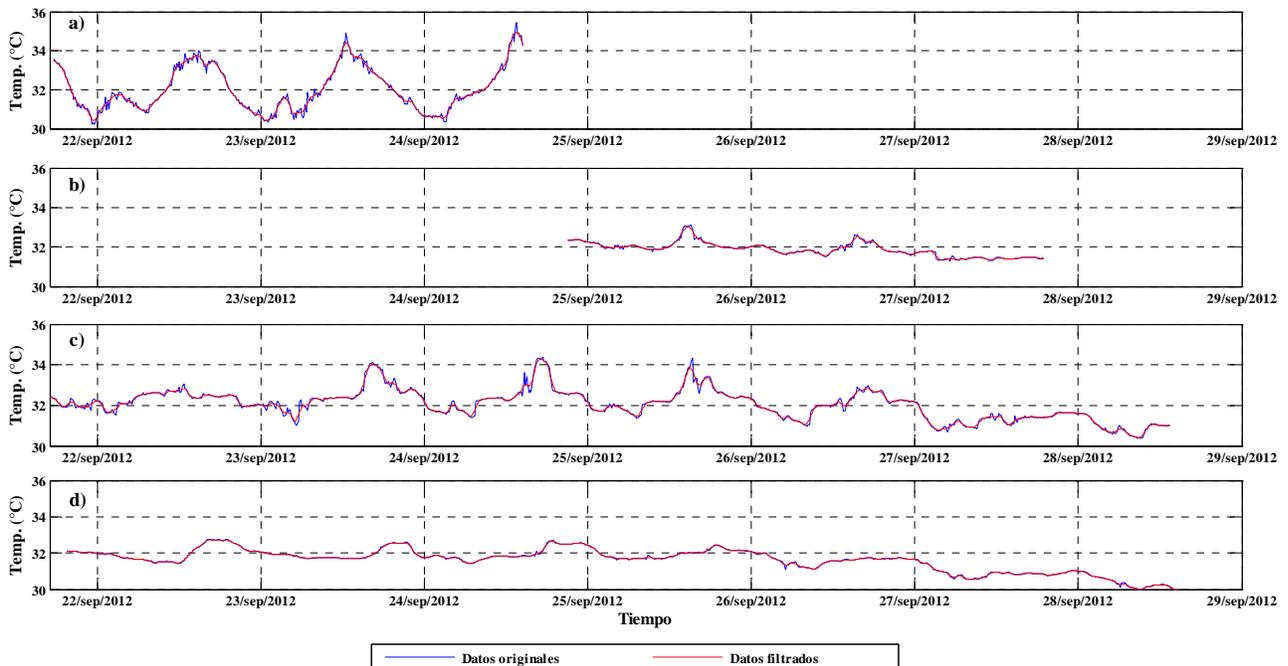


Figura 3-23.-Variación de la temperatura del agua: a) CTD diver 1, b) CTD diver 2, c) CTD diver 3 y d) CTD diver 4.

En la **Tabla 3-1** se presentan los resultados del análisis estadístico convencional aplicado a los datos obtenidos con los CTD divers.

Tabla 3-1.-Resultados del análisis estadístico de datos filtrados de temperatura y salinidad.

Parámetro Estadísticos	CTD diver 1		CTD diver 2		CTD diver 3		CTD diver 4	
	Temperatura (°C)	salinidad (ups)						
Media	32.03	30.50	31.88	25.34	32.05	22.68	31.62	21.00
Desv. Est.	1.12	3.52	0.35	3.26	0.71	3.66	0.62	1.27
C. V.	0.03	0.12	0.01	0.13	0.02	0.16	0.02	0.06
Mediana	31.73	31.20	31.89	25.88	32.08	22.82	31.72	20.89
Mínima	30.42	21.47	31.34	17.30	30.41	11.90	29.95	18.87
Maxima	34.93	35.31	33.06	30.39	34.29	30.47	32.74	23.42

La estadística muestra que la temperatura promedio registrada en las estaciones fue muy alta y similar entre ellas, aunque con intervalos de variación diferentes. La salinidad promedio fue muy diferente de una estación a otra, aunque se encontró mayor salinidad en el mar que al interior del sistema. Esto indica la entrada significativa de agua dulce y una buena circulación de agua.

3.5 MUESTREO DE SEDIMENTOS

Durante la primera campaña de campo se tomaron 10 muestras de sedimento a lo largo del canal de Cuautla, las cuales se extrajeron de manera superficial. Cada muestra pesaba 2 kg aproximadamente y fueron almacenadas en bolsas ziploc, y protegidas en botes de plástico hasta su traslado al laboratorio. Cada muestra se rotuló con un código que contenía una clave de identificación y las coordenadas de su ubicación. En la **Figura 3-24.-Ubicación** de los sitios de muestreo del sedimento. se muestra la ubicación de los sitios de muestreo.

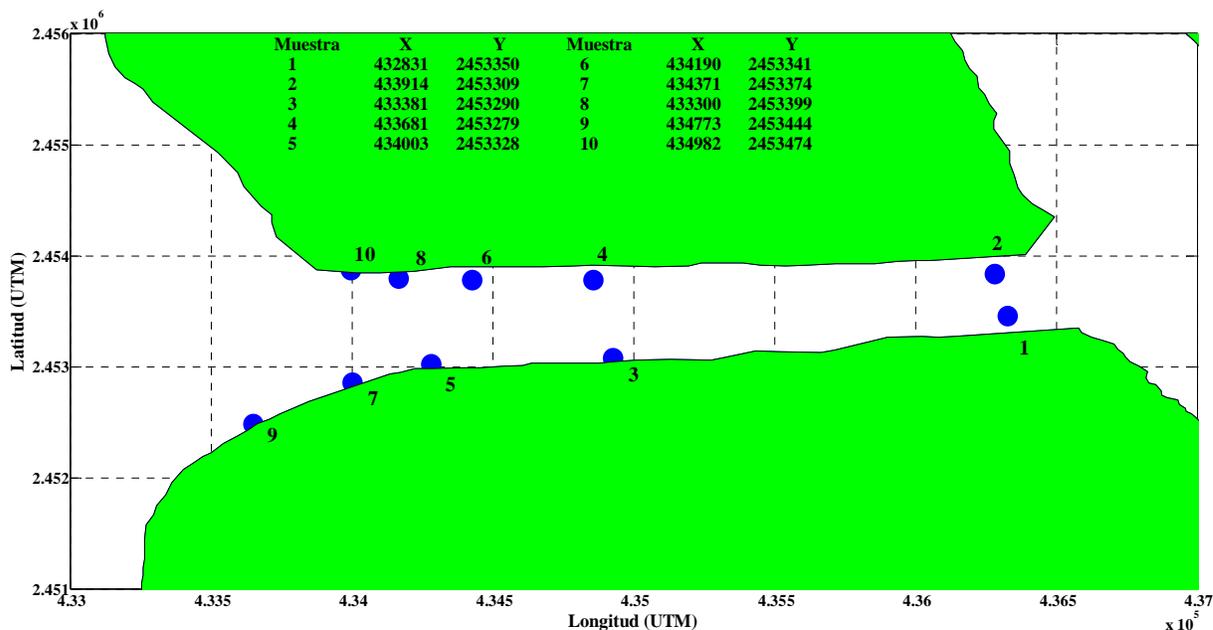


Figura 3-24.-Ubicación de los sitios de muestreo del sedimento.

Una vez que las muestras fueron trasladadas al laboratorio, se procedió a lavar y secar cada muestra antes de ser analizadas. Posteriormente se analizaron las características de las muestras, tales como densidad, tamaño, forma, velocidad de caída, ángulo de reposo y distribución de los tamaños de las

partículas de sedimento. Los métodos y técnicas con que se analizaron las muestras se explican en el anexo B. Para la segunda campaña no se tomaron muestras de sedimento.

En la **Tabla 3-2** se resumen los resultados del análisis de las muestras. En el anexo C se muestra a detalle los resultados del análisis de cada muestra de sedimento.

Tabla 3-2.- Densidad, velocidad de caída, forma, tamaño medio del sedimento, contenido de arena y finos, clasificación en base a su desviación estándar, asimetría y curtosis, y caracterización de los sedimentos en base al tamaño medio.

Nº	ρ (kg/m ³)	W_f (cm/s)	Forma	D_{50} (mm)	Arena (%)	Finos (%)	Clasificación			Tipo de sedimento	
							Desviación estándar	Sesgo	Curtosis	Wentworth	ASTM
1	2,580	0.86	subredondeada	0.119	93.01	6.99	Moderadamente clasificada	Casi simétrica	Mesocurtico	Arena muy fina	Arena fina
2	2,650	2.16	subredondeada	0.144	94.44	5.56	Moderadamente clasificada	Asimétrica hacia gruesos	Mesocurtico	Arena fina	Arena fina
3	2,550	1.85	subredondeada	0.212	98.06	1.94	Moderadamente bien clasificada	Asimétrica hacia gruesos	Mesocurtico	Arena fina	Arena fina
4	2,600	1.05	subredondeada	0.140	94.52	5.48	Moderadamente clasificada	Casi simétrica	Mesocurtico	Arena fina	Arena fina
5	2,520	0.96	subredondeada	0.144	95.19	4.81	Moderadamente clasificada	Casi simétrica	Mesocurtico	Arena fina	Arena fina
6	2,400	1.54	subredondeada	0.185	97.13	2.87	Bien clasificada	Casi simétrica	Mesocurtico	Arena fina	Arena fina
7	2,500	1.16	subredondeada	0.156	99.06	0.94	Moderadamente clasificada	Muy asimétrico hacia finos	Leptocurtico	Arena fina	Arena fina
8	2,410	1.37	subredondeada	0.168	99.83	0.17	Moderadamente clasificada	Muy asimétrico hacia finos	Platicurtico	Arena fina	Arena fina
9	2,550	2.46	subredondeada	0.262	99.93	0.07	Moderadamente bien clasificada	Muy asimétrico hacia finos	Platicurtico	Arena media	Arena fina
10	2,460	0.97	subredondeada	0.134	97.76	2.24	Mal clasificada	Muy asimétrico hacia fino	Leptocurtico	Arena fina	Arena fina

Las muestras, con base en el tamaño medio del sedimento, son caracterizadas como arena media a muy fina las mismas que contienen de 99.93 a 93.01 % de arena y 0.07 a 6.99 % de finos. La homogeneidad de las partículas tiene índice de 0.45 a 1.08 phi que las ubica de bien clasificada a mal clasificada. Según su sesgo se ubican como asimétricas hacia los gruesos a muy asimétrica hacia finos, con coeficientes entre -0.14 a 0.54 phi. La curtosis de las muestras fluctúan entre 0.82 a 1.27 phi y es clasificada como platicúrtico, mesocúrtico y leptocúrtico.

Además se observó que todas las muestras presentaron valores menores a 1 mm, aunque en todas las muestras, excepto 3 y 6, se observó que casi la totalidad de las partículas quedaron comprendidos con valores entre los 0.280 y 0.080 mm, esto refleja que la graduación es moderada en general y que corresponde con la clasificación de moderadamente clasificada. Asimismo se observó una cantidad promedio de 3.11 % de finos y por lo tanto se puede considerar moderada. Por otra parte, en las muestras 3 y 6 se observó que un porcentaje elevado de los sedimentos se situó en la fracción entre los 0.320 y 0.100 mm, y una cantidad despreciable de sedimento fino menor al 3% , lo que muestra una mayor graduación que el resto de las muestras. Por último, en la

Figura 3-25 se muestra la curva granulométrica representativa del conjunto de las muestras analizadas, y en el anexo D se presenta el desarrollo del cálculo para su obtención. Se determinó que la distribución de tamaños de las partículas tiende a seguir un modelo del tipo log – normal de probabilidades, es decir, que los logaritmos de los tamaños se disponen según una distribución normal o gaussiana de probabilidades, que se describe mediante la ecuación $D_n = 0.158(1.719)^{Z_n}$. Corresponde a sedimentos moderadamente clasificados, casi simétricos y mesocurtico.

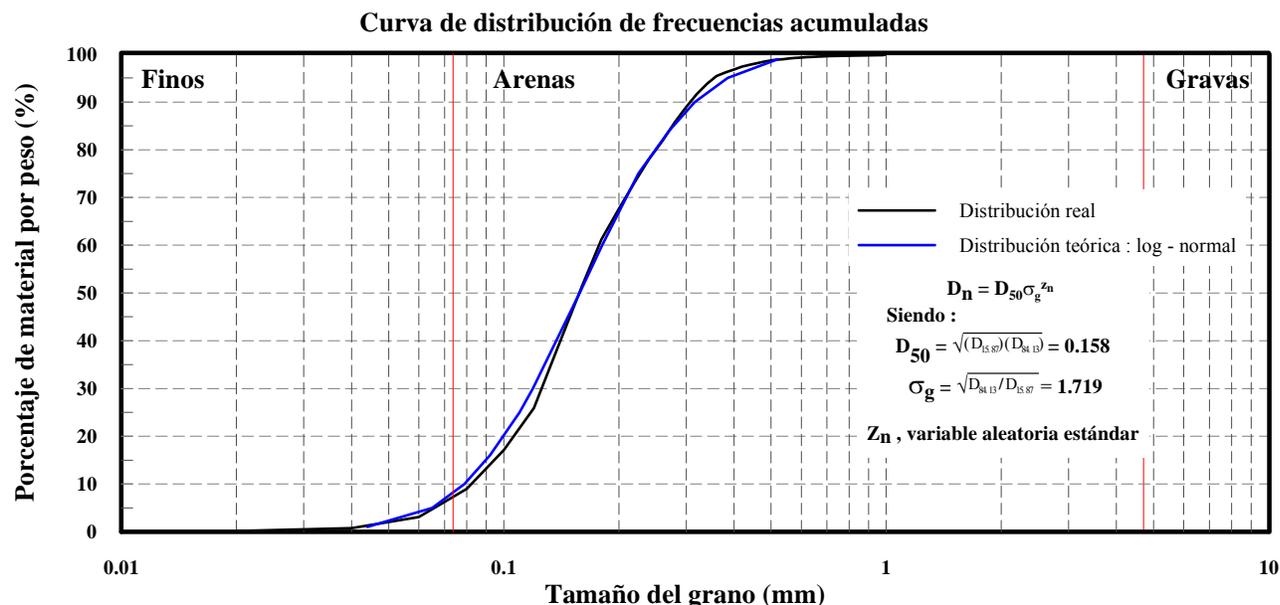


Figura 3-25.-Comparación entre la granulometría real y la distribución teórica de tamaños.

3.6 DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que la circulación así como la variación de las condiciones termohalinas del agua al interior del subsistema de Cuautla apareció principalmente modulada por los forzamientos de la marea a través del canal de Cuautla, y la descarga de los ríos. La salinidad del agua al interior del subsistema resultó ser menor que la del Océano durante todo el tiempo de las mediciones, lo que refleja que el volumen de agua que ingresó de los ríos, corrientes alternas y la precipitación fue mayor que la que se perdió por evaporación. El agua con mayor salinidad y temperatura se observó en el canal y sus alrededores, aunque se notó la presencia de una corriente superficial de agua menos salada en la margen sur del canal de Cuautla tanto en flujo como reflujos de marea. Además se observó que las condiciones de termohalinas del agua se mostraron bastantes uniformes en la vertical en la mayor parte del subsistema, por lo que la representación 2D de la distribución de las condiciones termohalinas es suficiente para la descripción de las propiedades promedios. Aunque cabe mencionar que los resultados que se abordan en este estudio corresponden a época de lluvias, por lo que es de esperarse que en época de secas cuando los ríos aporte menos agua al subsistema las condiciones al interior serán más salinas, y se podrá observar una mayor penetración del agua del mar.

Por otro lado, dado que la zona de estudio se encuentra en una planicie en donde los ríos Grande de Santiago y Baluarte descargan directo al mar mediante deltas marinos, y controlan la mayor parte del aporte sedimentario grueso responsable de la dinámica depositaria de playa vía deriva litoral, y soportan la función de protección litoral; mientras el resto descarga al mar indirectamente mediante

deltas lacustres, que controlan la mayor parte del aporte sedimentario medio y fino garante del transporte y deposición aluvial y estuarina, y cargan en gran medida con las funciones de mantenimiento del hábitat y de productividad ecológica (Blanco et al., 2011). Debido a este hecho, se puede establecer que el material muestreado a lo largo del canal de Cuautla, así como el que constituye a las playas en la zona, es predominantemente granular de origen terrígeno, y que las playas adyacentes al canal de Cuautla y a la boca de Teacapán están constituidas por sedimentos de granulometría más fina que las de las playas más cercas a la desembocadura de los ríos Grande de Santiago y Baluarte.

Por último, haciendo uso de las mediciones de velocidad, de los mapas de distribución de las propiedades termo – salinas del agua, de la distribución de los tamaños del sedimento a lo largo del canal como indicador sedimentológico para la determinación del transporte de sedimentos, y de las observaciones in situ se ha deducido un modelo conceptual de las corrientes principales y transporte de sedimento a lo largo del canal y áreas aledañas, como se muestra en la **Figura 3-26**, que establece la base para el diseño de una solución de ingeniería. En la **Figura 3-26a** las corrientes inducidas por los oleajes dominantes provenientes del primer cuadrante han provocado, a su vez, que las corrientes de flujo de marea sean capaces de arrastrar el sedimento de la playa en la margen norte e intentar introducirlo al interior de los cuerpos de agua, sin embargo, en la **Figura 3-26c** se puede observar que del sedimento arrastrado por estas corrientes solo una parte logra introducirse al interior de los cuerpos de agua, mientras que el resto del sedimento se queda a lo largo del canal, hasta que las corrientes de reflujos de marea, como se muestra en la **Figura 3-26b**, lo arrastran hacia el mar junto con el sedimento no consolidado del interior de los cuerpos de agua, como se ilustra en la **Figura 3-26d**.

Otro elemento importante a considerar es la presencia de los bancos de arena, que se han formado tanto en la parte hacia el mar del canal, como al interior de los cuerpos de agua. Estos bancos de arena están constituidos principalmente por el sedimento que ha sido removido a lo largo del canal como el de la playa en la margen norte del canal. En el caso de los bancos de arena de la parte hacia el mar del canal, estos se han formado como resultado del forzamiento de las corrientes asociadas al reflujos de marea que transportan sedimento hacia afuera del canal, el cual se deposita conforme las corrientes pierden potencia de arrastre, y a su vez, son modificados por las condiciones del oleaje incidente, su mantenimiento implica la existencia de un patrón de circulación a su alrededor que mantiene al sedimento en su posición actual. Estos bancos de arena funcionan como fuente de sedimento y como protección de la playa contra el efecto del oleaje incidente que llega a disiparse por medio de la refracción y ruptura a través de los bancos de arena. Ello podría explicar la acumulación de sedimento en la margen sur del canal, ya que cuenta con cierta protección, por lo que esta parte de la costa recibe un oleaje de menor energía que propicia el acomodo del sedimento, el cual proviene principalmente de la playa en la margen norte del canal. En cuanto a los bancos de arena al interior de los cuerpos de agua, estos se formaron por la depositación del sedimento transportado por las corrientes de flujo de marea, y la única diferencia entre ambos es que para estos últimos, la influencia del oleaje es menor.

Finalmente, una cuestión más que deben tomarse en cuenta son los oleajes de tormenta que pueden llegar a generar una corriente en sentido inverso al del oleaje normal, es decir en dirección sur – norte, y propiciar un acarreo de sedimento en la misma dirección hasta la desembocadura del canal.

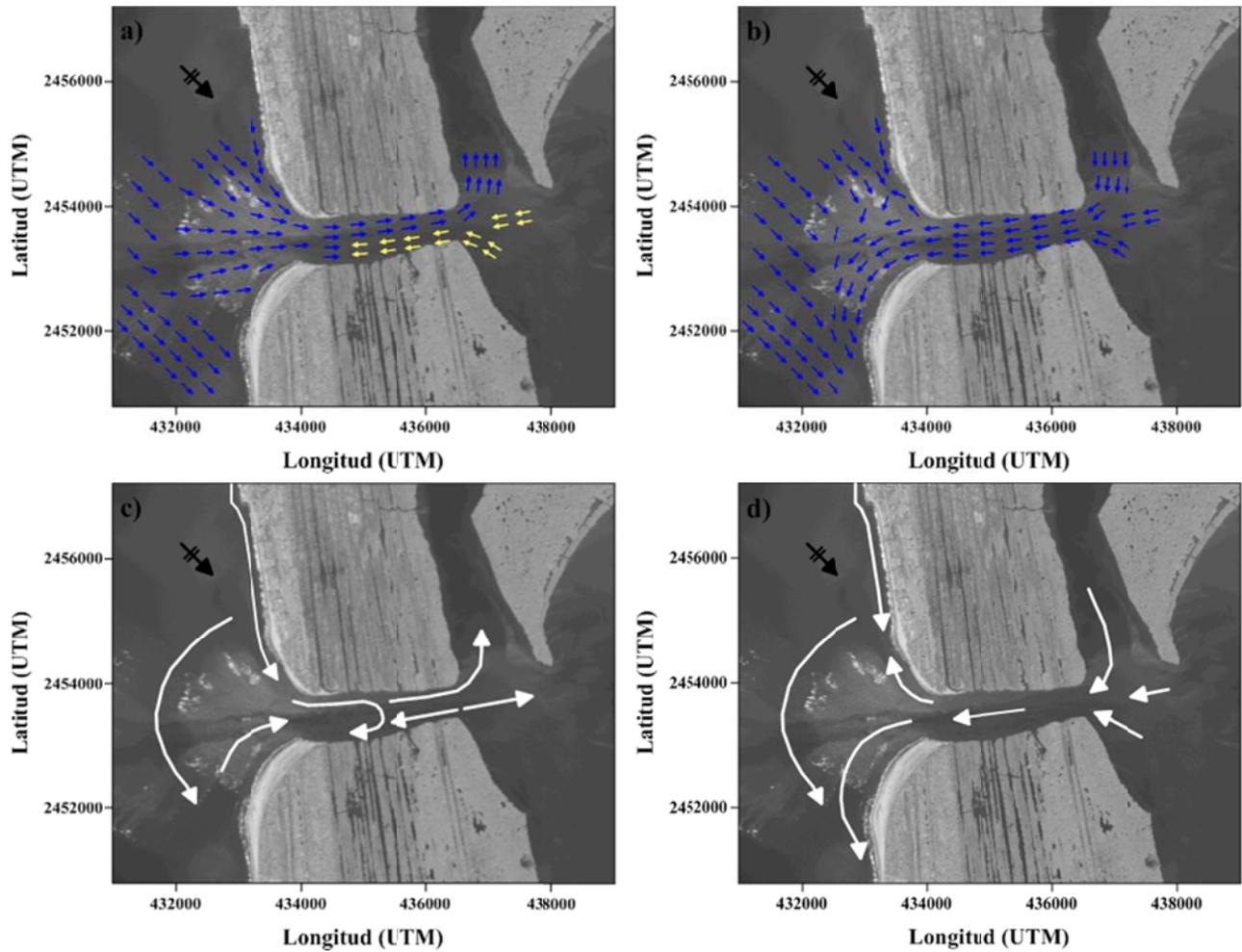


Figura 3-26.-Modelo conceptual de la dirección de las corrientes principales inducidos por el efecto de la marea y los oleajes dominantes, y el transporte de sedimento asociado a lo largo del canal y áreas aledañas: a) corrientes durante el flujo de marea, b) corrientes durante el refluo de marea, c) transporte de sedimento asociado a las a las corrientes de flujo, d) transporte de sedimento asociado a las corrientes de refluo.

CAPÍTULO 4

CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN, Y APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

4.1 INTRODUCCIÓN

En el estudio de problemas de Ingeniería Costera, ante la dificultad de realizar ensayos de laboratorio, así como el costo económico de llevar a cabo mediciones experimentales en campo, es necesario contar con herramientas numéricas con capacidad para modelar la dinámica de la zona de estudio, y que además, sirvan para pronosticar las afectaciones o impacto que puede provocar una futura actuación ingenieril, permitiendo la evaluación de diferentes escenarios hipotéticos. Todo ello a un costo temporal y económico relativamente bajo. Sin embargo, antes de la aplicación de cualquier modelo, se debe realizar un proceso adecuado de calibración y validación del mismo.

En este trabajo se utiliza el modelo bidimensional conocido como *HDunam*. Este modelo fue desarrollado originalmente por la Universidad de Cantabria con el nombre *H2D*, sin embargo, fue adaptado y modificado por el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM para acoplarlo al ambiente costero mexicano. Ha sido utilizado con éxito en diferentes zonas de estudio en México en las que las condiciones de los sistemas han sido bien reproducidas.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Las ecuaciones que resuelve el modelo numérico *HDunam* son las ecuaciones de ondas largas, en las cuales la hipótesis inicial es que $L \gg h$, siendo L la longitud de la onda cuya propagación se estudia, y h la profundidad sobre la que se propaga. La condición de onda larga se puede considerar aplicable a partir de $L > 20 h$ (Pedlosky, 1987). Bajo esta hipótesis el flujo es horizontal y las componentes horizontales de la velocidad, u y v , mucho mayores que la componente vertical, w . Estas afirmaciones son generalmente válidas, excepto en áreas locales con pendientes del fondo muy pronunciadas ($> 1/5$) o en áreas en las que se produzcan fenómenos de afloramientos (upwelling)/hundimientos (downwelling) o frentes oceánicos.

La consideración de flujo horizontal simplifica notablemente de ecuaciones generales del movimiento, ya que permite eliminar la componente vertical, w , como incógnita y establece una distribución de presiones hidrostáticas. Otra característica fundamental de las ondas largas es que poseen números de Reynolds muy elevados, lo que da lugar a que el flujo sea siempre turbulento. Esta característica permite aproximar los términos de tensiones tangenciales por medio de gradientes de la velocidad turbulenta media (aproximación de Boussinesq), lo cual da lugar a la aparición de coeficientes de viscosidad de remolino o “eddy viscosity”, de fricción con el fondo y de arrastre por viento, así como la necesidad de establecer lo que se ha dado en llamar “modelos de cierre” para la determinación de dichos coeficientes.

4.2.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

Para la determinación de las ecuaciones generales de las ondas largas, las ecuaciones de gobierno son las de conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la masa correspondiente a fluidos incompresibles.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{F} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.1)$$

$$\vec{\nabla}\vec{u} = 0 \quad (4.2)$$

Donde:

\vec{u} vector velocidad $u (u, v, w)$

p presión

F fuerzas de volumen (gravedad)

τ_{ij} tensiones tangenciales sobre el plano j en la dirección i

$\frac{D}{Dt}$ derivada material

∇ divergencia

$\frac{\partial}{\partial x}$ derivada parcial

Si se desarrollan las expresiones anteriores se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \\ \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Imponiendo la condición de onda larga, (longitud de onda muy superior a la profundidad) resulta:

$$\frac{Dw}{Dt} \approx 0 \quad (4.5)$$

Nótese que se establece que las aceleraciones verticales son despreciables dejando libre, en principio, el valor de las velocidades verticales.

Admitiendo que $\frac{Dw}{Dt} \approx 0$, la ecuación de la conservación de cantidad de movimiento según el eje z resulta:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -(\rho_0 + \rho')g \quad (4.6)$$

Donde ρ_0 es una densidad media y ρ' es la variación vertical de la densidad.

Integrando la ecuación anterior desde cualquier profundidad z hasta la superficie libre $z = \eta(x,y,t)$

$$\int_z^\eta dP = -\int_z^\eta g(\rho_0 + \rho') dz \quad (4.7)$$

Desarrollando la expresión y teniendo en cuenta que la presión en la superficie libre $P(\eta)$ es igual a la presión atmosférica p_a , y que la presión en cualquier profundidad $P(z)$ es igual a $p_0 + p'$, resulta:

$$p' = p_a + p_0 + g\rho(\eta - z) + g\int_z^\eta \rho' dz \quad (4.8)$$

Ecuaciones integradas en la vertical

Es importante señalar que las variables existentes en las ecuaciones (4.3) y (4.4) son funciones de (x, y, z, t) . Para eliminar esta dependencia de las tres variables espaciales, se efectúa la integración en vertical de las mismas, para ello se aplica la Regla de Leibnitz, que se puede expresar como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_\alpha^\beta f(x) dz = \int_\alpha^\beta \frac{\partial}{\partial x} f(x) dz + \frac{\partial \beta(x)}{\partial x} f(\beta, z) - \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} f(\alpha, z) \quad (4.9)$$

Una vez realizada la integración de las dos ecuaciones resultan las expresiones siguientes (Dean & Dalrymple, 1991):

Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{xx}U^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{xy}UVH)}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - g \frac{H^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + \\ + \frac{1}{\rho} [\tau_{xz}(\eta) - \tau_{xz}(-h)] + \frac{H}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{yx}UVH)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{yy}V^2H)}{\partial y} = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - g \frac{H^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial y} + \\ + \frac{1}{\rho} [\tau_{yz}(\eta) - \tau_{yz}(-h)] + \frac{H}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (4.11)$$

Ecuación de conservación de masa

$$\frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4.12)$$

Desarrollando los términos U^2 y V^2 y considerando que $\beta_{ij} = 1$, las ecuaciones (4.10), (4.11) y (4.12) se pueden escribir:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} [\tau_{sx} - \tau_{fx}] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} [\tau_{sy} - \tau_{fy}] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right] \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (4.15)$$

Una vez obtenidas estas ecuaciones, hay que indicar que la ecuación de conservación de masa es una expresión exacta, ya que no se ha utilizado ninguna hipótesis para su formulación. En cambio, en el desarrollo de la ecuación de cantidad de movimiento se han aceptado las siguientes hipótesis:

- Perfil de velocidades, $u(z)$, $v(z)$, sensiblemente uniforme ($\beta_{ij}=1$)
- En una onda larga: $\frac{Dw}{Dt} \approx 0$, esto es, distribución de presiones hidrostáticas
- Presión en superficie libre: $P(\eta) = 0$

En estas expresiones aparecen los términos τ_{sx} y τ_{fx} , que son la tensión tangencial en superficie y en el fondo. En oceanografía, la primera suele considerarse como el efecto del viento y la segunda como el efecto de rozamiento o arrastre por fondo. Sus correspondientes expresiones son:

$$\frac{1}{\rho H} \tau_{sx} = \frac{C_a \rho_a W^2 \cos \psi}{\rho H} \quad (4.16)$$

$$\frac{1}{\rho H} \tau_{fx} = g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} \quad (4.17)$$

Donde:

W velocidad del viento a 10 m por encima de la superficie del mar (m/s)

C_a coeficiente de arrastre del viento (-)

ρ_a densidad del aire (t/m³)

ψ ángulo entre la dirección del viento y el eje x (grados sexagesimales)

C coeficiente de rozamiento de Chézy (m^{1/2}/s)

Falta sustituir las condiciones de las tensiones tangenciales dentro del fluido por otro tipo de condición más útil. Si el fluido es newtoniano, se aplica directamente la definición del tensor de tensiones viscosas que, expresado en coordenadas cartesianas, es:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.18)$$

En esta expresión, μ representa la viscosidad cinemática, expresión válida para los fluidos en régimen laminar. Sin embargo, si el régimen es turbulento, cada una de las propiedades puntuales puede descomponerse en una media y una fluctuación. De esta manera, las propiedades que se obtienen para las propiedades medias son las de Reynolds, que son idénticas a las de Navier-Stokes, excepto en el término de tensiones turbulentas que se les añade. Por tanto, se cambiará el

término de viscosidad cinemática, μ (en realidad, se cambia la viscosidad dinámica, $\nu = \mu/\rho$), por otro término de viscosidad de remolino horizontal ε_h , o viscosidad de remolino

Con estas modificaciones, las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(UVH)}{\partial y} = -fVH - gH \frac{\partial\eta}{\partial x} - g \frac{H^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho_0}{\partial x} + \\ + \frac{1}{\rho_0} [\tau_{xz}(\eta) - \tau_{xz}(-h)] + H\varepsilon_h \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] + 2H \frac{\partial\varepsilon_h}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial\varepsilon_h}{\partial y} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial(V^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(UVH)}{\partial y} = -fUH - gH \frac{\partial\eta}{\partial y} - g \frac{H^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho_0}{\partial y} + \\ + \frac{1}{\rho_0} [\tau_{yz}(\eta) - \tau_{yz}(-h)] + H\varepsilon_h \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] + 2H \frac{\partial\varepsilon_h}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial\varepsilon_h}{\partial x} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (4.21)$$

Para generalizar las ecuaciones, se ha introducido el término de la aceleración de Coriolis, que viene caracterizado por el parámetro f_c , donde:

$$f_c = 2\Omega \sin\varphi \quad (4.22)$$

Donde:

Ω velocidad angular de la Tierra (7.29 10⁻⁵ s⁻¹)

φ latitud

Si el fluido es no homogéneo, es decir, existen variaciones horizontales de densidad, para describir el flujo se necesitan, además de las ecuaciones (4.19), (4.20) y (4.21), las ecuaciones de transporte, promediadas en vertical, para la temperatura, T , y para la salinidad, S , junto con una ecuación de estado que relacione estas dos variables con la densidad:

Ecuación de transporte de la temperatura o la salinidad

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + R \quad (4.23)$$

Donde:

C temperatura (grados Celsius) o salinidad (en UPS) promediada en la profundidad

D_x, D_y coeficientes de difusión horizontal

R fuentes o sumideros

Ecuación de estado

La densidad del agua del mar se puede definir en función de la salinidad del agua (S), de la temperatura potencial (θ) y de la presión (p):

$$\rho = \rho(S, \theta, p) \quad (4.24)$$

Esta relación se denomina ecuación de estado. La temperatura potencial es la temperatura que tendría una masa de agua, situada en una determinada profundidad, si fuera adiabáticamente transportada por advección hasta la superficie. Para los órdenes de magnitud de las profundidades en las que se aplica este modelo, se puede establecer $\theta = T$, donde T es la temperatura *in situ*, y que la influencia de la presión en la densidad es despreciable.

La ecuación de estado que se utiliza es la propuesta por la UNESCO en 1982 que tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \rho_0(T, S) = & 999.842594 + 6.793952 \cdot 10^{-2} T^2 + 1.001685 \cdot 10^{-4} T^3 - \\ & -1.120083 \cdot 10^{-6} T^4 + 6.536332 \cdot 10^{-9} T^5 + (0.824493 - 4.0899 \cdot 10^{-3} T + \\ & + 7.6438 \cdot 10^{-5} T^2 - 8.2467 \cdot 10^{-7} T^3 + 5.3875 \cdot 10^{-9} T^4) S + \\ & + (-5.72466 \cdot 10^{-3} + 1.0227 \cdot 10^{-4} T - 1.6546 \cdot 10^{-6} T^2) S^{1.5} + 4.8314 \cdot 10^{-4} S^2 \quad (\text{Kg} / \text{m}^3) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Coeficiente de rozamiento por fondo

Para representar la tensión tangencial en el fondo, el modelo *HDunam* utiliza el coeficiente de Chézy dado por la ecuación de Colebrook-White, en función de la rugosidad del fondo, k_s , o una expresión en función del coeficiente de Manning, n :

$$\begin{aligned} C &= 18 \log \left(\frac{12H}{k_s} \right) \\ C &= \frac{1.125}{n} H^{1/6} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Donde:

k_s altura, en m, que representa la rugosidad del fondo debida al tamaño del sedimento y las formas del lecho (Van Rijn (1993, 1984 a, b); Hey (1979); Yalin (1972); Einstein (1950))

n coeficiente de Manning.

Coeficiente de arrastre del viento

La tensión tangencial que el viento ejerce en la superficie del océano se representa mediante la ecuación (4.16), en la cual aparece un coeficiente de arrastre, C_a , el cual depende linealmente de la velocidad del viento:

$$C_a = (0.75 + 0.067 W) \cdot 10^{-3} \quad (4.27)$$

Donde la velocidad del viento es expresada en cm/s.

Sin embargo, en la práctica, se suele utilizar un coeficiente de arrastre constante, de valor 2.7×10^{-3} . En el modelo se permite introducir un valor constante de C_a .

Coefficiente de viscosidad de remolino (Eddy viscosity)

La viscosidad de remolino, ε_h , se utiliza para describir la turbulencia. En el término “turbulencia” se incluyen varios fenómenos que van desde la dispersión numérica, originada por la transformación de ecuaciones diferenciales en ecuaciones en diferencias finitas, hasta la correspondiente al promediado en vertical de las ecuaciones del flujo.

Existen numerosos modelos para determinar ε_h , que van desde los más sencillos que utilizan un valor constante, hasta los más complicados que describen la turbulencia mediante ecuaciones diferenciales.

En este modelo se utiliza un valor variable para la viscosidad de remolino. La expresión utilizada es la propuesta por Madsen et al (1988), donde:

$$\varepsilon_h = l^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{4.28}$$

Donde l es una longitud de mezcla que puede expresarse como $l^2 = C_s \Delta x \Delta y$ y C_s es una constante empírica.

4.2.2 FORMULACIÓN NUMÉRICA

El modelo *HDunam* resuelve las ecuaciones (4.19), (4.20), (4.21), (4.23) y (4.25) mediante un algoritmo en diferencias finitas, implícito de dirección alterna, utilizado por Leendertse en 1970. La resolución numérica de las ecuaciones requiere transformar el dominio continuo en un dominio discreto, formado por una malla compuesta de elementos rectangulares denominados celdas, de dimensiones $(\Delta x) \times (\Delta y)$.

El algoritmo emplea un esquema centrado con dos niveles de tiempo, resultando una aproximación de segundo orden en el espacio y en el tiempo.

El resultado proporciona el nivel η en el centro de cada celda y las velocidades horizontales u y v en los bordes de la misma.

Método de resolución

Para el eje x

Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

$$\frac{1}{\Delta t} \left[P_{M-1,N}^{t+1} - P_{M-1,N}^t \right] + g \frac{\bar{D}_{M-1,N}}{\Delta x} \left[E_{M,N}^{t+1/2} - E_{M-1,N}^{t+1/2} \right] + \frac{g \left(\bar{D}_{M-1,N} \right)^2}{2 \left(\bar{\rho}_{0M-1,N} \right)} \left[\frac{\rho_{0M,N}^t - \rho_{0M-1,N}^t}{\Delta x} \right] = 0 \tag{4.29}$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{2}{\Delta t} [E_{M,N}^{t+1/2} - E_{M,N}^t] + \frac{1}{2\Delta x} [P_{M,N}^{t+1} - P_{M-1,N}^{t+1} + P_{M,N}^t - P_{M-1,N}^t] + \frac{1}{\Delta y} [Q_{M,N}^t - Q_{M,N-1}^t] = 0 \quad (4.30)$$

Donde:

$$P=UH, Q=VH, E=\eta, D=h, \bar{D}_{M-1,N} = (D_{M-1,N} + D_{M,N})/2 \text{ y } \bar{\rho}_{M-1,N} = (\rho_{0M-1,N} + \rho_{0M,N})/2$$

Agrupando los datos en coeficientes se puede escribir para la conservación de movimiento:

$$\varepsilon P_{M-1,N}^{t+1} + \omega E_{M,N}^{t+1/2} + \delta E_{M-1,N}^{t+1/2} = B_{M-1,N} \quad (4.31)$$

y para la continuidad

$$\beta E_{M,N}^{t+1/2} + \alpha P_{M-1,N}^{t+1} + \gamma P_{M,N}^{t+1} = A_{M,N} \quad (4.32)$$

Movimiento

$$E_{M,N}^{t+1/2} = L_{M-1,N} P_{M-1,N}^{t+1} + T_{M-1,N} \quad (4.33)$$

Continuidad

$$P_{M,N}^{t+1} = \bar{L}_{M,N} E_{M,N}^{t+1/2} + \bar{T}_{M,N} \quad (4.34)$$

Sustituyendo (4.32) y (4.33) en (4.30) y (4.31) resulta

Movimiento

$$P_{M-1,N}^{t+1} = -\frac{\delta}{\varepsilon + \omega L_{M-1,N}} E_{M-1,N}^{t+1/2} + \frac{B_{M-1,N} - \omega T_{M-1,N}}{\varepsilon + \omega L_{M-1,N}} \quad (4.35)$$

Continuidad

$$E_{M,N}^{t+1/2} = -\frac{\alpha}{\beta + \gamma \bar{L}_{M,N}} P_{M-1,N}^{t+1} + \frac{A_{M,N} - \gamma \bar{T}_{M,N}}{\beta + \gamma \bar{L}_{M,N}} \quad (4.36)$$

Por lo tanto

$$L_{M-1,N} = \frac{-\alpha}{\beta + \gamma \bar{L}_{M,N}} \quad (4.37)$$

$$T_{M-1,N} = \frac{A_{M,N} - \gamma \bar{T}_{M,N}}{\beta + \gamma \bar{L}_{M,N}} \quad (4.38)$$

$$\bar{L}_{M-1,N} = \frac{-\delta}{\varepsilon + \omega L_{M-1,N}} \quad (4.39)$$

$$\bar{T}_{M-1,N} = \frac{B_{M-1,N} - \omega T_{M-1,N}}{\varepsilon + \omega L_{M-1,N}} \quad (4.40)$$

La forma de cálculo del modelo es la siguiente: A partir de la condición de contorno al final de cada vector en x , se obtienen por barrido descendente L , T , \bar{L} y \bar{T} . Una vez calculados estos valores, se pueden calcular P_{t+1} y $E_{t+1/2}$ por barrido ascendente.

El esquema de cálculo en el eje y es exactamente igual, resultando al final del doble barrido en esta dirección los valores de Q_{t+1} y E_{t+1} .

El núcleo principal de cálculo del modelo resuelve las ecuaciones (4.29) y (4.30) utilizando los términos de rozamiento por fondo y de tensión tangencial del viento. El programa ofrece como opcional la introducción en el cálculo de los términos convectivos, del término debido a la aceleración de Coriolis y de las tensiones turbulentas.

Una vez obtenidas las velocidades horizontales, u y v , y la altura de la superficie libre, η , se resuelven, de forma explícita, las ecuaciones de transporte de temperatura y salinidad (4.23) y mediante la ecuación de estado (4.25) se calcula un nuevo valor de la densidad media para utilizar en el cálculo del siguiente Δt .

Si en el área de estudio existen zonas susceptibles de ser inundadas y secadas durante el ciclo de marea, entra en el proceso de cálculo la subrutina de inundación-secado que, como su nombre indica, inunda y seca celdas en ambas direcciones de barrido. Previamente otra subrutina denominada NECXY establece los vectores de cálculo en cada dirección. Estos vectores contienen información sobre qué celdas tienen agua y pertenecen al dominio del problema y cuáles están secas. Si en la zona objeto de estudio no existen áreas inundables, esta subrutina sólo actuará al comienzo del cálculo. En cambio, en el caso contrario, se deberá definir cada vector después del paso por la subrutina de inundación – secado de nombre MOJOSECO.

4.2.3 ESTABILIDAD NUMÉRICA DEL MODELO

Condición de Courant

El modelo requiere, para su estabilidad numérica, que se cumpla la relación establecida en la condición de Courant:

$$\Delta t \leq \frac{c_r \Delta x}{\sqrt{g D_{med}}} \quad (4.41)$$

Donde:

Δt intervalo de tiempo de cálculo (s)

Δx discretización espacial de la malla (m)

D_{med} profundidad media del dominio (m)

C_r número de Courant. $C_r = 1$ con términos no lineales y $C_r = 5$ términos lineales

g aceleración de la gravedad (m/s^2)

Número de Peclet

Cuando la densidad no es constante el modelo resuelve las ecuaciones de transporte de salinidad y temperatura. Para que los procesos de difusión tengan convergencia se tiene que cumplir la condición del número de Peclet:

$$\left(\frac{D_x}{\Delta x^2} + \frac{D_y}{\Delta y^2} \right) \Delta t < 0.5 \quad (4.42)$$

4.3 DATOS DE ENTRADA

El dominio de cálculo consistió en una malla regular de 1100 x 1600 celdas cuadradas de 50 m por lado. En la **Figura 4-1** se muestra el dominio completo, el cual para facilitar el cálculo numérico, se giró 16° en sentido horario, por lo que el sistema de referencia es arbitrario. En la figura se puede apreciar que el dominio abarca desde la laguna de Agua Brava, en la parte inferior, hasta la laguna de Agua Grande, en la parte superior (ver **Figura 2-1**).

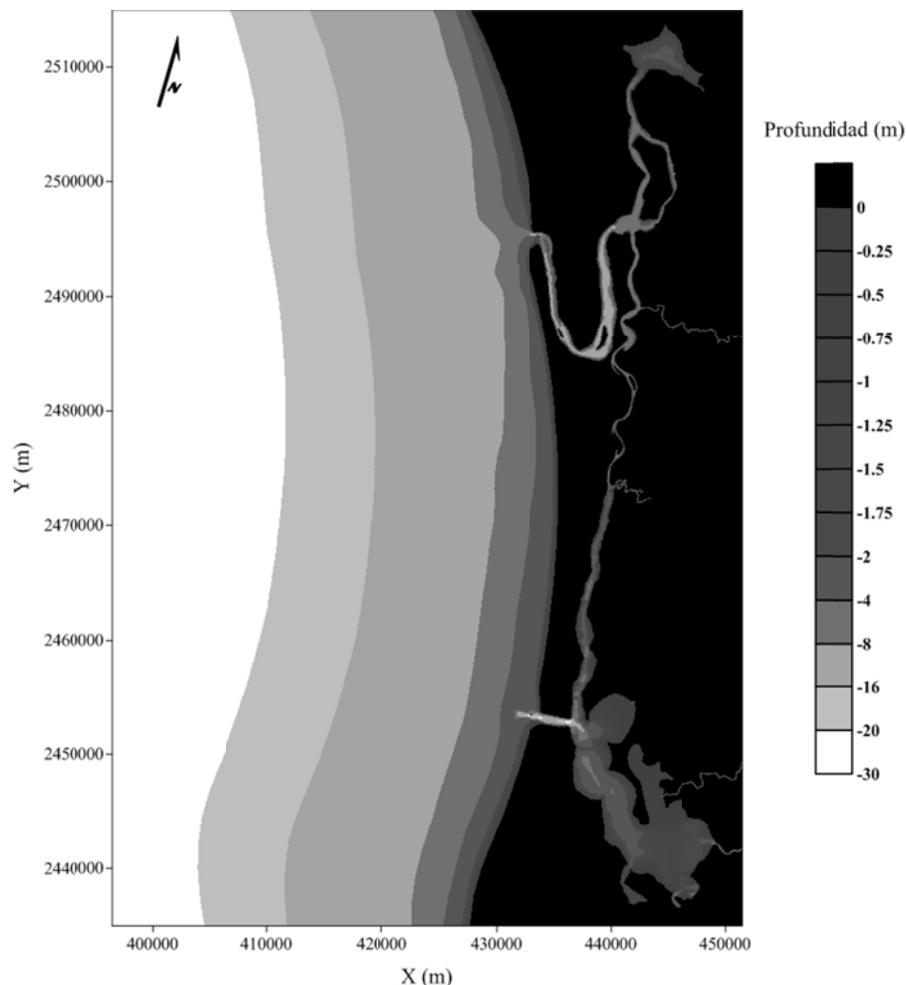


Figura 4-1.- Dominio numérico completo.

Los datos base para la generación de la malla de modelación provienen de las mediciones batimétricas realizadas en las campañas de campo que se mostraron en el Capítulo 3, y de la digitalización de imágenes satelitales obtenidas de Google Earth y Global Mapper.

En la **Figura 4-2** se presenta un acercamiento al canal de Cuautla, donde se puede apreciar a mayor detalle la malla.

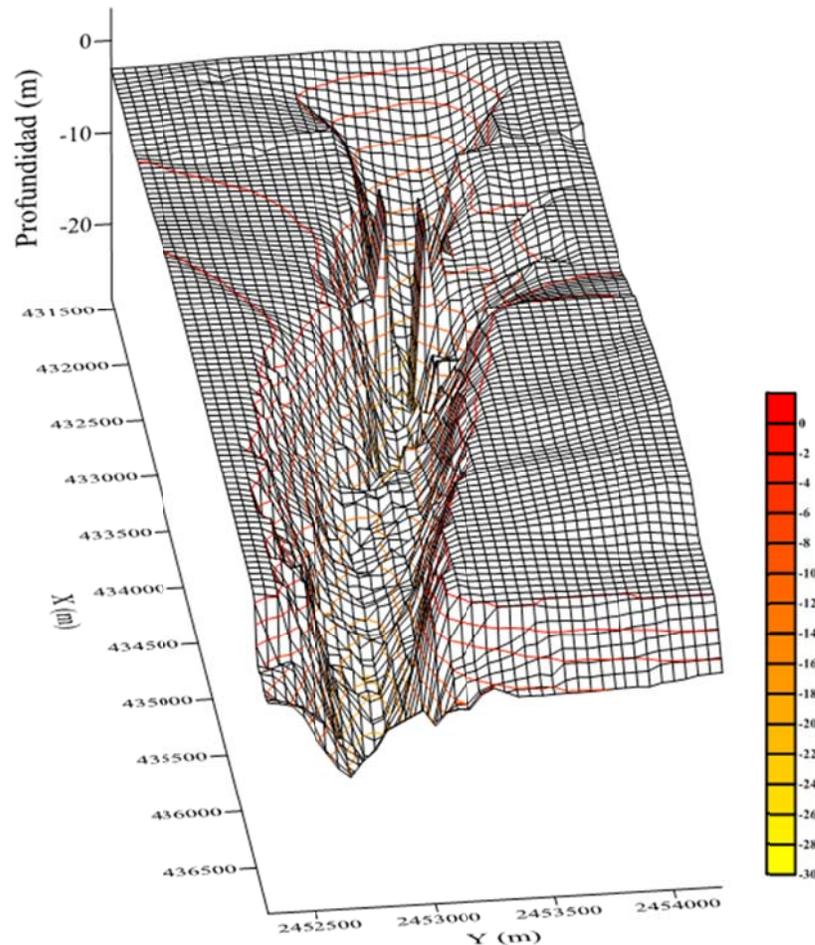


Figura 4-2.- Malla cuadrada de cálculo en el canal de Cuautla.

El paso de tiempo seleccionado fue de 4 s, la pérdida de energía debido a la fricción en el fondo fue representada por un coeficiente de Chézy, para representar la turbulencia se utilizó el coeficiente de viscosidad de remolino (Eddy viscosity) y el tiempo de simulación fue de 720 horas. La velocidad, gasto y elevación de la superficie libre fueron registrados a cada hora.

4.4 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

La simulación se llevó a cabo forzando al sistema lagunar con una señal de marea en la frontera izquierda de la malla y con caudales en la frontera derecha. En la **Figura 4-3** se muestran las señales de marea empleadas en la simulación. Esta señal fue tomada de las predicciones del CICESE correspondiente a las fechas cuando se realizaron las mediciones en campo y están referidas al NBMI.

Para el caso de los caudales en los ríos se utilizaron las curvas de probabilidad que se muestran en el capítulo 2.

Cabe mencionar que el contorno de la frontera izquierda se consideró absorbente y que los caudales en los ríos fueron constantes a lo largo de toda la simulación.

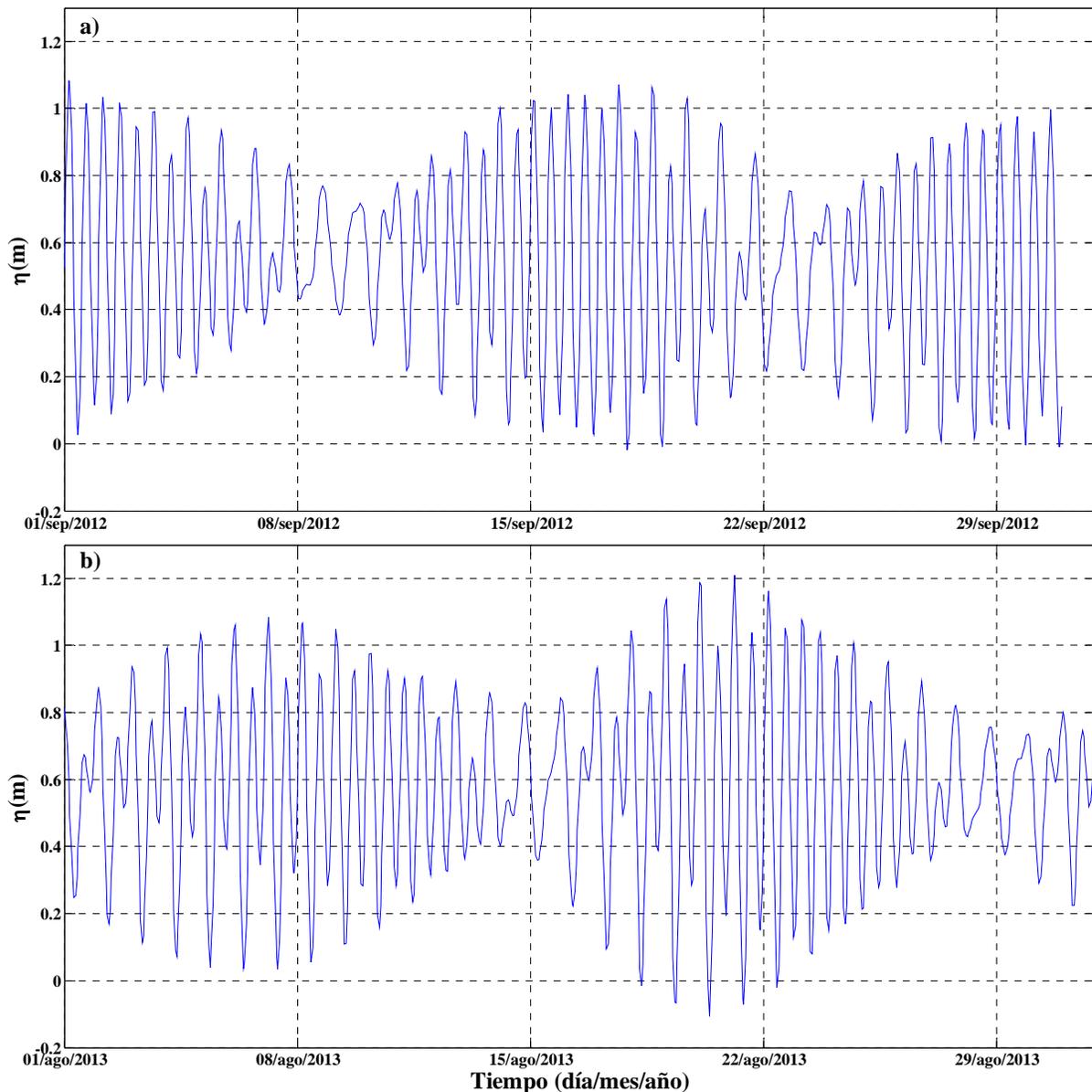


Figura 4-3.- Señal de marea empleada en la modelación numérica: a) Primera campaña, b) Segunda campaña.

4.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La calibración y validación del modelo numérico consistió en adecuar los datos de entrada del modelo de modo que sus resultados permitieran reproducir, en la medida de lo posible, los datos medidos.

En este sentido, cabe entender, en un principio, como parámetro de calibración los correspondientes a los coeficientes de fricción con el fondo y de viscosidad de remolino. No obstante, la especificación de las condiciones de contorno es un aspecto clave que puede tener, incluso, mayor influencia en los resultados obtenidos que la selección de dichos valores, dentro de un rango de variación adecuado de los mismos.

Como paso inicial en el proceso de calibración del modelo hidrodinámico, se buscó reproducir las oscilaciones del nivel del mar registradas durante las dos campañas de campo, para esto fue

necesario un proceso iterativo para encontrar los valores de coeficiente de fricción C y de viscosidad ε_h que se indican en la **Tabla 4-1**.

Tabla 4-1.-Valores de los parámetros obtenidos en el ajuste de las variaciones del nivel del mar por acción de la marea astronómica.

Parámetros de calibración	
Coefficiente de fricción ($m^{1/2}.s$)	Viscosidad de remolino (m^2/s)
50	6

En la **Figura 4-4** se presenta la comparación de los niveles medido y modelado para las dos campañas.

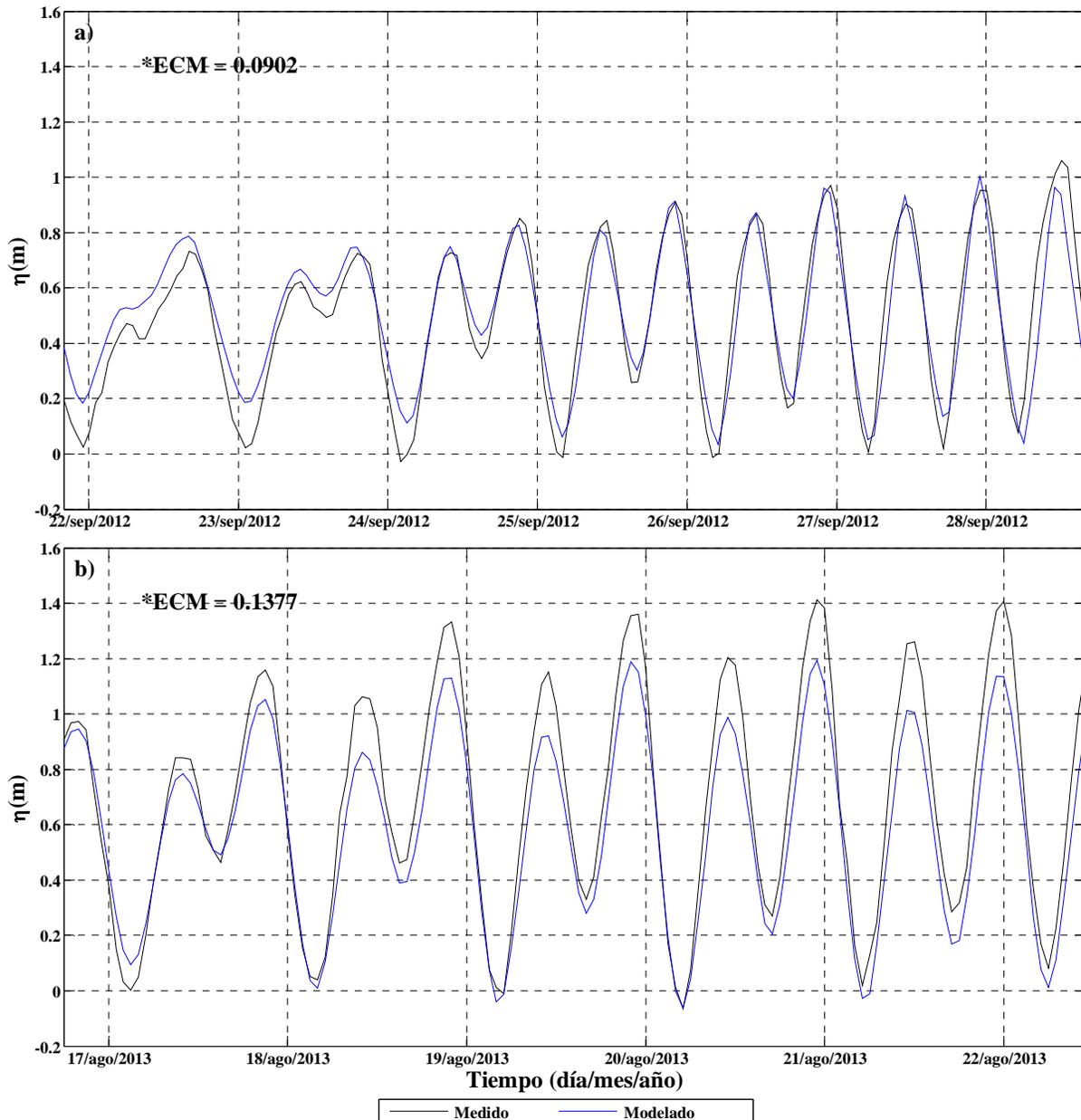


Figura 4-4.- Comparación de los niveles de superficie libre medidos y calculados con el modelo numérico: a) Primera campaña y b) Segunda campaña. *ECM = Error Cuadrático Medio.

En lo que se refiere a la calibración de las magnitudes y dirección de las corrientes cabe indicar que esta tarea no es tan directa como en el caso anterior. Ello es debido a que los datos medidos pueden

registrar la acción simultánea y combinada de diversos mecanismos generadores de movimiento del agua, algunos de ellos difíciles de predecir. Incluso, la acción del aporte de los ríos es difícil de representar dada su variabilidad temporal. A lo que hay que añadir el hecho de que la información sobre el aporte de los ríos procede de estaciones hidrométricas situadas relativamente lejos de su descarga al sistema lagunar. Dado lo anterior, se analizó si el efecto de la marea astronómica podría dar lugar a un régimen de velocidades similar al registrado en las dos campañas de campo. En la **Figura 4-5** se muestra la comparación de las corrientes registradas, con los resultados obtenidos del modelado de la acción de la marea astronómica.

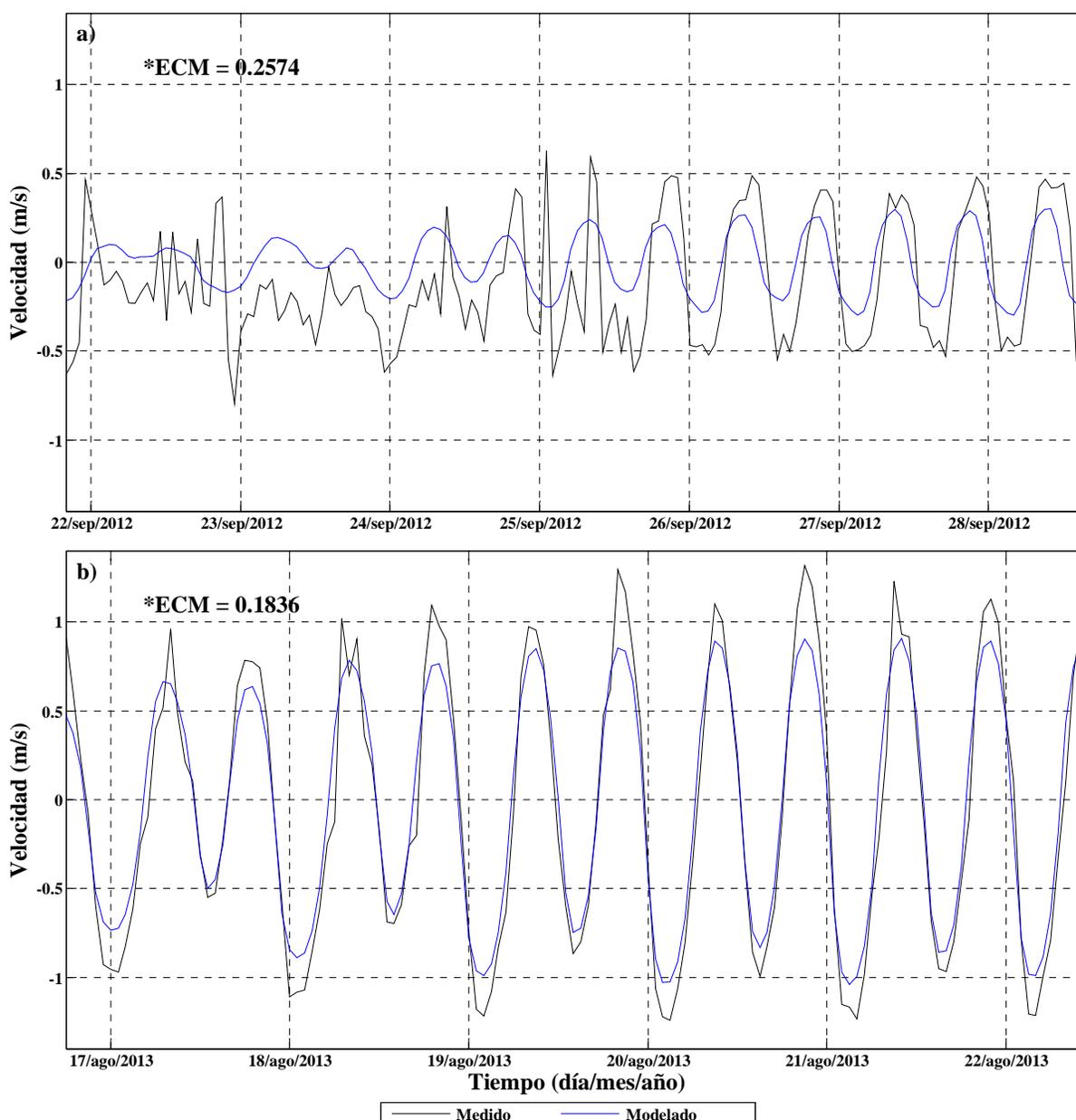


Figura 4-5.- Comparación de las corrientes medidas y calculadas con el modelo numérico solo usando la marea como forzamiento: a) Primera campaña y b) Segunda campaña. *ECM = Error Cuadrático Medio.

Sobre los datos mostrados en la comparación cabe destacar que estas velocidades son, para ambas campañas, de menor intensidad que las medidas, sin embargo, también puede apreciarse que, se consigue reproducir la tendencia observada, hallándose en algunos casos muy similares en rango

las velocidades obtenidas del modelado realizado, con los valores medidos. Por otro lado, se debe tomar en cuenta que los datos medidos fueron puntuales y el modelo ofrece velocidades promediadas en la vertical, considerando lo cual, el ajuste es aceptable. Ahora, para analizar el efecto del aporte de los ríos, se procedió al modelado de las corrientes generadas por la marea astronómica más el aporte de los ríos. En la **Figura 4-6** se muestra la comparación entre las velocidades obtenidas mediante modelado numérico, considerando las velocidades originadas por la marea astronómica y el aporte de los ríos, y los datos de corriente registrados.

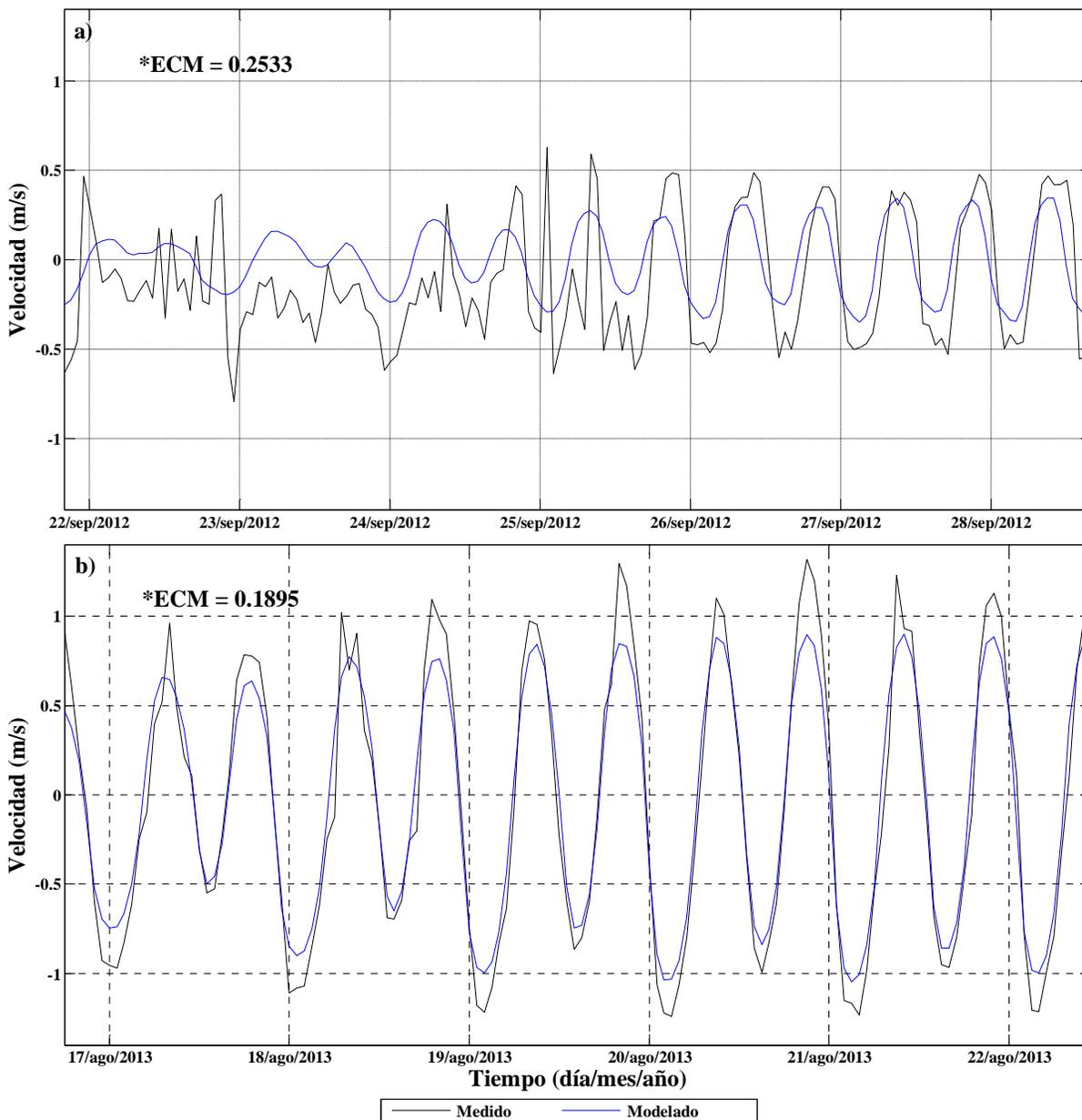


Figura 4-6.- Comparación de las corrientes medidas y calculadas con el modelo numérico usando la marea y el caudal de los ríos como forzamientos: a) Primera campaña y b) Segunda campaña. *ECM = Error Cuadrático Medio.

Con respecto a la **Figura 4-6**, se puede observar poca contribución del aporte de los ríos en comparación con la marea, sin embargo, su presencia puede generar variaciones significativas en la intensidad y dirección de la corriente. Además, cabe indicar que podrían existir otras corrientes alternas a los ríos u otros forzamientos, como el viento, que no han podido ser evaluadas a partir de

los datos registrados en las campañas, que contribuyan de forma apreciable en ciertos periodos de tiempo, al movimiento de las masas de agua en el sistema lagunar.

Pese a la existencia de estos interrogantes, a la vista de los resultados de la modelación numérica y los bajos valores del error cuadrático medio, las condiciones medidas se pueden reproducir, con un grado de aproximación suficiente, mediante la consideración del efecto conjunto de la marea y del aporte de los ríos. Por lo que se puede considerar que el modelo ha quedado validado.

4.6 APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Mediante la aplicación del modelo numérico, el primer resultado que se obtuvo fue el campo de velocidades y niveles al interior del sistema lagunar para un instante.

En la **Figura 4-7** se muestra el campo de velocidades en el dominio tanto para flujo como reflujos de marea.

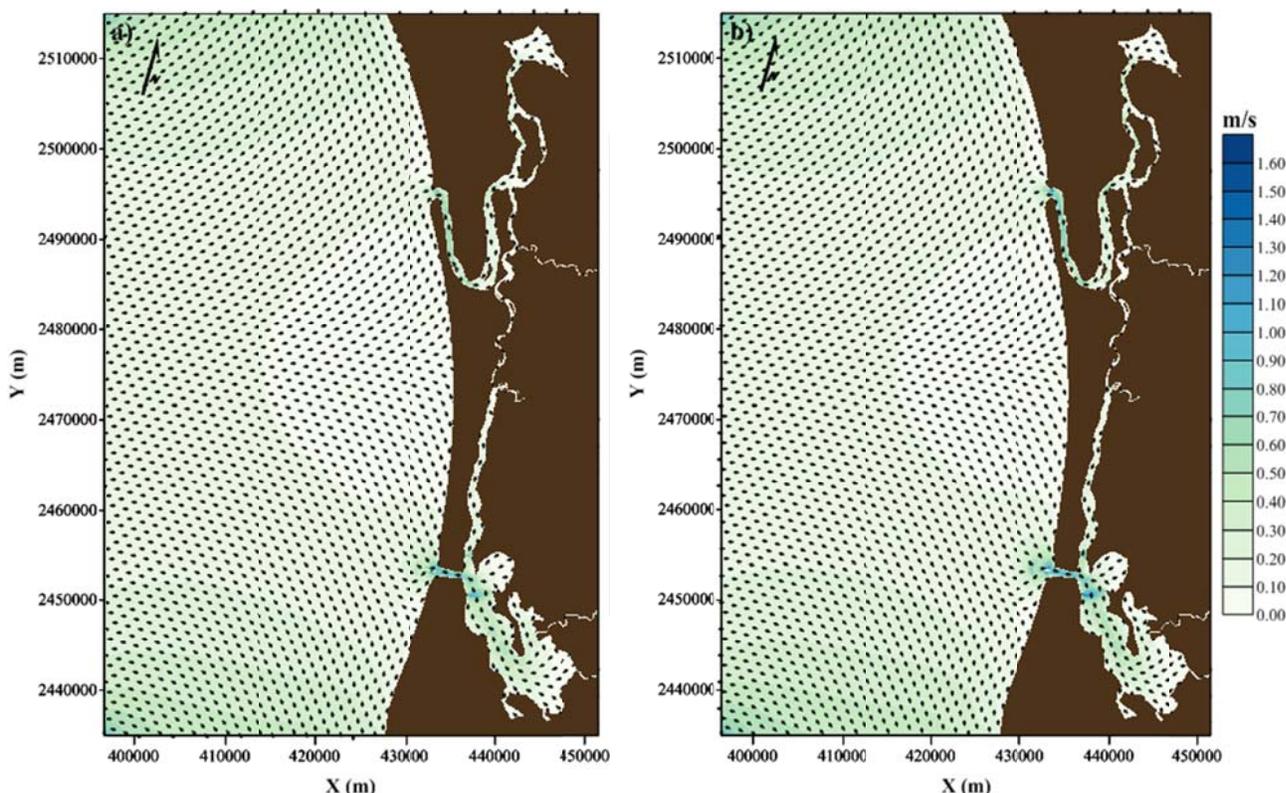


Figura 4-7.- Campo de velocidades: a) durante la fase de flujo de marea, b) durante la fase de reflujos de marea.

Como se puede observar, las máximas velocidades se presentan en la boca de Teacapán y en el canal de Cuautla, la velocidad de las corrientes al interior del canal, debido a su geometría, crece durante el flujo conforme el agua avanza hacia la laguna de Agua Brava hasta alcanzar valores del orden de 0.70 m/s y decrece durante el reflujos conforme el agua sale hacia al mar a partir de valores máximos del orden de 0.90 m/s. La velocidad media de las corrientes en el interior del sistema lagunar es muy semejante, del orden de 0.50 m/s, tanto en máxima de reflujos como máxima de flujo, pero en sentidos opuestos. En secciones estrechas se presentan valores del orden de 0.70 m/s. El cambio más sustancial entre las formas de la corriente de flujo y reflujos, es que el reflujos de marea dura un poca más en casi todo el sistema, especialmente al sur. Cabe destacar que para mareas medias y muertas el comportamiento del campo de velocidad es semejante pero con velocidades menores que con mareas vivas.

En la figura 4-9 se puede observar el comportamiento del nivel de la superficie libre durante un ciclo de marea viva en diferentes puntos al interior del sistema como se muestra la **Figura 4-8**.

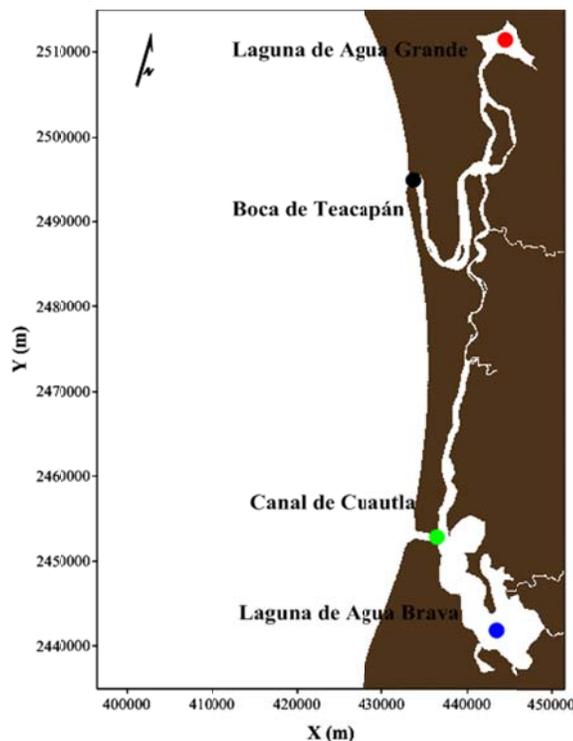


Figura 4-8.-Localización de los puntos al interior del sistema donde se comparan la variación de la superficie libre.

Se puede observar que a medida que el efecto de la onda de marea se propaga al interior del sistema lagunar, se produce una deformación haciendo que el tiempo entre pleamar y bajamar aumente y que el tiempo entre la bajamar y pleamar disminuya. Por otro lado, se observa que el efecto de la onda de marea que entra por la boca de Teacapán sufre una disipación importante hasta llegar a la laguna de Agua Grande; mientras que al exterior la altura de marea es del orden de 1.05 m, en el interior se reduce a 0.65 m.

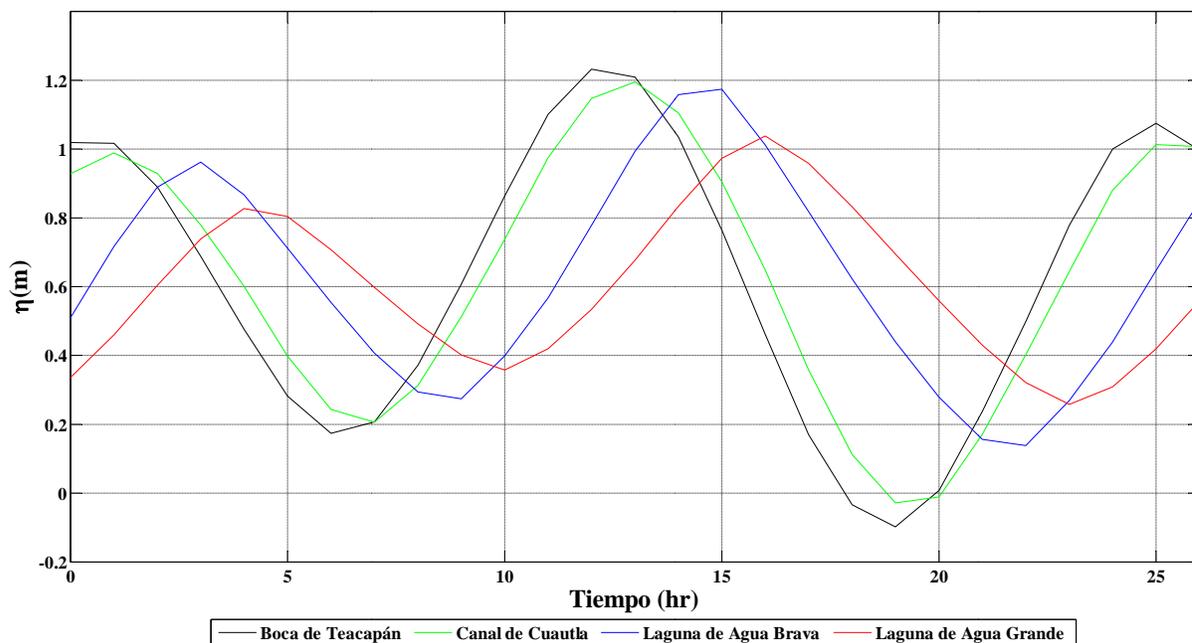


Figura 4-9.- Variación del nivel de la superficie libre en cuatro puntos al interior del sistema.

Posteriormente se obtuvieron las series de tiempo de la velocidad media y nivel en la garganta del canal, como se muestra en la **Figura 4-9**, ya que es en esta sección donde se presentan las velocidades más altas a pesar de las condiciones de modelación. La respuesta de la velocidad y elevación debido a la marea es bastante clara; mareas altas inducen mayores velocidades y elevaciones, obsérvese también que en cada fase de marea las corrientes alcanzan su máxima velocidad justo antes del punto de bajamar o pleamar.

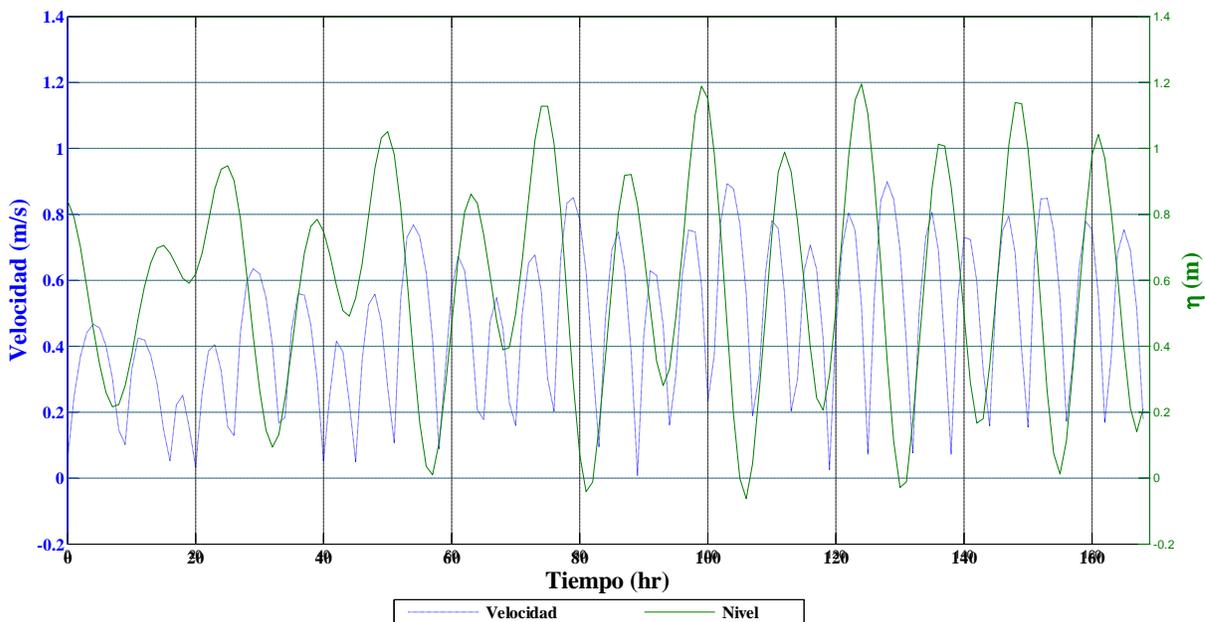


Figura 4-10.- Series de tiempo de la velocidad media y nivel en la garganta del canal.

Por otro lado, se calculó volumen o gasto de agua que pasa en cada fase de marea a través del canal de Cuautla y la boca de Teacapán, así como el gasto aportado por los ríos. Los resultados de este cálculo se presentan en la **Figura 4-10**, donde se observan los patrones del gasto a lo largo de los ciclos de marea.

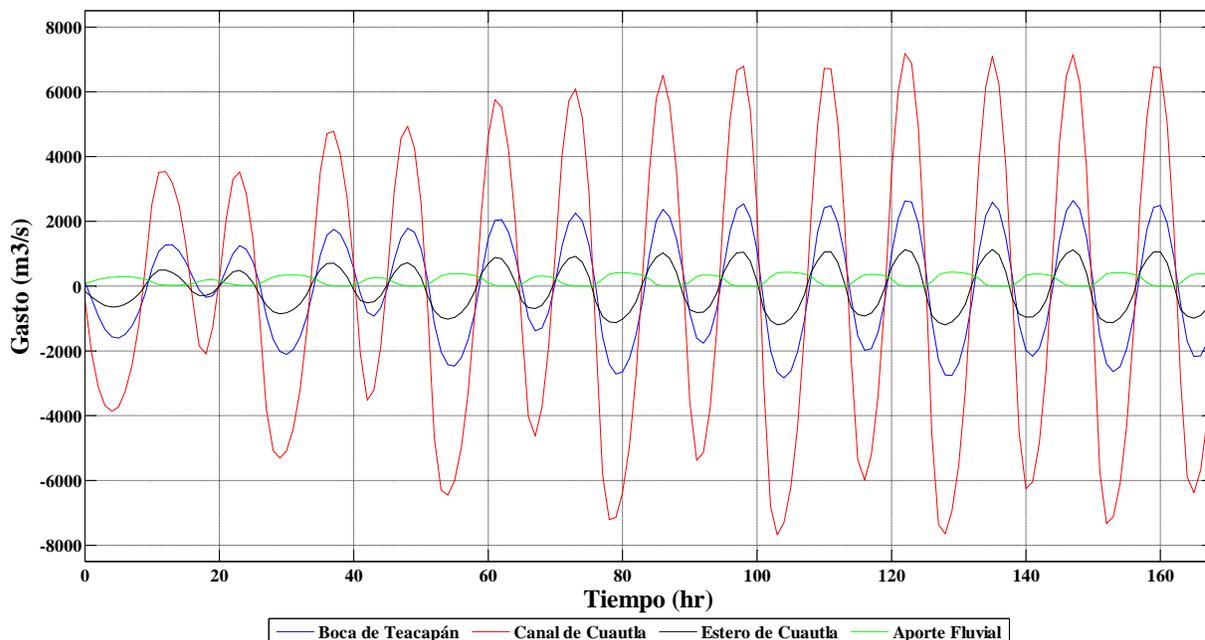


Figura 4-11.- Series de tiempo del gasto en la garganta del canal.

Los valores positivos indican un gasto en dirección hacia al interior del sistema y los negativos indican un gasto en dirección hacia el mar. Obsérvese que el gasto que entra y sale por el canal de Cuautla es casi el doble de lo que entra y sale por la boca de Teacapán, así mismo obsérvese que el gasto en dirección hacia el mar, el cual se encuentra asociado al reflujos de marea, casi siempre es mayor en la simulación, esto significa que, independientemente del diseño original del canal esta ahora trabajando como una boca de reflujos. Al separar el gasto de los ríos del gasto total, resulta que alrededor del 70 % del aporte de los ríos sale del sistema a través del canal de Cuautla. Es claro que todo este volumen de agua, que actualmente va hacia el mar, solía ir hacia el norte del sistema, antes de la construcción del canal, irrigando el estero de Teacapán y probablemente aun las lagunas de Agua Grande y las Cabras. El resultado de la pérdida de agua en estas lagunas es evidente ahora en el secado de los cuerpos de agua y la desaparición de cobertura de manglar.

Además, se analizó la zona cercana a la desembocadura del río Acaponeta para confirmar la hipótesis de que las corrientes de mareas que entran por la boca de Teacapán y por el canal de Cuautla “chocan” en cada fase de flujo de marea. Este hecho se detectó al centro del estero de Puerta del Río tanto en marea viva como en marea muerta, como se puede observar en la figura 4-11, aunque también se puede presentar al norte o al sur del estero, dependiendo de la amplitud de la marea y de la descarga de los ríos, principalmente la del río Acaponeta. En la **Figura 4-11** se señala el punto en que los flujos se encuentran con una línea discontinua. Cabe destacar que este fenómeno produce que el sistema lagunar que se extiende desde la laguna de Agua Brava, hasta la laguna Las Cabras, quede limitado hidrodinámicamente, en consecuencia el sistema trabaja en dos partes de forma casi independiente.

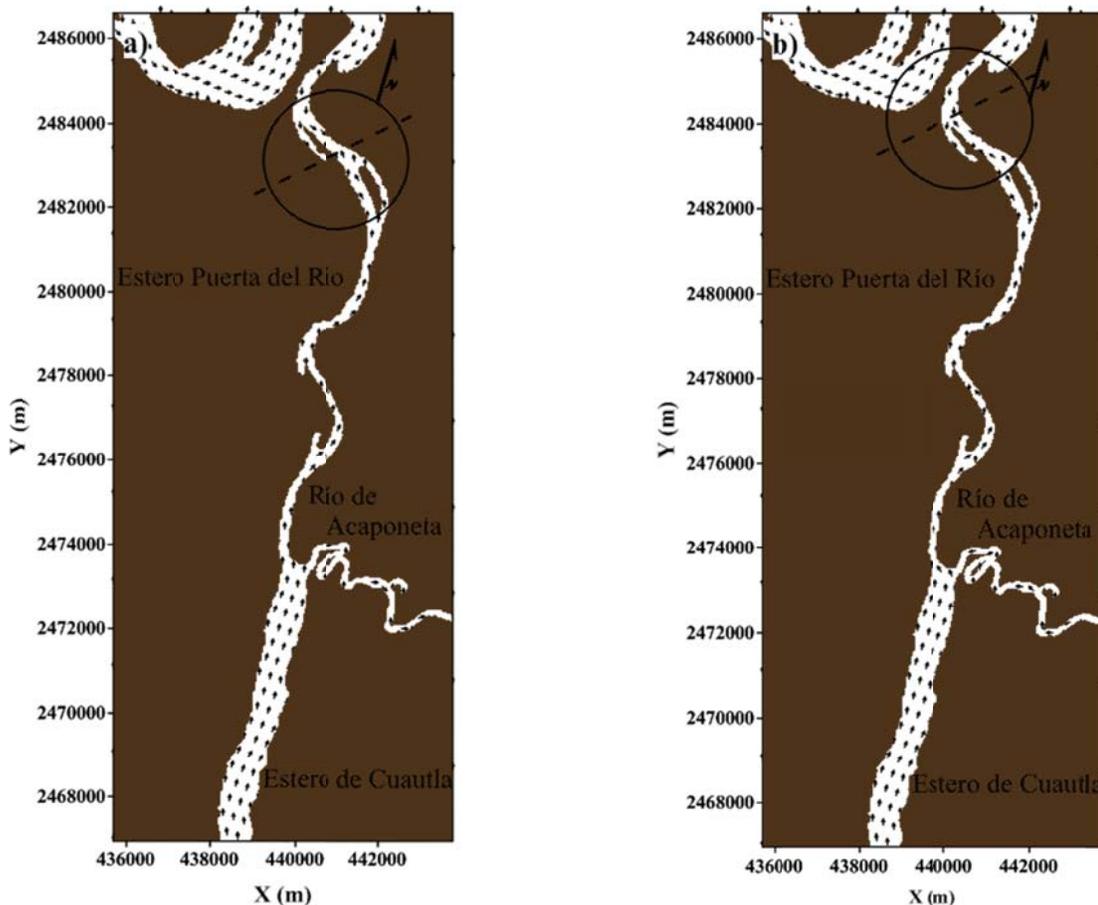


Figura 4-12.- Límites de la influencia de marea para: (a) marea viva y (b) marea muerta.

Otro resultado que se obtuvo con la aplicación del modelo numérico fue la distribución de las condiciones de salinidad al interior del sistema, lo cual se muestra en la **Figura 4-12**. Se puede observar un aporte salino importante por parte de la marea que entra a través del canal de Cuautla en la laguna de Agua Brava, donde las condiciones son del orden de los 24 ups +/- 6 ups, siendo menos salina hacia el interior de la laguna. En el estero de Cuautla se observan condiciones relativamente bajas del orden de los 20 ups +/- 4 ups, debido a la influencia de la descarga del río Acaponeta. En los cuerpos de agua del subsistema de Teacapán no se observa ningún cambio significativo en las condiciones de salinidad, con excepción de la boca y el estero de Teacapán donde ocurre directamente el intercambio de agua entre el Océano y el subsistema de Cuautla, el resto del subsistema de Teacapán permanece bastante homogéneo con salinidades del orden de los 33 ups, esto se debe, por un lado, a la falta de aporte de agua mucho menos salina, y por otro lado, a la falta de un intercambio de agua adecuado.

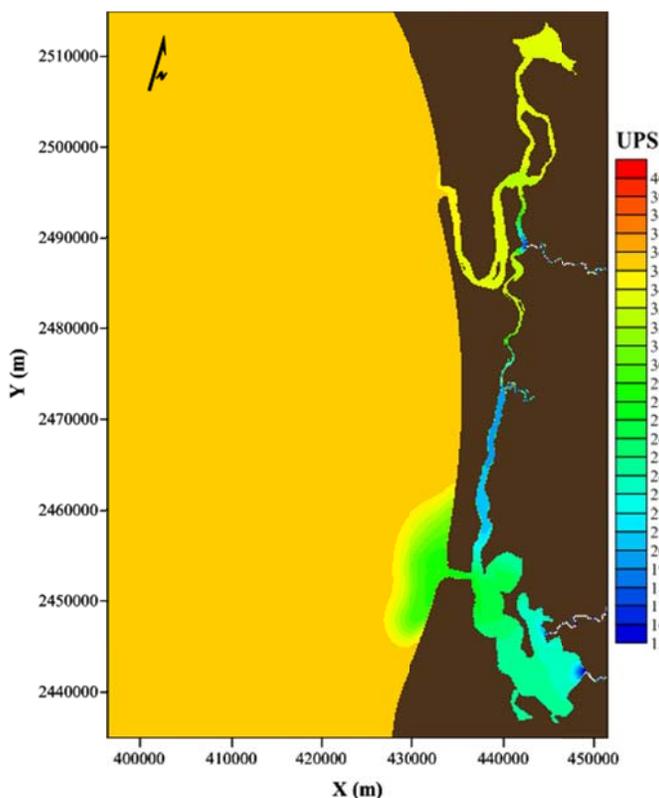


Figura 4-13.-Distribución de la salinidad al interior del sistema.

Por último, para estimar la influencia que ejercen las descargas de los ríos en las velocidades del canal, se aplicó el modelo considerando en los ríos una avenida asociada a un cierto periodo de retorno, en el momento en que se presenta el reflujó de marea viva, porque es la condición en que se presentarían las máximas velocidades. En la **Tabla 4-2** se muestran los resultados obtenidos en la garganta del canal. Obsérvese que las velocidades en el canal durante el reflujó de marea viva con avenidas a partir de periodos de retorno de 5 o más años son mayores que 1 m/s (velocidad media máxima sobre la sección transversal durante la marea viva) (Esoffier, 1940; Bruun 1968, 1990), que es el valor requerido para mantener la estabilidad de la entrada de una laguna sin protección. Por esta razón se puede suponer que en el caso de presentarse una marea y descargas de los ríos provoquen que el gasto a través del canal supere el gasto que se presentó con avenidas con periodo de retorno de 5 años, el canal se erosionaría provocando su ensanchamiento. Sin embargo, el gasto que hace falta para que la velocidad media en la garganta del canal rebase el 1

m/s puede ser aportado por la avenida de un solo río, es decir, se necesitaría solo una avenida del río Acaponeta con un periodo de retorno de 10 años, para que junto con el gasto asociado al refluo de marea viva pueda provocar erosión en el canal. Esto indica claramente que con avenidas relativamente bajas, el canal tiene una tendencia a seguir erosionando.

Tabla 4-2.-Velocidad media máxima en la sección transversal de la garganta del canal.

Periodo de retorno (años)	Velocidad máxima (m/s)		Gasto máximo (m ³ /s)	
	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta
2	0.9440	0.5647	8,440	4,508
5	1.0170	0.6130	9,034	5,292
10	1.0860	0.6970	9,727	6,064
20	1.1790	0.8060	10,664	7,102

Como resumen de los resultados obtenidos en este capítulo, se entiende que es necesaria una actuación ingenieril a fin de evitar que el canal de Cuautla siga ganando sección transversal, ya que su existencia altera severamente la circulación del agua en todo el sistema lagunar – estuarino. Se encontró como resultado de las alteraciones en la circulación del agua inducidas por el canal de Cuautla, la existencia de un límite fronterizo hidráulico que separa al sistema en dos subsistema que funcionan casi de forma independiente, lo que a su vez ha provocado que parte del volumen de agua que solía llegar al norte del sistema, ahora salga hacia el mar a través del canal de Cuautla. Por otro lado, los resultados las hipótesis establecidas inicialmente, que la erosión del canal es respuesta a condiciones específicas, es decir, sólo en periodos de lluvias severo (gran caudal de los ríos) cuando la intensidad de la corriente puede ser lo suficientemente alta para erosionar la parte inferior y/o lados del canal. Sin embargo, al diseñar alguna actuación ingenieril se debe tener en cuenta, por una lado, que la interacción entre el canal de Cuautla y las lagunas adyacentes, aun cuando no es totalmente sana, desde una perspectiva local mantienen una dinámica que vale la pena conservar hasta cierto grado, y por otro lado, que la rehabilitación de la parte norte del sistema debe estar enfocada a recuperar el volumen de agua que solía llegar hasta allí.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Debido a las alteraciones provocadas por la actividad humana en la zona del sistema lagunar estuarino de Teacapán – Agua Brava – Majahual, es necesario la toma de medidas correctoras pues, de no ser así, se gestaría un proceso de deterioro ambiental aún peor al que actualmente existe. En este sentido, es deseable intervenir mediante acciones que se conciban como una herramienta en el camino hacia la recuperación y conservación de los recursos naturales de la zona. Si bien, es claro que en términos de beneficios, el saldo ha sido negativo con las obras que se han llevado a cabo en la zona, se puede avanzar en algunas propuestas derivadas de lecciones aprendidas que pueden ser de gran ayuda para la integridad y la funcionalidad del sistema buscando que a largo plazo la zona recupere al menos parte del valor natural que hoy día ha perdido.

A partir del análisis a gran escala que se ha realizado en este trabajo, la construcción del canal de Cuautla y la inestabilidad de la misma es la causa directa de la pérdida de volumen de agua en todo el sistema lagunar al norte de dicho canal. En este sentido, puede suponerse que con el cierre del canal se lograría restablecer las condiciones ambientales que existían antes de la erosión del canal, sin embargo, hoy en día el canal es un medio que forma parte de las actividades económicas para la mayoría de los pobladores de la zona, por lo que el cierre del canal contravendría a sus intereses económicos y, a la vez surgiría la necesidad de sustituir el canal con algún otro tipo de obra, por otro lado, la evaluación de la factibilidad técnica y la estimación de la respuesta hidrológica de los acuíferos involucrados con esta acción, requieren mayor información topo-batimétrica, hidrológica, hidrodinámica y un gran esfuerzo de modelación numérica e interpretación de resultados. Por lo anterior, queda fuera del alcance de este trabajo la predicción de escenarios contemplando el cierre total y permanente del canal de Cuautla. Sin embargo, se ha realizado un análisis de su estabilidad, de donde se deduce que dicho canal, si no se interviene, seguirá creciendo para los próximos años.

Dado que la degradación de la parte norte de la zona de estudio se debe, principalmente, a la disminución en el volumen de agua que solía alimentarla; las alternativas de actuación deben estar enfocadas a recuperar dicho volumen. Pero, por otro lado, es necesario estabilizar el canal porque conforme mayor sea su geometría mayor es el volumen de agua que sale del sistema a través de él, reduciendo la posibilidad de aumentar el volumen de agua hacia la norte del sistema. En este sentido se plantea el dictamen de una serie de propuestas de actuación planteadas con el objetivo de solucionar la falta de agua en la parte norte del sistema, y a la vez, controlar la erosión del canal de Cuautla.

Las posibilidades que se consideraron como alternativas de actuación fueron:

1. El no llevar a cabo ninguna actuación en el sistema.
2. La construcción de una estructura rígida a lo largo de la garganta del canal, la cual cuenta con una compuerta.
3. La construcción de una estructura rígida al interior de la laguna de Agua Brava, en el extremo este – sur del canal de Cuautla, acompañada de un relleno entre la estructura y el canal.
4. El dragado de las lagunas y esteros del subsistema de Teacapán.
5. La construcción de 7 estructuras rígidas sumergidas equidistantes dispuesta de forma perpendicular a lo largo del eje longitudinal del estero de Cuautla.
6. La construcción de 5 pares de estructuras rígidas equidistantes perpendiculares al eje longitudinal del canal de Cuautla.

El alcance de este trabajo cubre para cada una de las posibilidades que se consideraron como alternativas de actuación la evaluación de su influencia sobre el funcionamiento hidrodinámico general del sistema lagunar y su afectación en términos dinámicos y ambientales, así como también la estimación de su inversión económica, en base al costo paramétrico de las diversas obras que la conforman. Además, se hace un intento por visualizar las relaciones entre los aspectos funcional y ambiental del sistema con los aspectos sociales y económicos de la zona a un nivel local para ofrecer un mayor marco de referencia al momento de comparar y discutir que alternativa considerada es la más adecuada.

Cabe mencionar que la evaluación numérica de las alternativas corresponde a un análisis de corto plazo, sin embargo, es suficiente para determinar si una alternativa funcionará o no. Por otro lado, para tener una mayor eficiencia numérica en el dominio de cálculo, no se consideró la parte denominada subsistema de Majahual, pero se considera que los beneficios que se registran en la parte norte del dominio numérico se extenderán hasta la parte norte del subsistema Majahual.

5.2 METODOLOGÍA

El método de análisis empleado consistió en lo siguiente:

- ✓ Se planteó una serie de alternativas de actuación tomando en cuenta los problemas que se quieren solucionar.
- ✓ Se definieron los criterios de evaluación, los cuales constituyeron la base para la valoración de las alternativas.
- ✓ Se realizó una estimación de la inversión económica para cada alternativa, a partir del costo paramétrico de las diversas obras que las conforman.
- ✓ Mediante simulaciones con el módulo hidrodinámico del modelo numérico *HDunamse* evaluó la hidrodinámica inducida por cada alternativa de actuación bajo condiciones medias y bajo el efecto de avenidas en los ríos en coincidencia con la fase de reflujos de marea. Para este fin, se definió una marea característica de la zona para todas las simulaciones, mientras que el gasto en los ríos bajo condiciones normales se representó con los gastos medios diarios que son superados el 50 % de los días del año y para representar las avenidas se utilizaron los gastos asociados a periodos de retorno definidos.
- ✓ Con el registro del comportamiento hidrodinámico del sistema obtenido en el paso anterior, se estimó la distribución de la salinidad en cada alternativa de actuación. Para este fin, se requirió la definición de las condiciones iniciales y de frontera para este parámetro en el módulo de advección – dispersión del modelo numérico. Con base en las mediciones de campo, se definieron valores para las fronteras asociadas al nivel del mar y la descarga de los ríos. La salinidad inicial dentro del sistema lagunar, se determinó con promedios de las condiciones medidas en campo.
- ✓ Finalmente se discutieron las diversas alternativas tomando en cuenta los criterios de evaluación, a fin de resaltar las ventajas y desventajas de una alternativa respecto de las otras, y a la vez, se establecieron algunas recomendaciones que ayudarían a optimizar la actuación.

5.3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Los criterios que se tienen en cuenta para la valoración de cada alternativa de actuación son:

- ✓ El potencial para controlar la erosión del canal de Cuautla, y para aumentar el volumen de agua hacia las lagunas y esteros del norte del sistema.
- ✓ Los cambios sobre el funcionamiento hidrodinámico general del sistema:
- ✓ Los cambios en la distribución de la salinidad en los cuerpos de agua.
- ✓ El riesgo que supone para la actividad económica de la zona.
- ✓ La inversión económica para realizar las diversas obras que la conforman.

La valoración de las distintas alternativas planteadas se podría realizar en base a algunos otros criterios más, pero se ha considerado que estos criterios de evaluación son los más apropiados.

5.4 ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 1

La alternativa 1 consiste en no llevar a cabo ninguna actuación en el sistema.

Si el sistema continúa funcionando bajo las condiciones actuales, el canal de Cuautla seguiría creciendo en los próximos años principalmente durante verano, cuando las corrientes de reflujos de marea tienen la suficiente fuerza para erosionar el canal, debido al incremento de volumen de agua que se presenta por las precipitaciones y descarga de los ríos.

Consecuentemente, a medida que el canal crece, mayor será el volumen del aporte fluvial que se desvía hacia el canal, lo que causará que se modifiquen los patrones de inundación dejando de inundarse especialmente aquellas zonas que se inundan por el efecto combinado de la marea y la llegada de las aguas de los ríos.

Es bien sabido que la falta de inundación en zonas intermareales puede provocar, por un lado, el hundimiento paulatino del suelo, originado por la falta de aporte de sedimentos, y por otro lado, la desecación del suelo por la falta de agua. El sistema de Teacapán – Agua Brava no sería la excepción, y estaría sujeto a los impactos mencionados.

Por lo tanto, mediante esta actuación no se mejorarían las condiciones ambientales del sistema; se continuaría con la tendencia actual de pérdida de sus bienes y servicios ambientales.

5.5 ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 2

En esta alternativa se propone la construcción de una estructura rígida a lo largo de la sección de la garganta del canal, como se puede apreciar en la **Figura 5-1**.

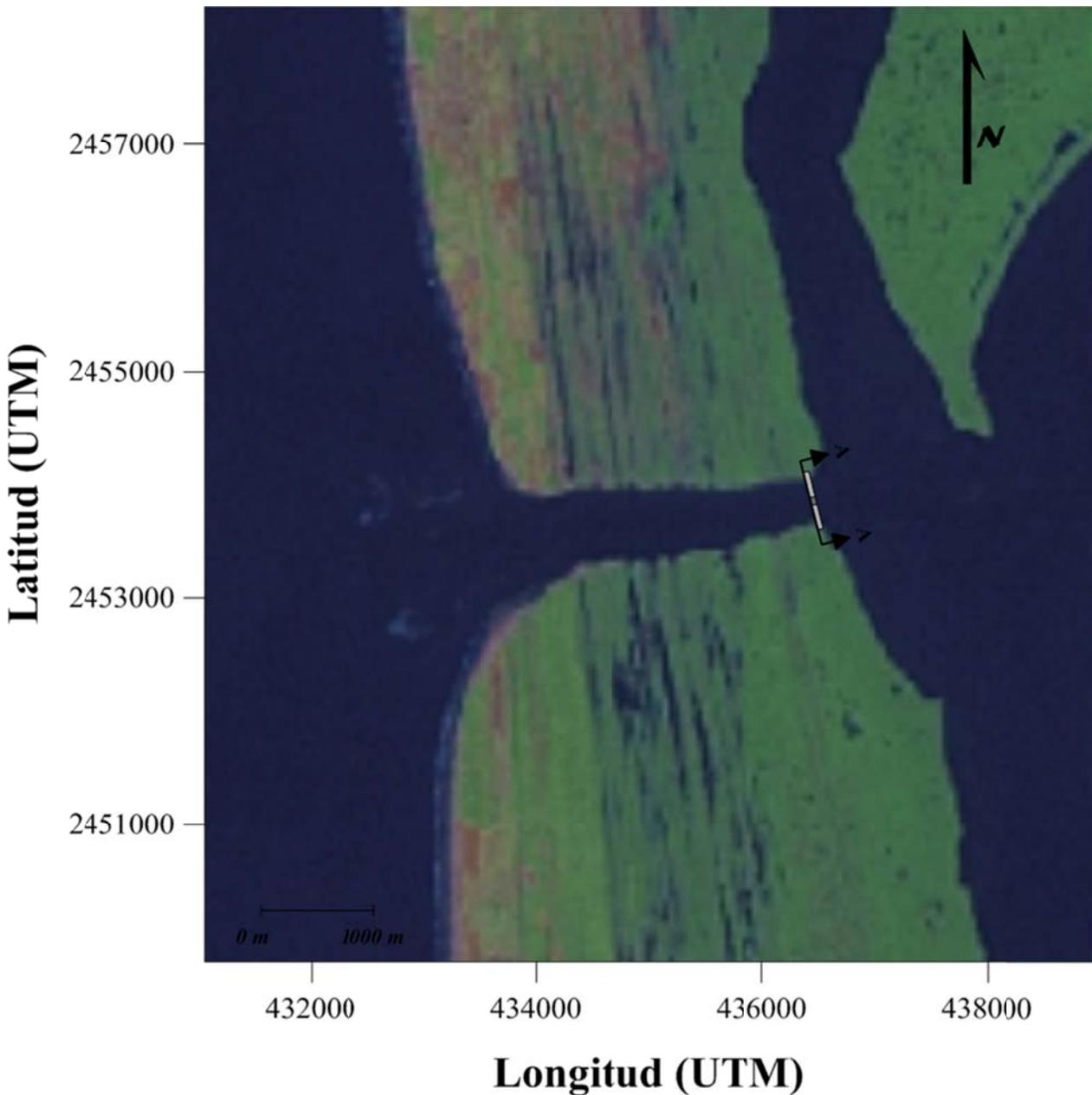


Figura 5-1.- Ubicación de la alternativa de actuación 2.

La estructura se desplanta a una profundidad de 23 m y tiene una longitud de 700 m, como se puede apreciar en la **Figura 5-2**, su ancho estimado oscila entre los 4 y los 6 m. Esta estructura está provista de una compuerta, con la cual se pretende controlar la entrada directa de agua marina hacia el subsistema de Cuautla. De esta manera el sistema tendría únicamente comunicación abierta con el mar a través de la boca de Teacapán, y a través del canal de Cuautla sería de forma eventual y restringida. El costo paramétrico estimado de las diversas obras englobadas en esta alternativa de

actuación es de 280 millones de pesos mexicanos. A continuación se explican los resultados obtenidos del modelado numérico.

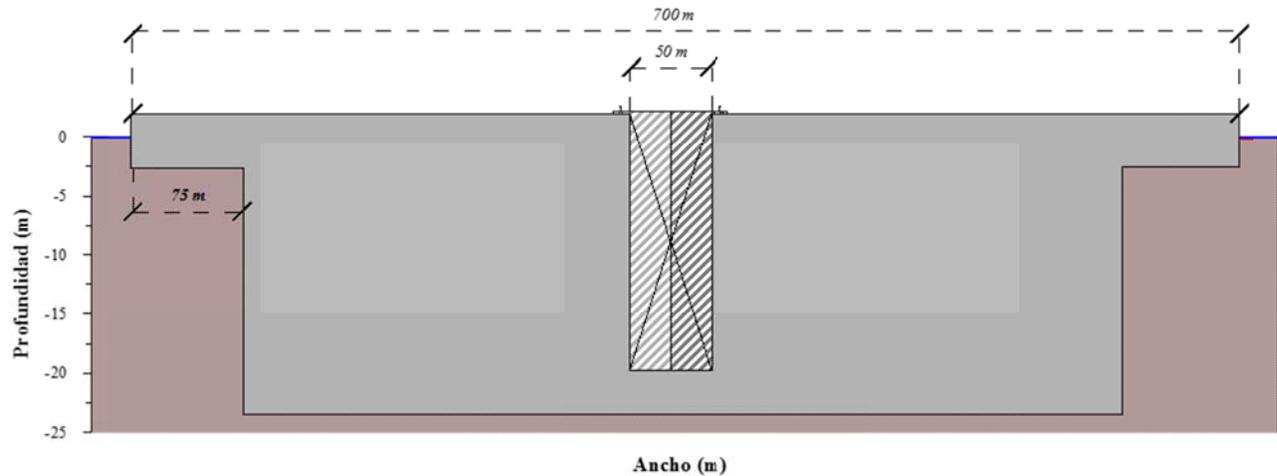
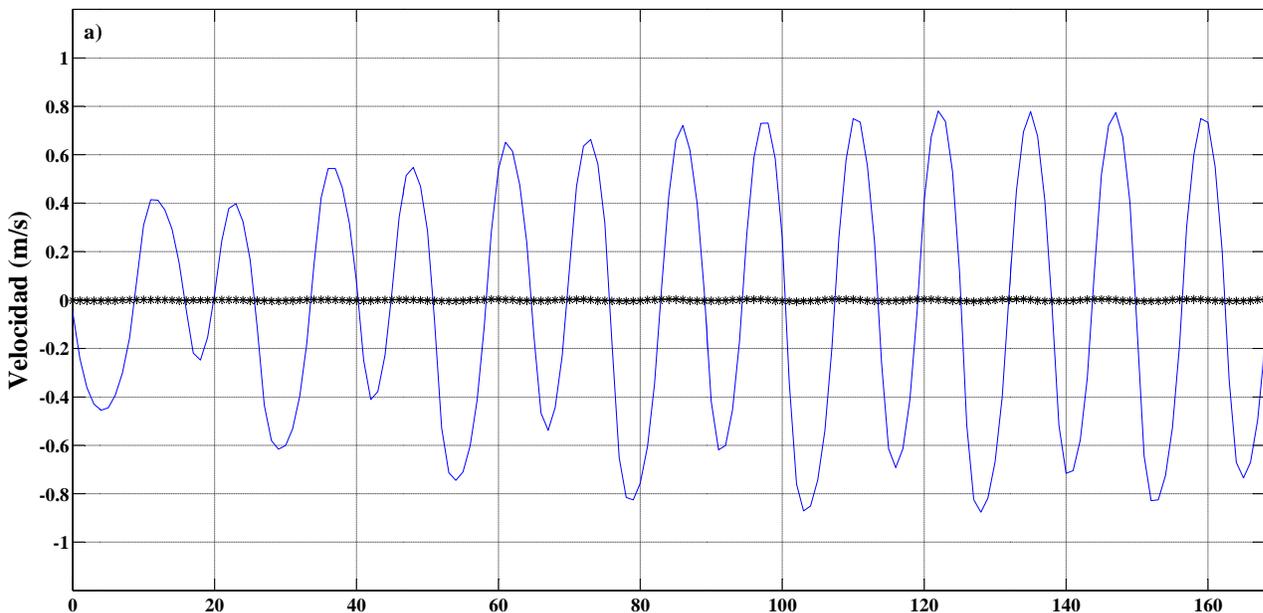


Figura 5-2.-Corte transversal A – A de la alternativa de actuación 2.

La **Figura 5-3** muestra la velocidad media sobre una sección transversal del canal de Cuautla antes y después de la actuación. En la **Figura 5-3a** se puede observar que la velocidad máxima es cercana a cero cuando la compuerta de la estructura se encuentra cerrada, mientras que con la compuerta abierta la velocidad en la sección del canal es casi la mitad de la velocidad antes de la actuación como se puede observar en la **Figura 5-3b**.

En cuanto al gasto que entra directamente al subsistema de Cuautla a través de la compuerta de la estructura, este representa, al igual que la velocidad media de la sección transversal del canal, casi la mitad del gasto que entraba al subsistema antes de la actuación como se puede observar en la **Figura 5-4**.



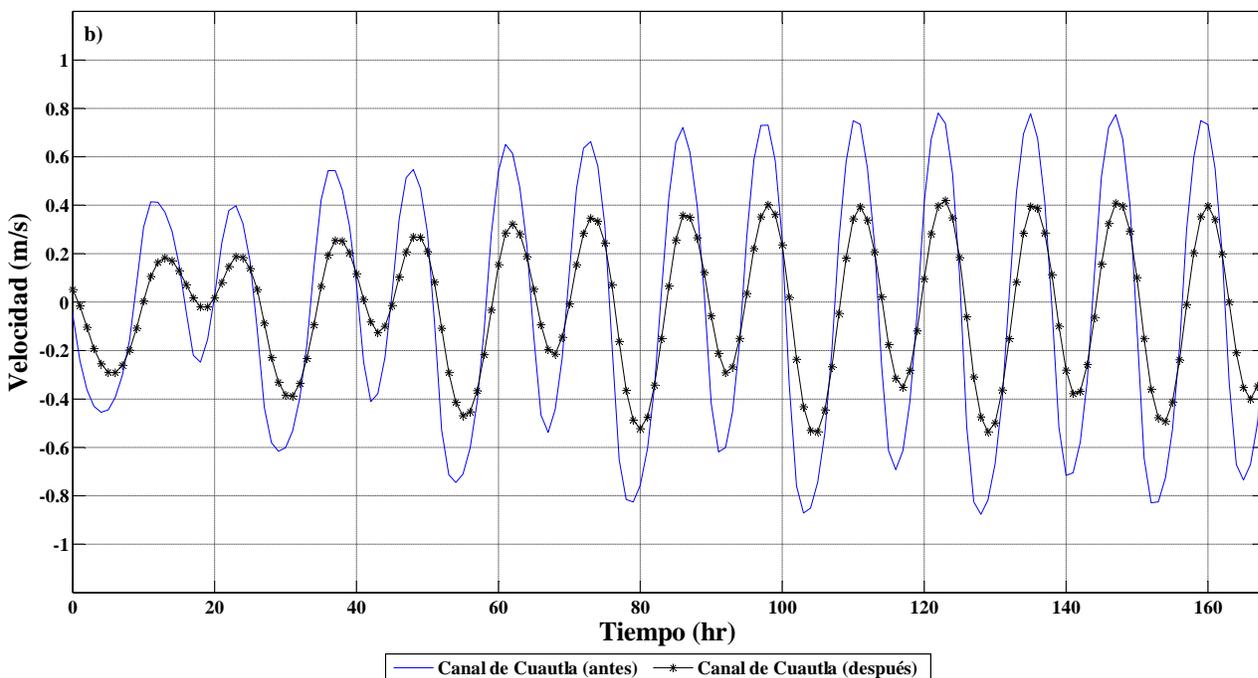


Figura 5-3.-Comparación de la velocidad media a través del canal de Cuautla antes y después de la actuación: a) con la compuerta cerrada, y b) con la compuerta abierta.

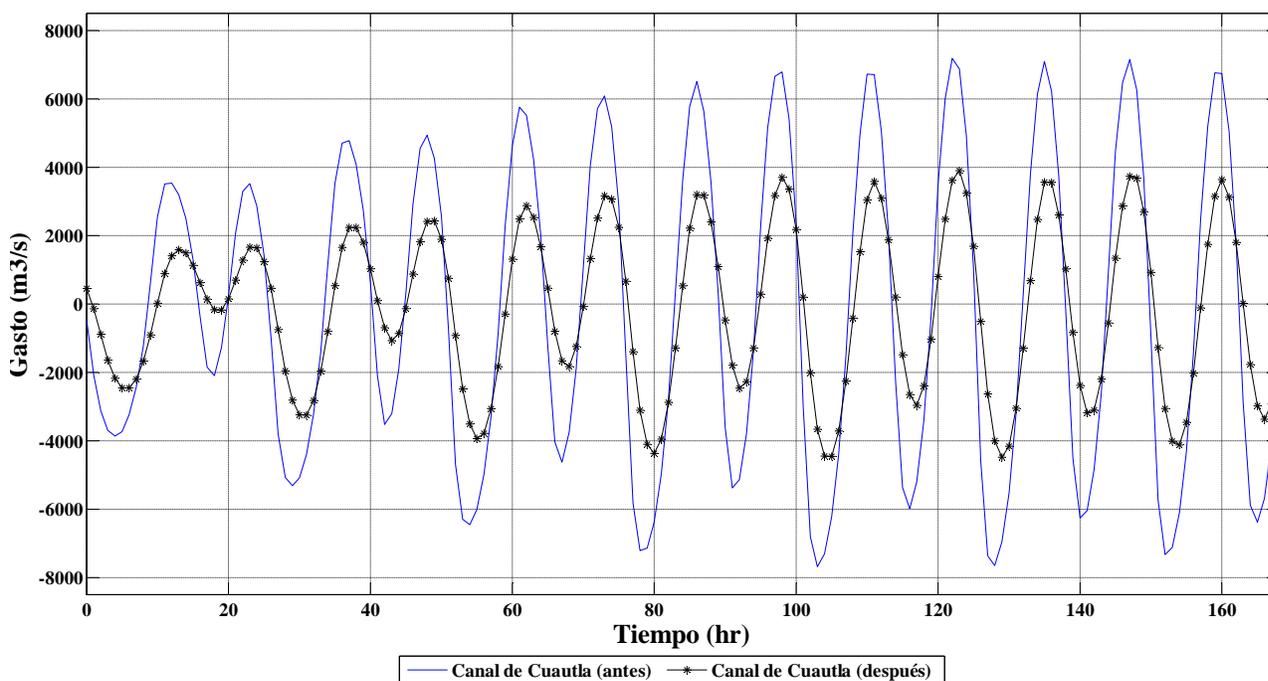


Figura 5-4.-Comparación del gasto a través del canal de Cuautla antes y después de la actuación con la compuerta abierta.

En la **Figura 5-5** se muestra la variación de la superficie libre del agua al interior de la laguna de Agua Brava, con el fin de observar el comportamiento del nivel del agua en la laguna antes y después de la actuación. Obsérvese que cuando la compuerta de la estructura se encuentra cerrada el nivel del agua de la laguna tiende a aumentar, y el efecto de la marea a través de la boca de Teacapán tiene muy poca influencia en el sur del sistema. Mientras que con la compuerta abierta el

efecto de la marea entra directamente a la laguna, sin embargo la variación en la superficie libre es casi la mitad de antes de la actuación.

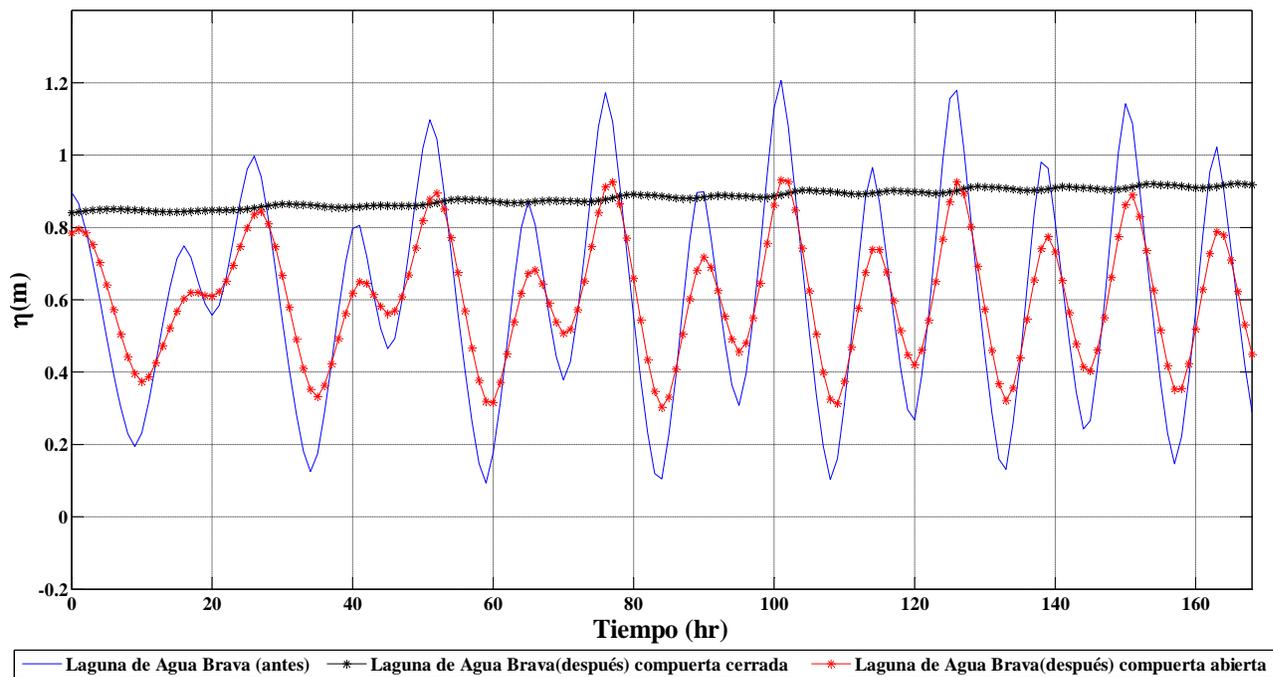


Figura 5-5.- Comparación de la superficie libre en la laguna de Agua Brava antes y después de la actuación.

Respecto al impacto de esta actuación sobre la parte norte del sistema, al comparar el gasto que pasa a través de una sección del estero de Agua Grande, como se muestra en la **Figura 5-6**, no se aprecia diferencia significativa antes y después de la actuación, por lo tanto el volumen de agua hacia las lagunas y esteros al norte del sistema prácticamente no aumenta.

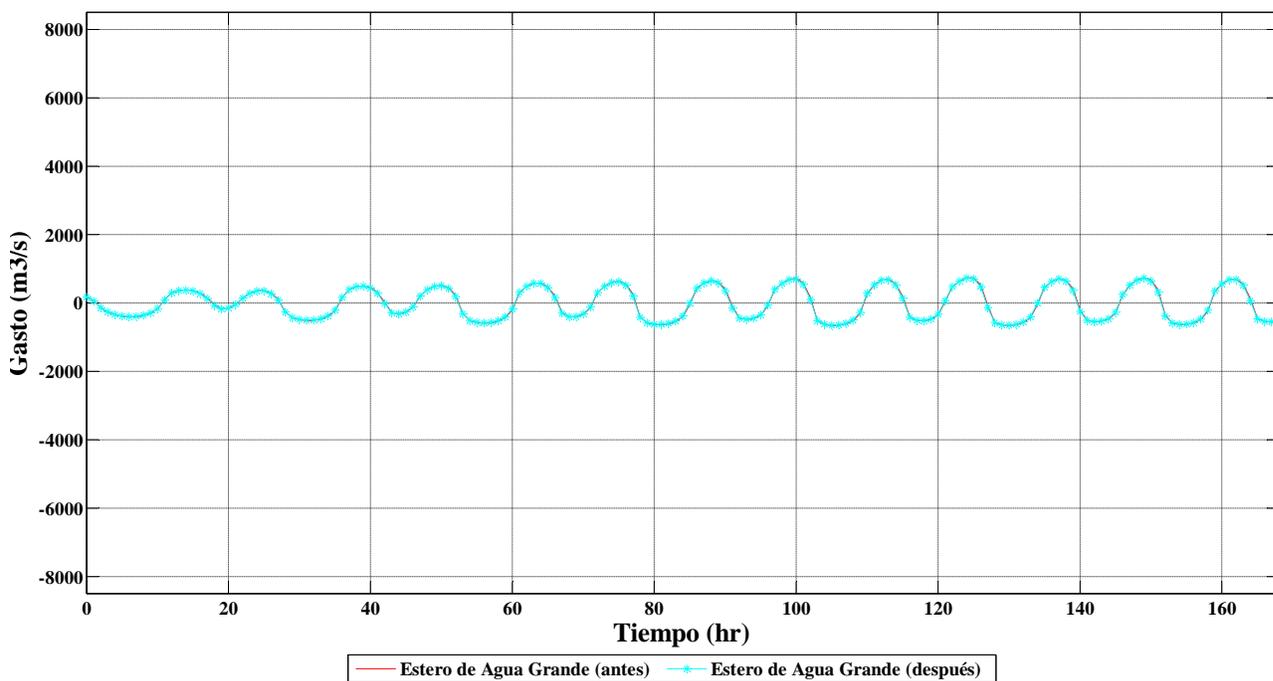
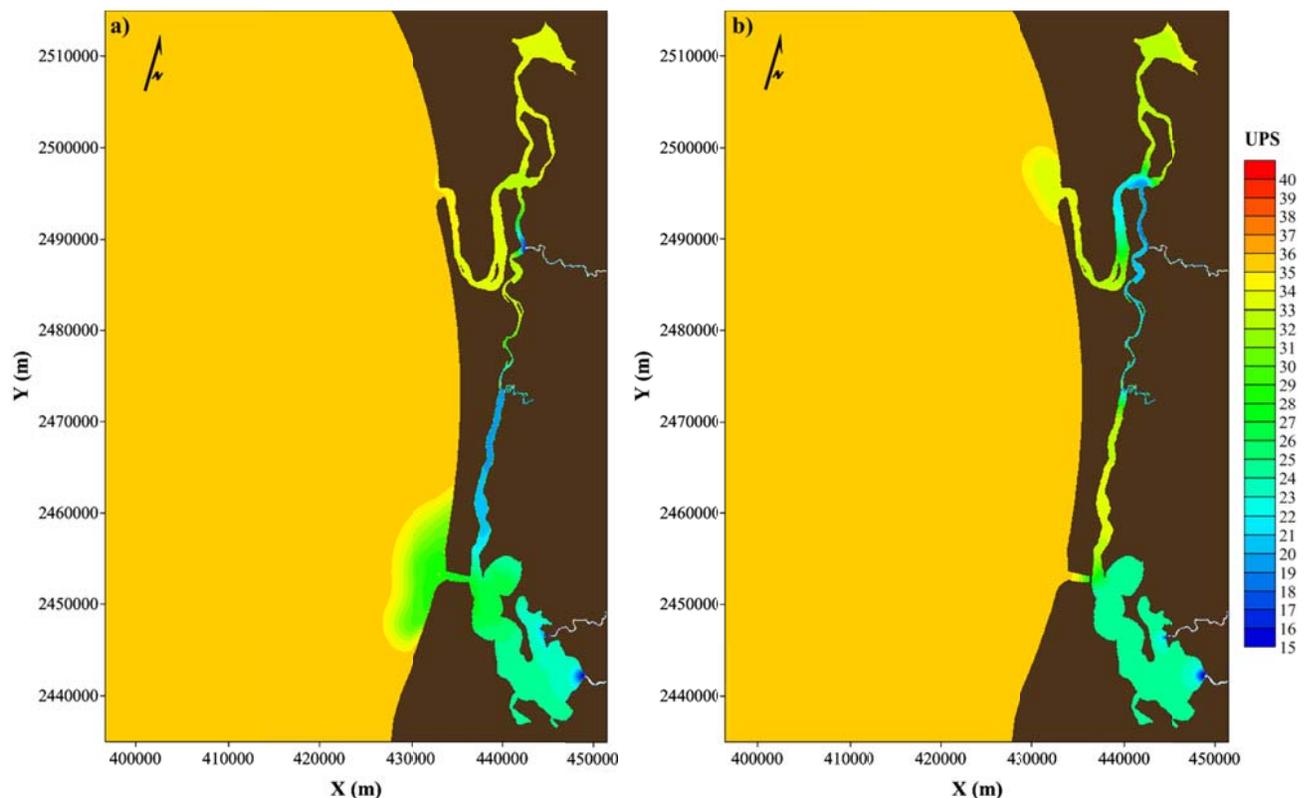


Figura 5-6.- Comparación del gasto a través del estero de Agua Grande antes y después de la actuación.

En la **Figura 5-7** se muestra la distribución de la salinidad en el sistema antes y después de la actuación. Obsérvese en la **Figura 5-7b** que en el caso de que la compuerta de la estructura se encuentre cerrada los niveles de salinidad en los cuerpos de agua del subsistema de Teacapán tienden a disminuir, al grado de que gran parte del subsistema predominan los niveles de salinidad del orden de los 20 ups, mientras que al sur del sistema se puede observar que los niveles de salinidad a lo largo del estero de Cuautla y la laguna de Agua Brava en general varían muy poco, manteniéndose del orden de los 33 ups y 24 ups respectivamente, a excepción de las proximidades con los ríos, donde las condiciones son menos salinas del orden de los 16 ups. Esta distribución en la salinidad del agua en el sistema se debe a que casi todo el volumen de agua proveniente de las descargas de los ríos Acaponeta y Cañas tiende a fluir hacia el norte del sistema y a salir hacia el mar a través de la boca de Teacapán., y solo una parte de este volumen se desvía más al norte hacia la laguna de Agua Grande, y por otra parte, el sur del sistema poco resiente el efecto de la marea a través de la boca de Teacapan , y al restringir el paso de agua marina a través del canal de Cuautla, el aporte de agua dulce de los ríos Bejuco y Rosamorada es la principal fuente que alimenta esta parte del sistema, por lo que poco a poco los niveles de salinidad disminuyen.

En el caso de que la compuerta de la estructura se encuentre abierta, como se muestra en la **Figura 5-7c**, obsérvese que la distribución de la salinidad en el sistema es muy similar a la distribución antes de la actuación, es decir, en los cuerpos de agua del subsistema de Teacapán predominan los niveles de salinidad del orden de los 33 ups, debido a la falta de aporte de agua menos salina, mientras que al sur en el subsistema de Cuautla, el efecto de la marea a través de la compuerta provoca que los niveles de salinidad en el estero de Cuautla se tornen relativamente bajas del orden de los 20 ups +/- 4 ups, debido a que casi todo el volumen de agua proveniente de la descarga del río Acaponeta tiende a fluir hacia el sur del sistema y a salir hacia el mar a través del canal de Cuautla. En cuanto a la laguna de Agua Brava los niveles de salinidad varían mucho entre los 18 y 30 ups.



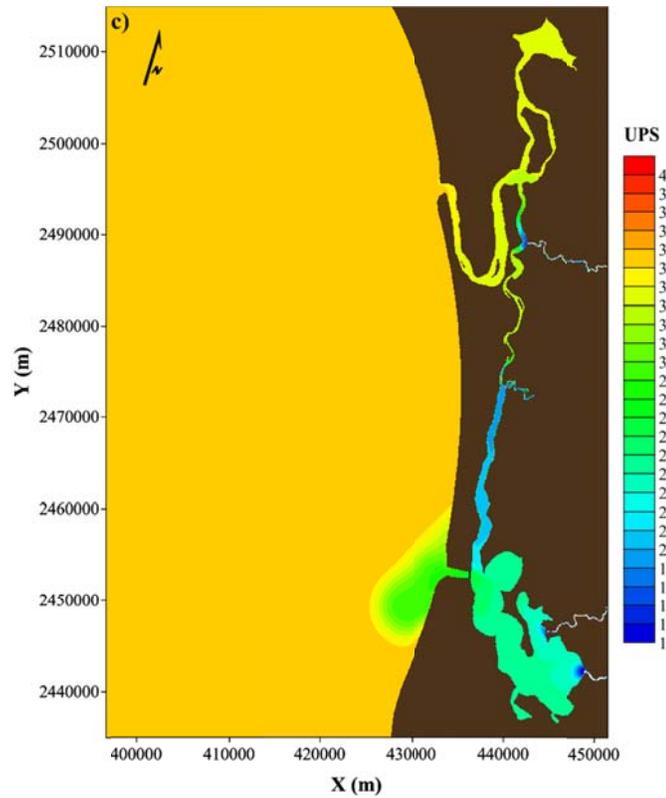


Figura 5-7.-Distribución de la salinidad: a) antes de la actuación, b) después de la actuación con la compuerta cerrada, y c) después de la actuación con la compuerta abierta.

5.6 ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 3

En esta alternativa se propone la construcción de una estructura de 1,000 m de longitud al interior de la laguna de Agua Brava, en el extremo este – sur del canal de Cuautla, como se muestra en la **Figura 5-8**.

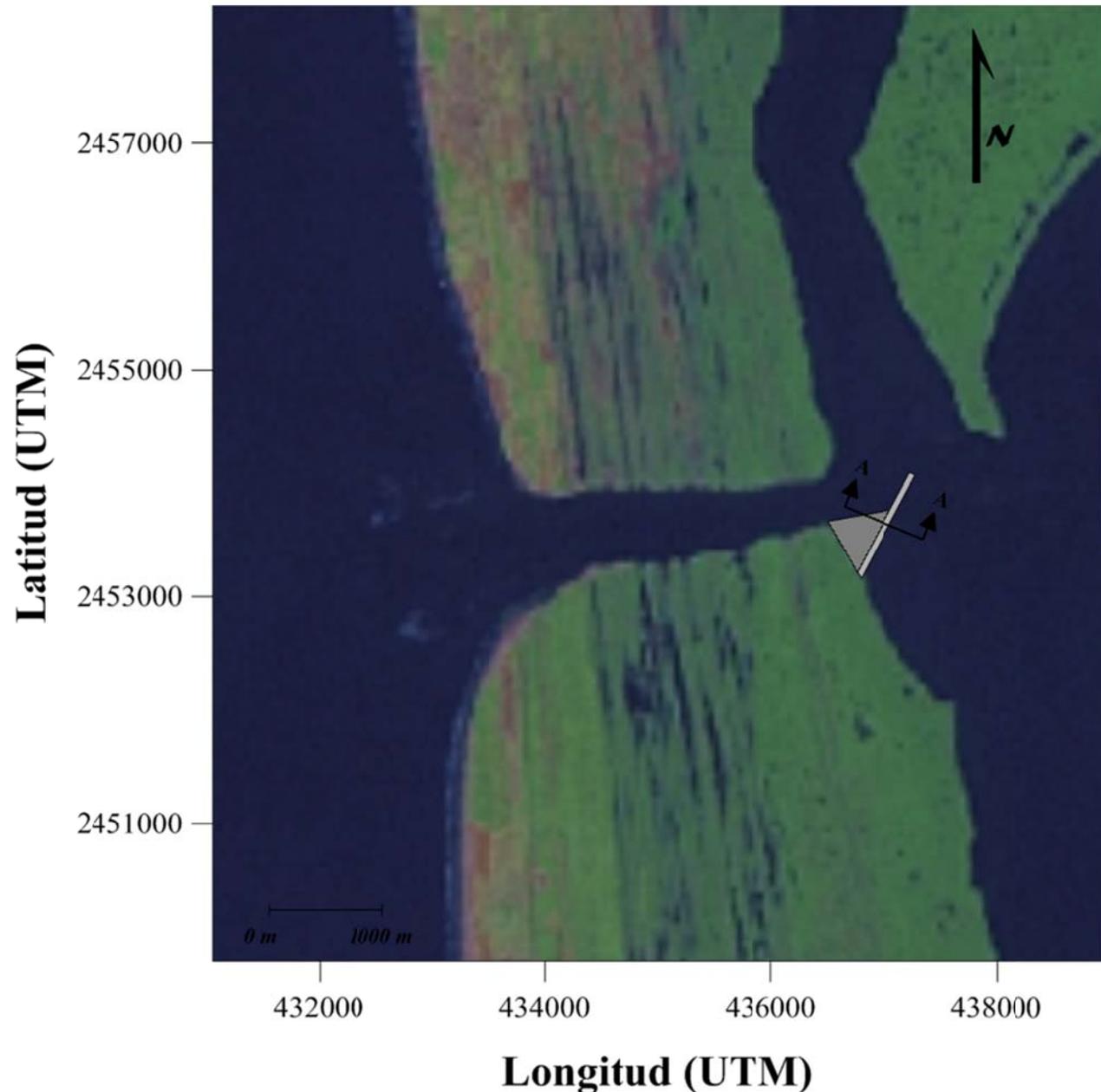


Figura 5-8.- Ubicación de la alternativa de actuación 3.

La estructura se desplanta a una profundidad de 12 m y su ancho estimado oscila entre los 4 y 6 m, y se acompaña de un relleno de 1,500,000 m³ entre la estructura y el canal, como se muestra en la **Figura 5-9**, con el fin de evitar algún efecto de la corriente que pudiera generar la separación de la estructura con la orilla de la laguna, y provocar su aislamiento. Con esta estructura se pretende disminuir el prisma de marea del subsistema de Cuautla, y a la vez aumentar el volumen de agua que se desvía en dirección norte hacia el estero de Cuautla. El costo paramétrico estimado de las

diversas obras englobadas en esta alternativa de actuación es de 232 millones de pesos mexicanos. A continuación se explican los resultados obtenidos del modelado numérico.

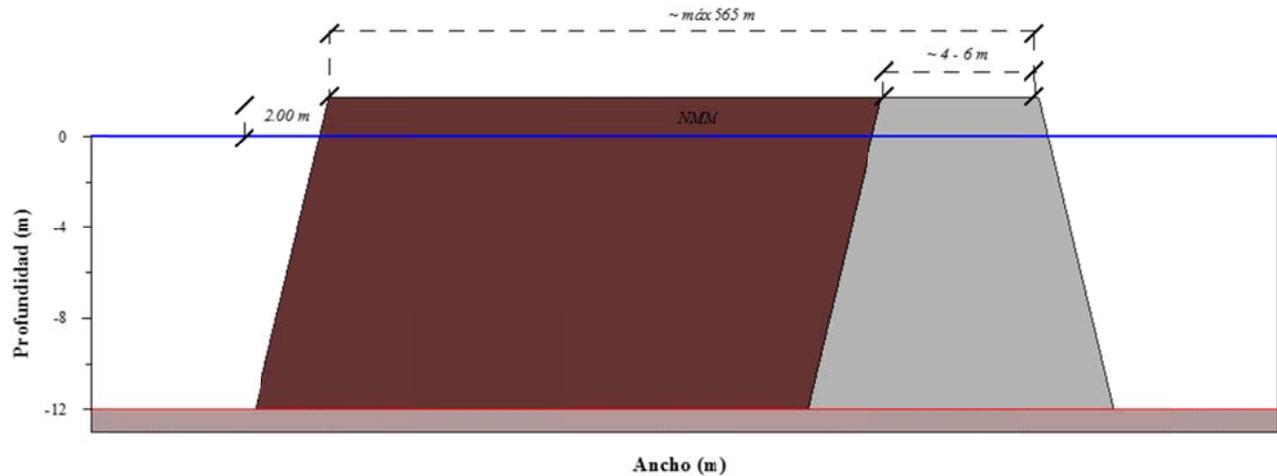


Figura 5-9.-Corte transversal A – A de la alternativa de actuación 3.

Al comparar el volumen de agua que pasa en cada fase de marea o gasto a través del estero de Cuautla y la laguna de Agua Brava, como se muestra en la **Figura 5-10**, se puede observar que después de la actuación el gasto en el estero aumenta alrededor de un 10%, mientras que en la laguna disminuye casi un 30%.

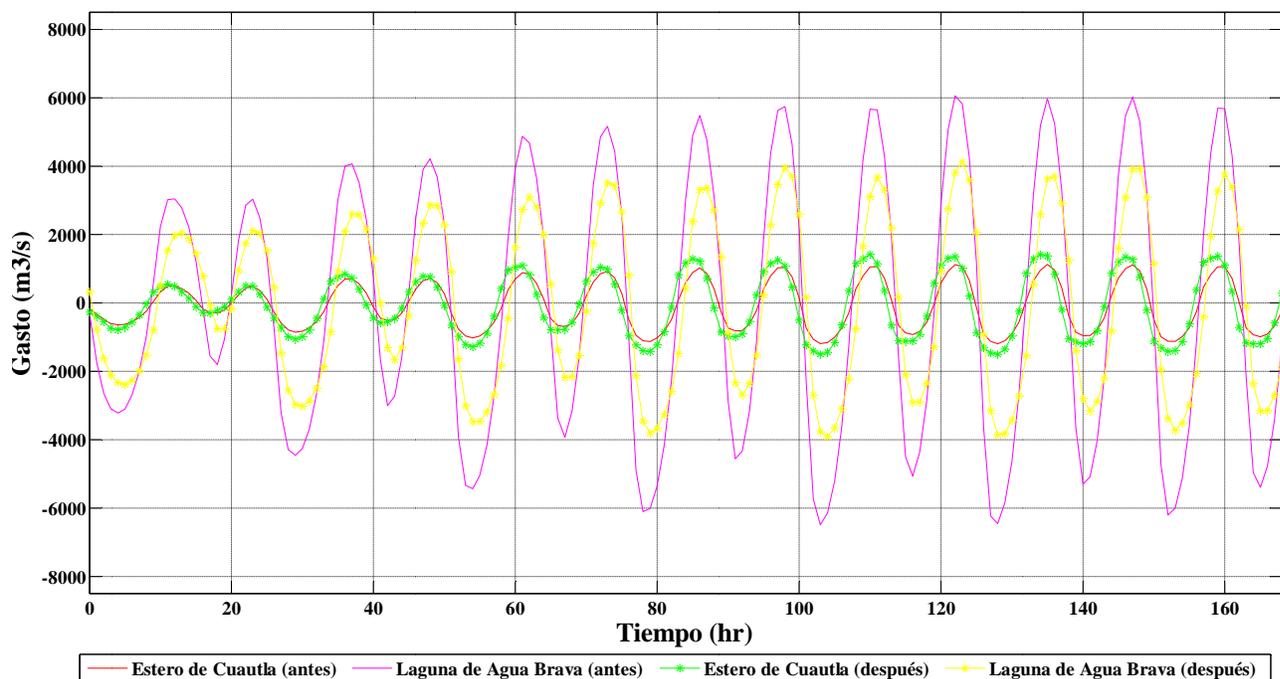


Figura 5-10.-Comparación del gasto a través del estero de Cuautla y la laguna de Agua Brava antes y después de la actuación.

Dado que el gasto en el estero y la laguna representan aproximadamente el 20% y 80% del prisma de marea respectivamente, el prisma de marea que pasa a través del canal de Cuautla disminuye

casi un 30%, y en consecuencia la velocidad en la misma proporción, como se puede apreciar en las **Figura 5-11** y **Figura 5-12**.

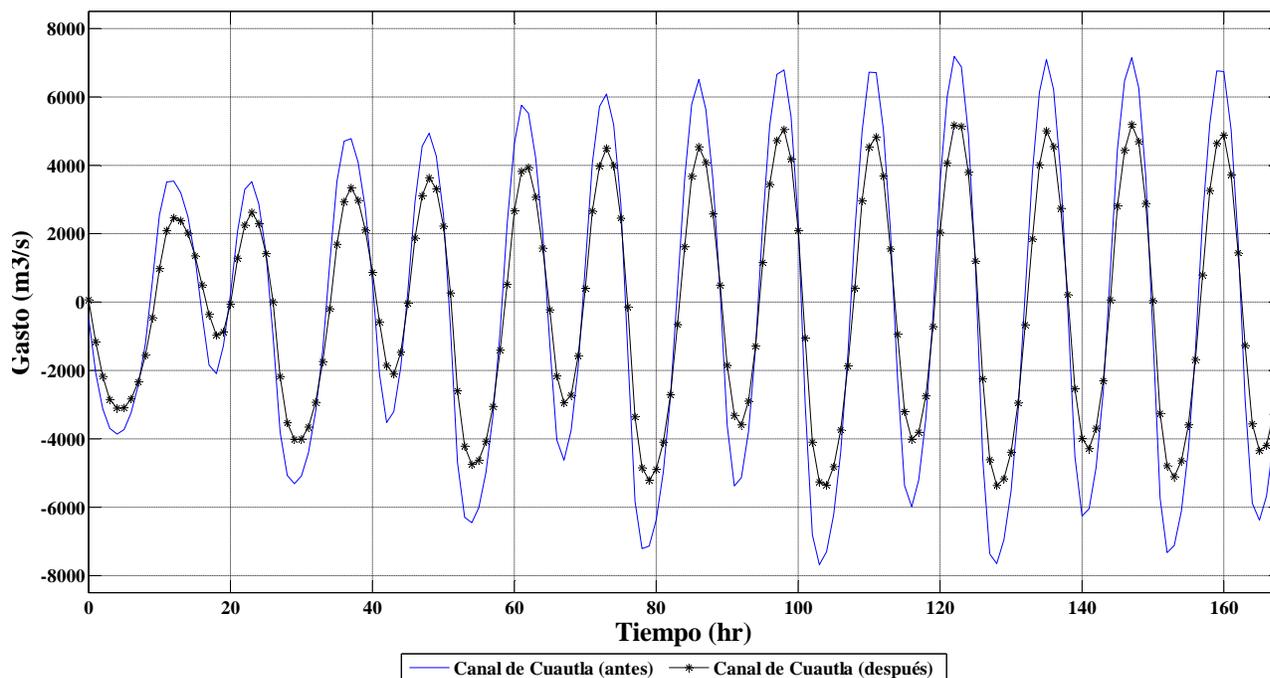


Figura 5-11.-Comparación del gasto a través del canal de Cuautla antes y después de la actuación.

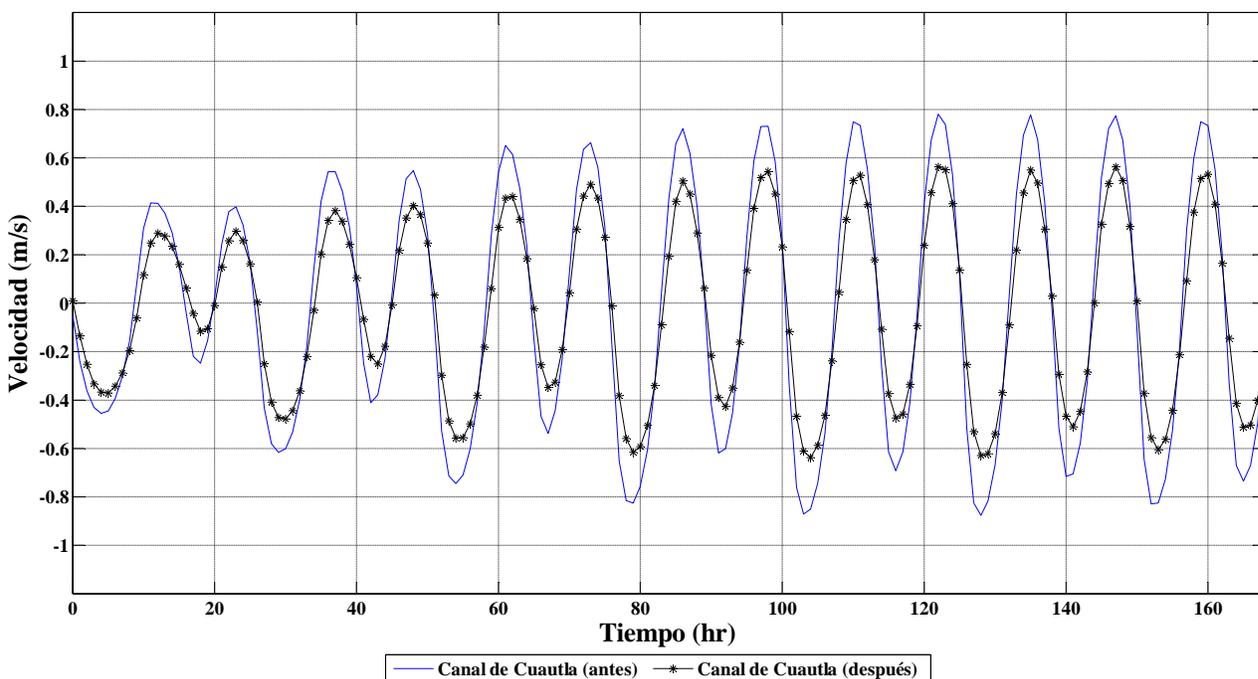


Figura 5-12.-Comparación de la velocidad media a través del canal de Cuautla antes y después de la actuación.

Respecto al impacto de esta actuación sobre la parte norte del sistema, se puede observar en la **Figura 5-13** que el gasto en una sección del estero de Agua Grande no existe diferencia significativa antes y después de la actuación, por lo que el volumen de agua que viaja hacia el norte del sistema prácticamente no aumenta.

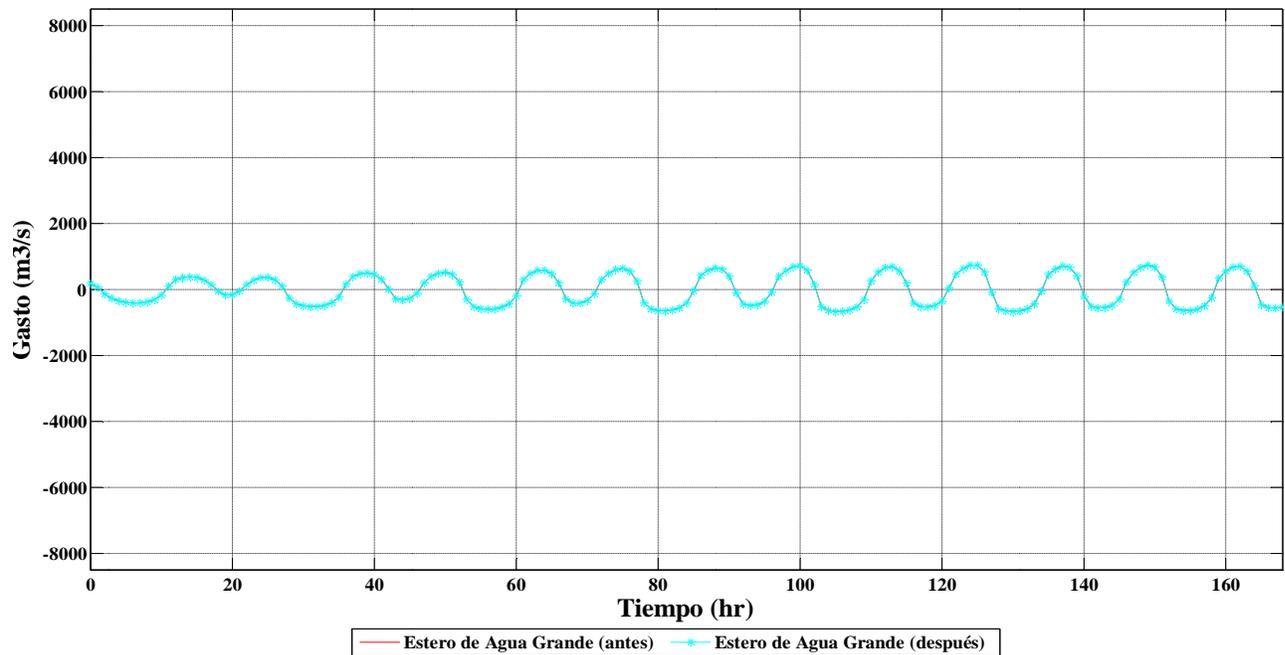


Figura 5-13.-Comparación del gasto a través del estero de Agua Grande antes y después de la actuación.

En cuanto a las condiciones de salinidad en el sistema al comparar las distribuciones de salinidad que se muestran en la **Figura 5-14**, se puede observar que después de la actuación no se presenta ningún cambio en la parte norte denominada subsistema de Teacapán, la salinidad sigue siendo muy homogénea (del orden de 34 ups), mientras que al sur en el subsistema de Cuautla, la salinidad proveniente del agua de mar penetra menos en la laguna de Agua Brava debido a la estructura, aunque las condiciones en la laguna siguen siendo igualmente heterogéneas del orden de 24 ups +/- 6 ups.

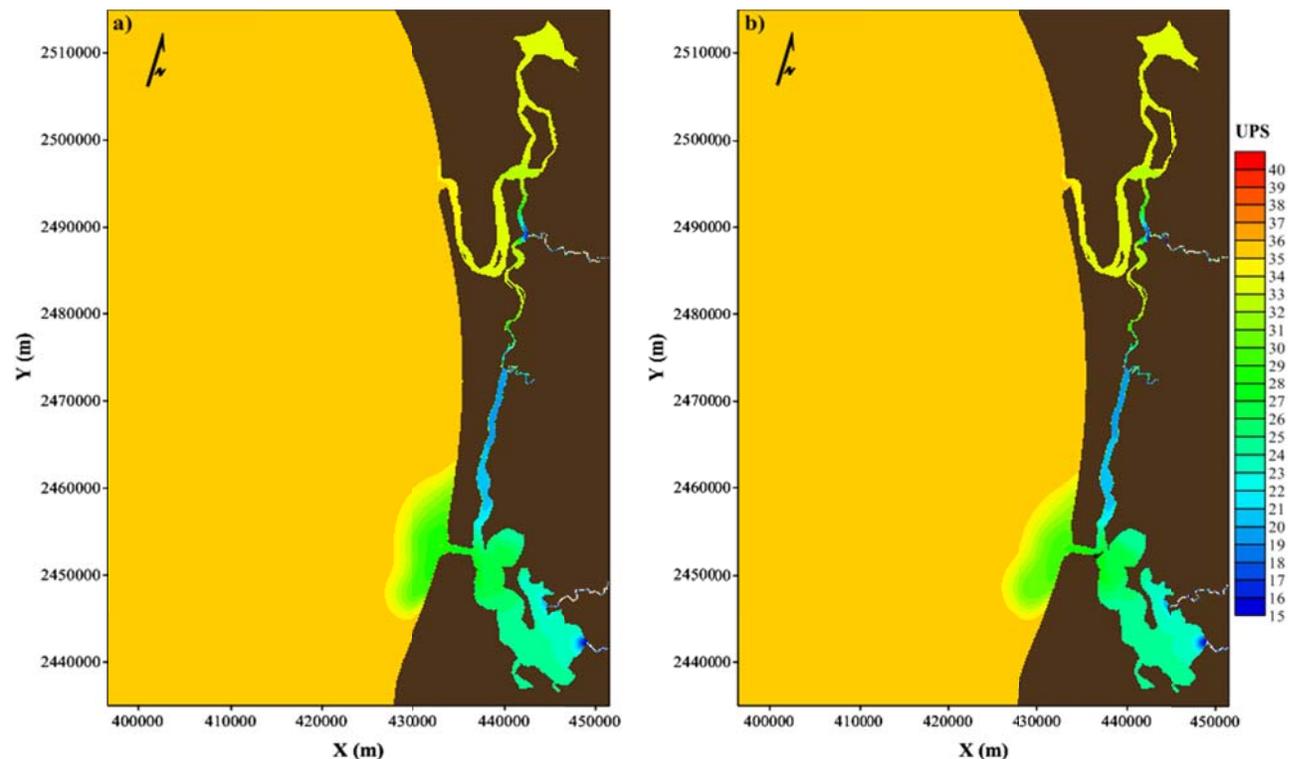


Figura 5-14.- Distribución de la salinidad: a) antes de la actuación, b) después de la actuación.

Por último, con esta actuación, en caso de presentarse una descarga fluvial importante en el sistema, como se puede apreciar en la **Tabla 5-1**, se lograría reducir su impacto dado que las velocidades que se presentaría para avenidas con periodos de 2, 5, 10 y hasta 20 años no serían suficientes para provocar que el canal se erosione. Cabe recordar que la velocidad que se considera umbral de erosión es de 1 m/s.

Tabla 5-1.-Velocidad media máxima en la sección transversal de la garganta del canal.

Periodo de retorno (años)	Antes de la actuación				Después de la actuación			
	Velocidad máxima (m/s)		Gasto máximo (m ³ /s)		Velocidad máxima (m/s)		Gasto máximo (m ³ /s)	
	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta
2	0.9350	0.4857	8,196	4,139	0.6793	0.3933	5,792	3281
5	1.0170	0.6130	9,034	5,273	0.7540	0.5240	6,402	4,483
10	1.0860	0.6970	9,727	6,064	0.8350	0.6100	7,166	5,284
20	1.1790	0.8060	10,664	7,102	0.9440	0.7230	8,037	6,313

5.7 ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 4

La alternativa 4 consiste en extraer material del fondo a la cota -10 m mediante dragado, sobre el área del subsistema de Teacapán, como se muestra en la **Figura 5-15**. Con este dragado se pretende aumentar el prisma de marea del subsistema de Teacapán, y reducir el del subsistema de Cuautla al modificar el punto que separa a ambos subsistemas. El costo paramétrico estimado de las diversas obras englobadas en esta alternativa de actuación es de 8,775 millones de pesos mexicanos. A continuación se explican los resultados obtenidos del modelado numérico.

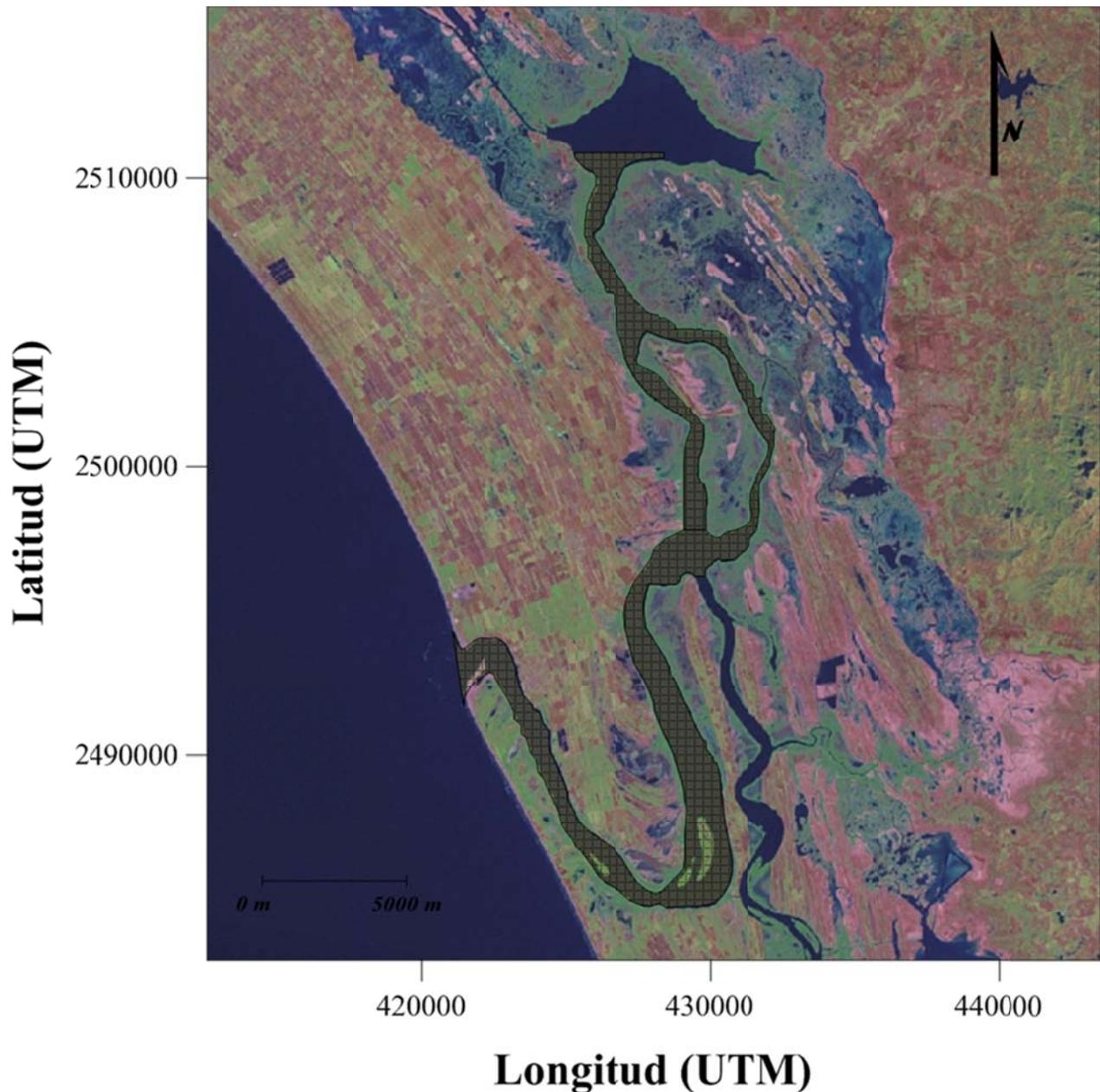


Figura 5-15.-Ubicación de la alternativa de actuación 4.

Al comparar el gasto que pasa a través de la boca de Teacapán antes y después de la actuación, como se muestra en la **Figura 5-16**, el gasto a través de la boca aumenta casi el doble después de la actuación.

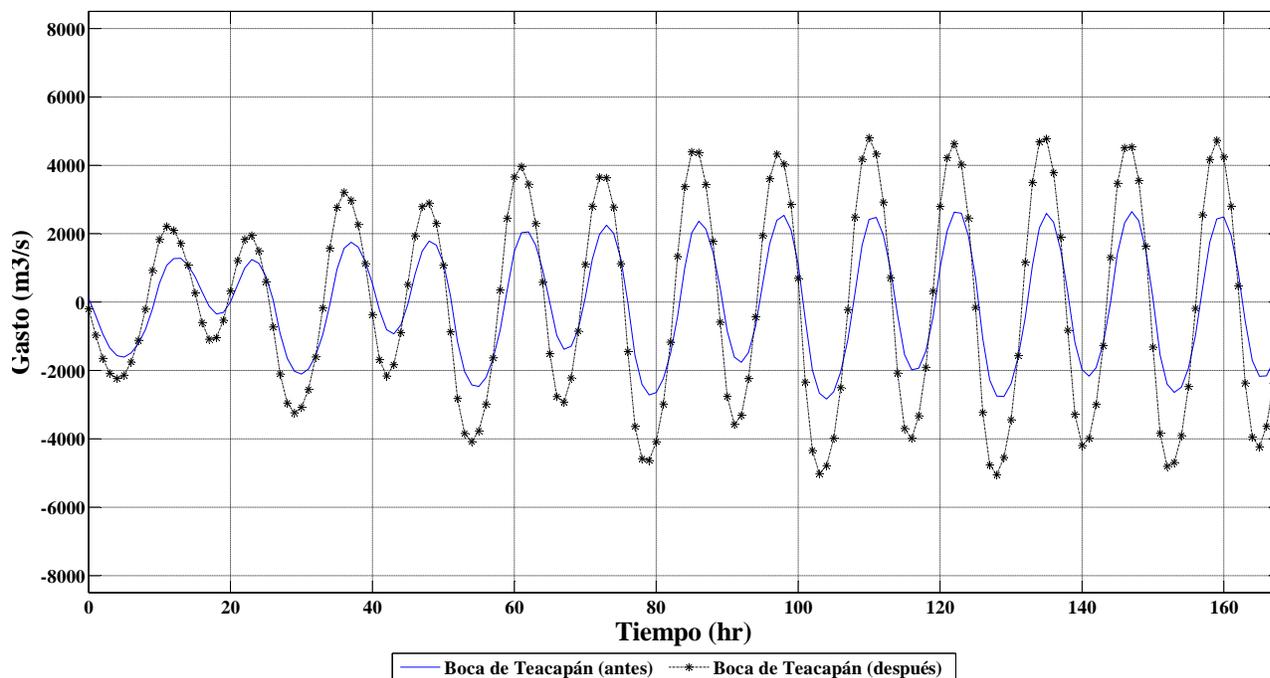


Figura 5-16.-Comparación del gasto a través de la boca de Teacapán antes y después de la actuación.

Con esta actuación se logra a corto plazo aumentar el intercambio de agua hacia el norte del sistema alrededor de un 65%, y a la vez reducir los tiempos entre pleamar y bajamar. Para ilustrar esto en la **Figura 5-17** se presenta una comparación del gasto en una sección del estero de Agua Grande antes y después de la actuación.

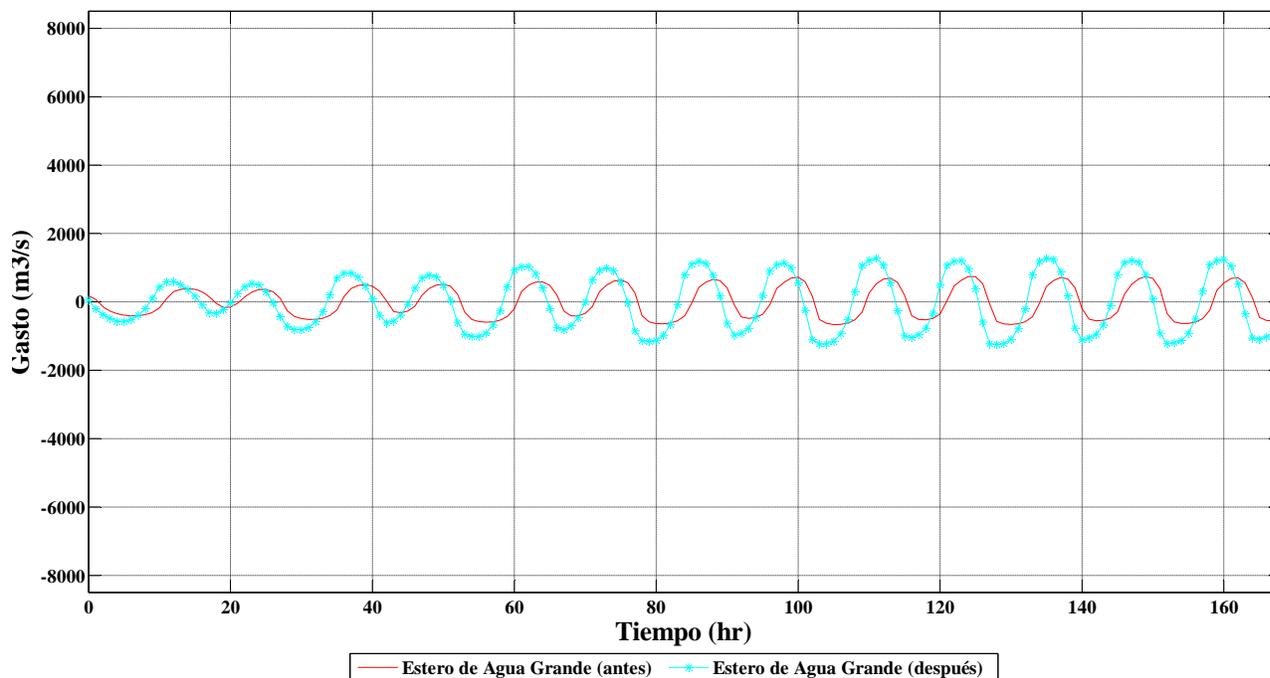


Figura 5-17.- Comparación del gasto a través del estero de Agua Grande antes y después de la actuación.

En cuanto al impacto de esta actuación al sur del sistema, en la **Figura 5-18** se puede observar que se logra modificar el punto fronterizo entre ambos subsistemas al aumentar el prisma de marea del subsistema de Teacapán, sin embargo, solo se consigue reducir las velocidades en el canal de Cuautla un 1% como se puede apreciar en la **Figura 5-19**.

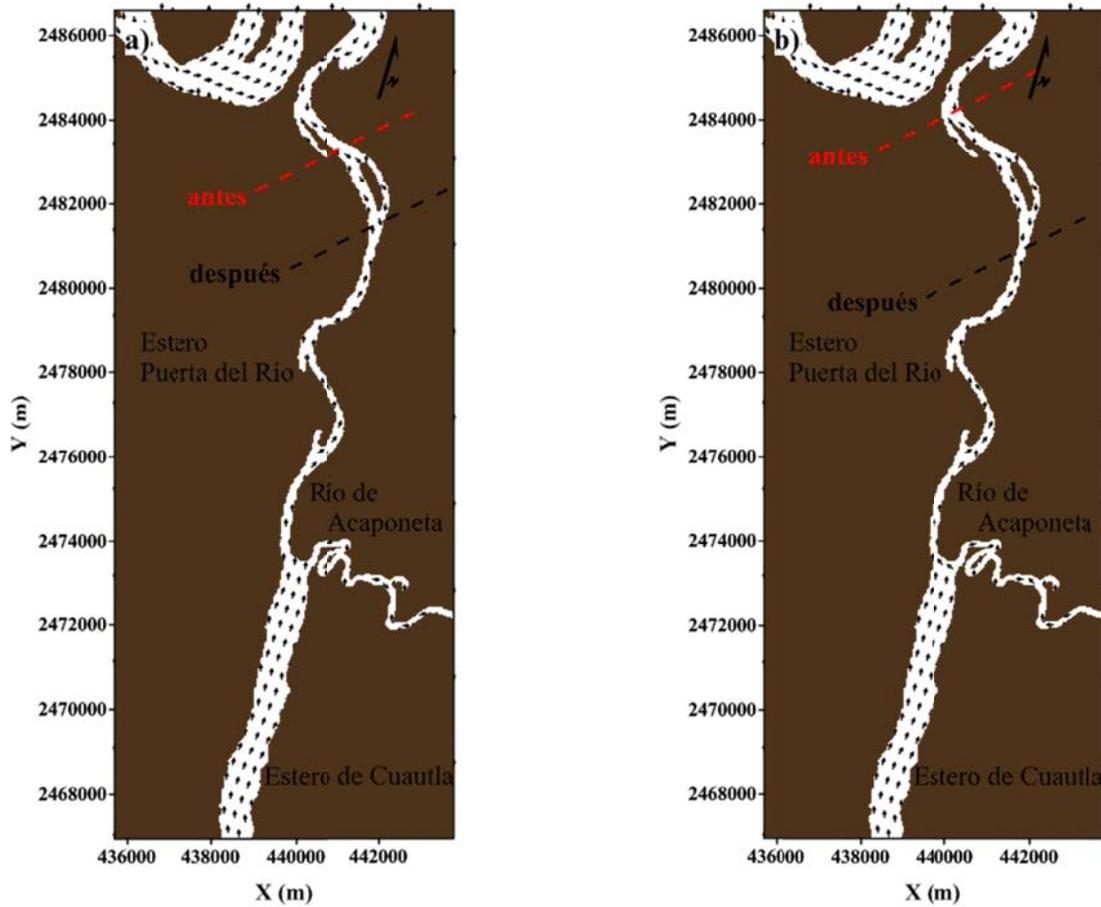


Figura 5-18.- Límites de la frontera entre los subsistemas de Teacapán y Cuautla marcado con línea discontinua para: (a) marea viva y (b) marea muerta.

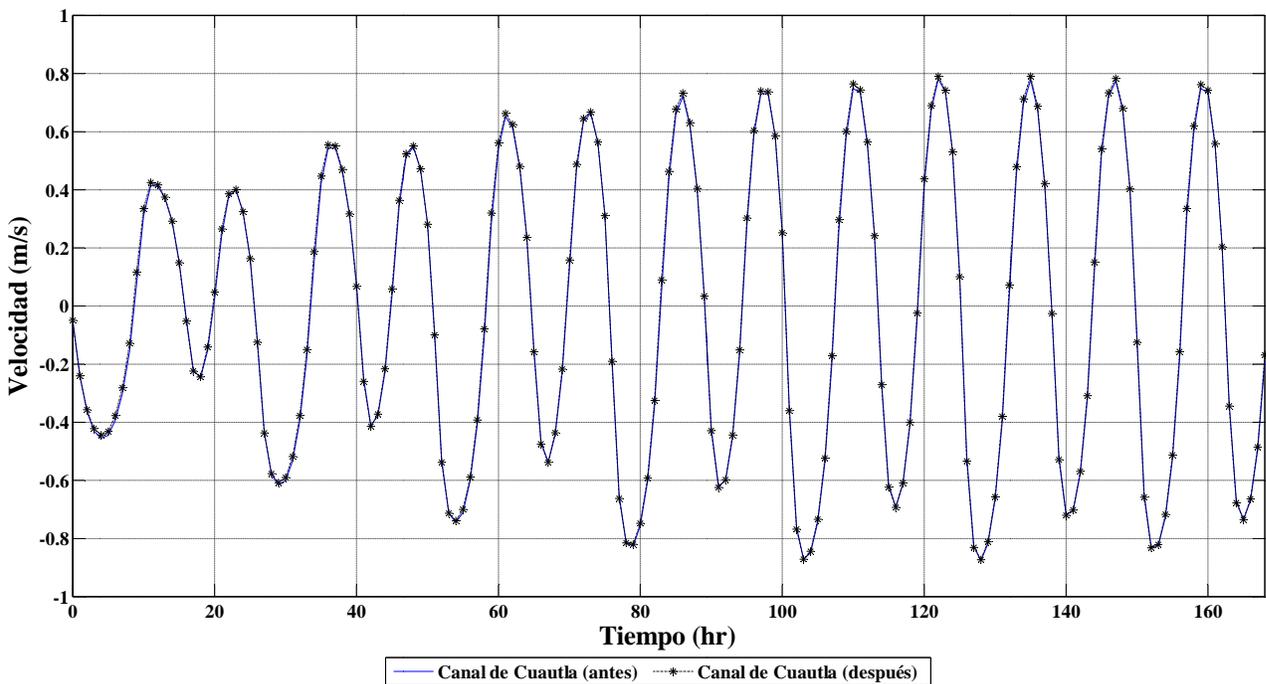


Figura 5-19.- Comparación de la velocidad media a través del canal de Cuautla antes y después de la actuación.

En la **Figura 5-20** se muestra la distribución de la salinidad en el sistema antes y después de la actuación. Obsérvese, por un lado, que después de la actuación las condiciones a lo largo del estero de Cuautla son más homogéneas y menos salinas (del orden de 16 ups), debido a que un mayor volumen de agua de la descarga del río Acajoneta viaja hacia el sur, y por otro lado, menos agua de baja salinidad proveniente del estero de Puerta del Río penetra en el subsistema de Teacapán. Esto se debe a que existe mayor descarga de agua desde el subsistema de Teacapán hacia el subsistema de Cuautla que viceversa.

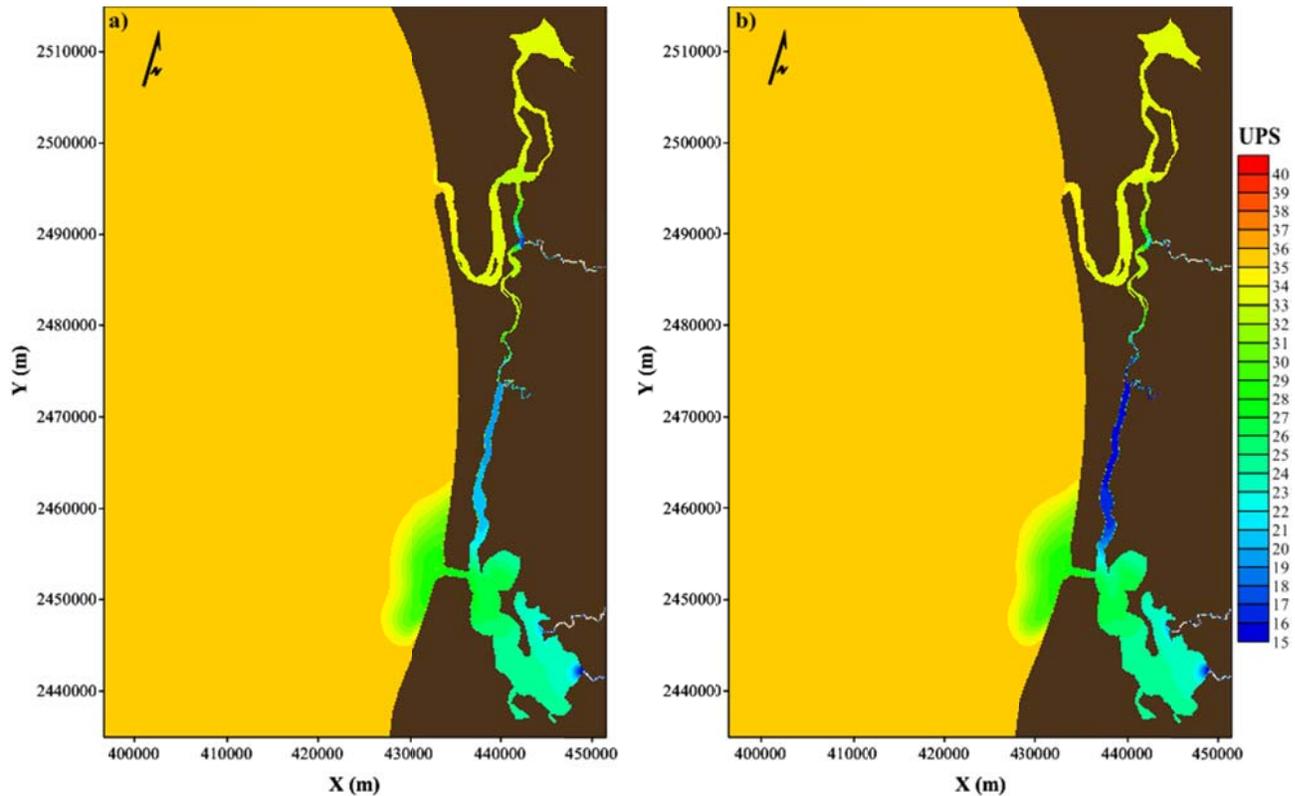


Figura 5-20.-Distribución de la salinidad: a) antes de la actuación, b) después de la actuación.

Por último, el impacto que tendría una descarga fluvial importante en las propiedades hidráulicas del canal, sería muy similar a las que se tendrían antes de la actuación, como se puede ver en la **Tabla 5-2**, por lo que en este sentido bastaría solo una avenida del río Acajoneta con periodo de retorno de 10 años para provocar una erosión en el canal.

Tabla 5-2.-Velocidad media máxima en la sección transversal de la garganta del canal.

Periodo de retorno (años)	Antes de la actuación				Después de la actuación			
	Velocidad máxima (m/s)		Gasto máximo (m ³ /s)		Velocidad máxima (m/s)		Gasto máximo (m ³ /s)	
	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta	Marea viva	Marea muerta
2	0.9350	0.4857	8,196	4,139	0.9291	0.4810	8,140	4,094
5	1.0170	0.6130	9,034	5,273	1.0170	0.6100	9,037	5,245
10	1.0860	0.6970	9,727	6,064	1.0860	0.6940	9,722	6,035
20	1.1790	0.8060	10,664	7,102	1.1780	0.8030	10,652	7,071

5.8 ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 5

Esta alternativa consiste en la construcción de 7 estructuras rígidas sumergidas equidistantes dispuesta de forma perpendicular a lo largo del eje longitudinal del estero de Cuautla, tal y como se muestra en la **Figura 5-21**.

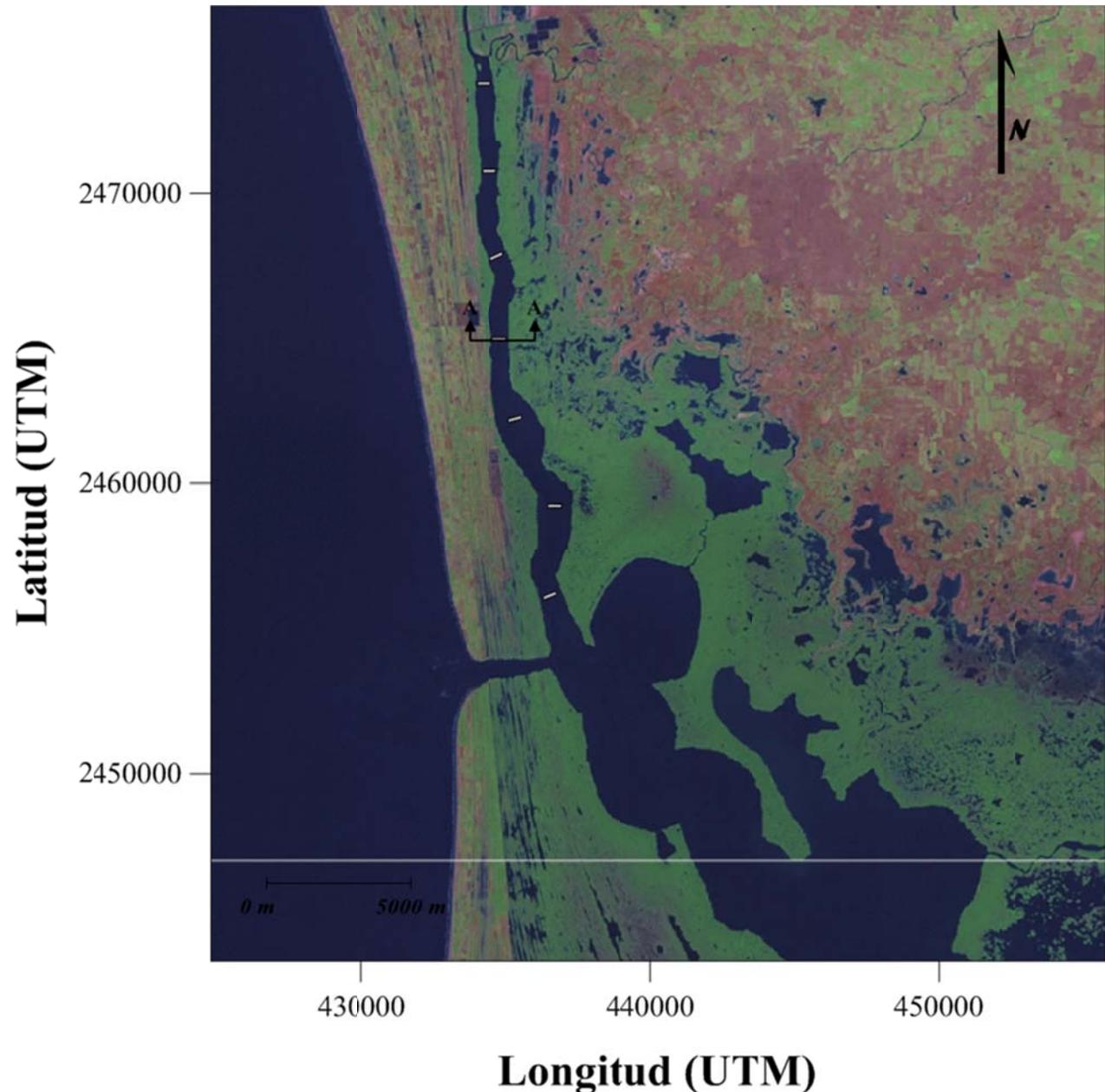


Figura 5-21.-Ubicación de la alternativa de actuación 5.

En la **Figura 5-22** se esquematiza la geometría de estas estructuras. Se puede apreciar que las 7 estructuras están sumergidas a 0.50 m respecto del nivel medio del mar, y que sus longitudes son de 400 m independientemente del ancho de la sección transversal donde se ubiquen, pero cada estructura tiene una profundidad de desplante distinta que varía entre los 4 y 8 m. La distancia entre cada estructura es de 3,000 m.

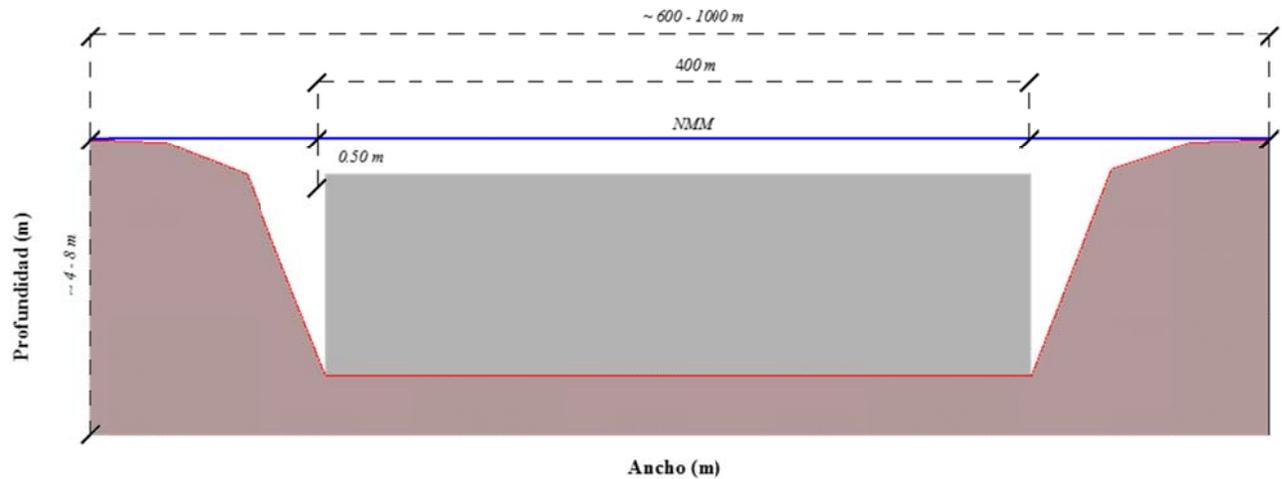


Figura 5-22.-Corte transversal de la alternativa de actuación 5.

Con estas estructuras se pretende reducir la velocidad del flujo en caso de presentarse una descarga fluvial importante del río Acaponeta, y así evitar que el canal se erosione, sin embargo, al evaluar esta alternativa con el modelo numérico estas estructuras no ofrecerían ningún tipo de protección al canal de Cuautla en caso de presentarse una avenida del río Acaponeta, y además no se encontró ningún cambio significativo en el funcionamiento general del sistema lagunar, por lo que no se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones.

5.9 ALTERNATIVA DE ACTUACIÓN 6

Esta alternativa consiste en la construcción de 5 pares de estructuras rígidas equidistantes perpendiculares al eje longitudinal del canal de Cuautla. Cada par de estructuras se ubica sobre la misma sección transversal del canal, tal y como se muestra en la **Figura 5-23**.

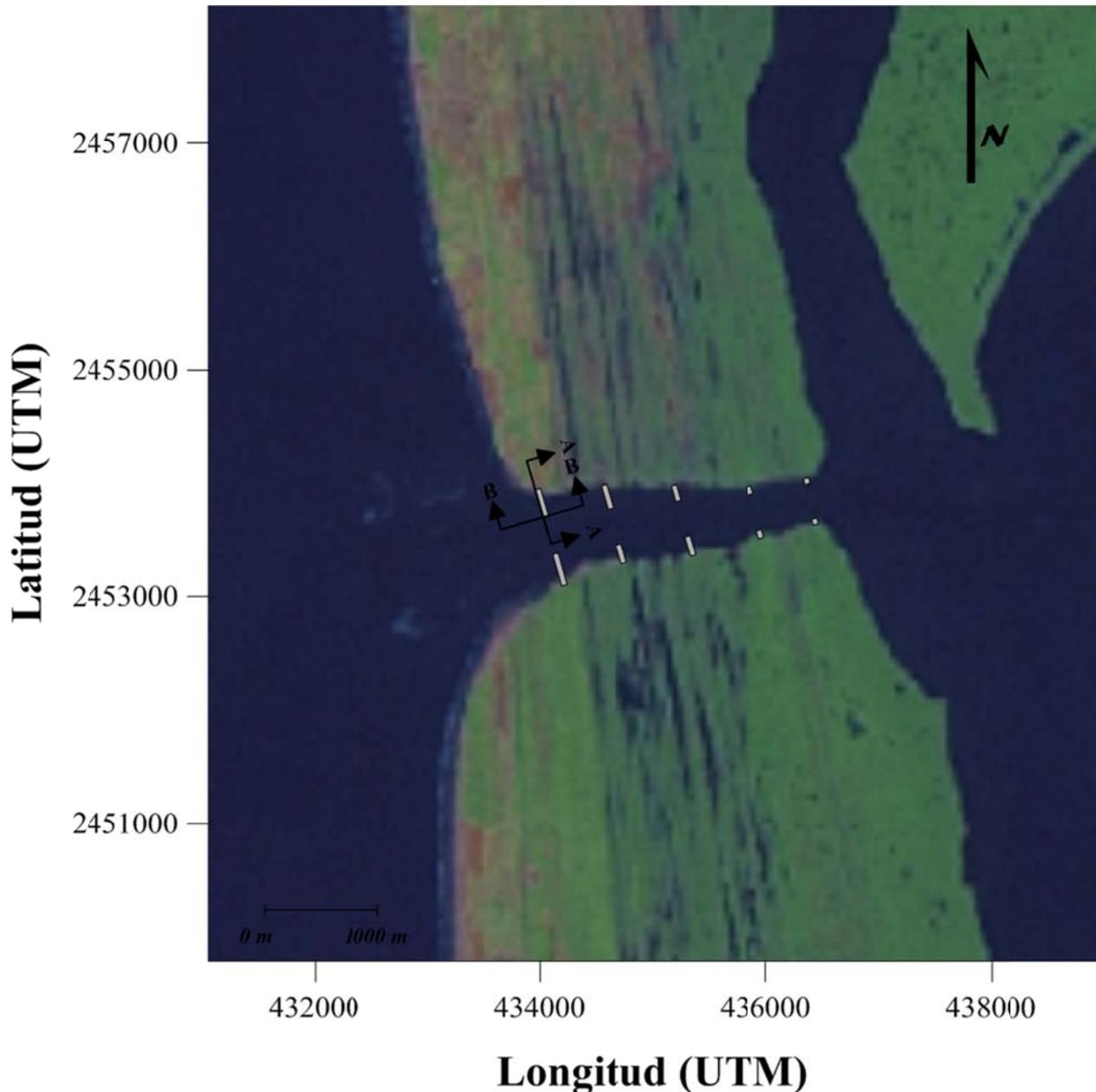


Figura 5-23.- Ubicación de la alternativa de actuación 6.

Cada par de estructuras debe reducir el ancho del canal a 500 m, por lo que la longitud de cada estructura al igual que su profundidad de desplante es distinta en función del ancho y profundo de la sección transversal donde se ubique. En la **Figura 5-24**, se esquematiza la geometría de estas estructura, donde se puede apreciar que la longitud de cada estructura puede variar a partir de los 50 m hasta 400 m, su profundidad de desplante varía entre los 10 y 25 m, y el ancho estimado oscila entre los 4 y 6 m. La separación entre cada par de estructuras es de 600 m.

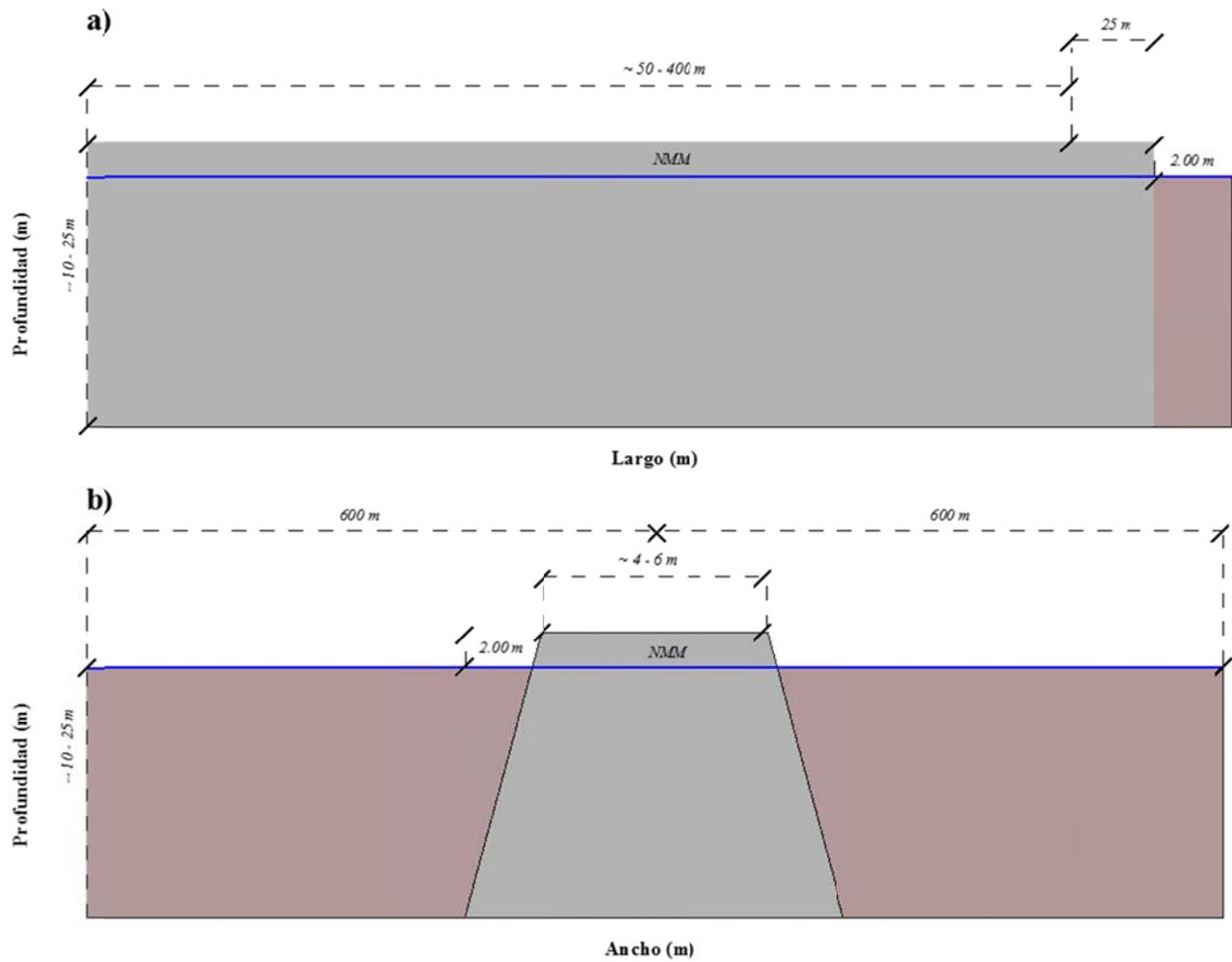


Figura 5-24.-Corte transversal de la alternativa de actuación 6: a) sección A – A, b) sección B – B.

Con estas estructuras se pretende reducir el prisma de marea del subsistema de Cuautla, y a la vez reducir la velocidad de la corriente a través del canal de Cuautla, sin embargo, al evaluar esta alternativa con el modelo numérico no se lograrían reducir las velocidades de las corrientes a través del canal de Cuautla, y además no se encontró ningún cambio significativo en el funcionamiento del sistema lagunar, por lo que no se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones.

5.10 DISCUSIÓN COMPARATIVA

A raíz de la evaluación realizada en el apartado anterior, se descartan las alternativas 1, 5 y 6 por considerarse sin posibilidades de contribuir a controlar la erosión del canal de Cuautla, ni para aumentar el volumen de agua hacia las lagunas y esteros del norte del sistema, por lo que en este apartado solo se discuten las alternativas 2, 3 y 4.

Atendiendo a los distintos criterios de evaluación, desde el punto de vista funcional, con la alternativa 2 se lograría con la manipulación de la compuerta controlar de forma discrecional el efecto de la marea en el sistema que se da a través del canal de Cuautla, en consecuencia también el flujo a lo largo del canal, al grado de controlarla velocidad máxima del flujo desde un valor cercano a cero hasta un máximo que equivale casi la mitad de la velocidad máxima de antes de la actuación, como se mostró en la figura x. Mientras que con las alternativas 3 y 4 se lograría reducir la velocidad máxima del canal de Cuautla en un 30% y 1% respectivamente. En la **Tabla 5-3** se muestran las áreas de la sección transversal del canal que se lograría conseguir con cada alternativa, las cuales se estimaron aplicando la ecuación (1.6). Cabe mencionar que el área que se estimó para la alternativa 2 corresponde al caso en que la compuerta de la estructura estuviera completamente abierta.

Tabla 5-3.-Comparación entre las áreas de equilibrio estimadas de la sección transversal del canal de Cuautla para las alternativas 2, 3 y 4, con el área actual y la estimada de equilibrio para las condiciones antes de cualquier actuación.

Alternativa	Área estimada (m ²)	Área estimada – actual* (m ²)	Área estimada – equilibrio** (m ²)
2	4,400	4,360	4,704
3	6,145	2,615	2,959
4	8,670	90	434

*Área actual: 8,760 m²; **Área de equilibrio: 9,104 m².

En el caso de la alternativa 2a diferencia de las alternativas 3 y 4 el área estimada de la sección transversal del canal puede ser modificada al regular el paso del agua a través de la compuerta, sin embargo, con esta alternativa los cuerpos de agua del subsistema de Cuautla tienden a incrementar su nivel medio, lo cual se acentúa en caso de presentarse una descarga fluvial importante, por lo que existe el riesgo de un posible desbordamiento que pudiera provocar daños en la estructura y/o en el entorno, mientras que con la alternativa 3 el riesgo es mucho menor como se demostró en la **Tabla 5-1**.

Respecto a aumentar el volumen de agua hacia el norte del sistema, la alternativa 4 resultaría más eficaz a corto plazo, aumentaría casi un 50% el nivel del agua hasta la laguna de Agua Grande, sin embargo, la efectividad de esta alternativa estaría condicionada al tiempo requerido para que la zona comenzara a colmatarse, es decir, la funcionalidad de esta actuación está condicionada al tiempo requerido por las descargas de sedimento de los ríos para alcanzar cierta profundidad que sea necesario reanudar las operaciones de dragado. En cuanto a las alternativas 2 y 3, estas contribuirían muy poco a aumentar el volumen de agua hacia el norte del sistema, sin embargo, en el caso de la alternativa 2 a mediano plazo poco a poco la zona denominada subsistema de Teacapán se beneficiaría por los cambios producidos en el subsistema de Cuautla, aunque estos beneficios se limitarían a los meses de verano, cuando se presentan las mayores precipitaciones y, por lo tanto, escurrimientos.

Desde el punto de vista económico, el conjunto de obras englobadas en la alternativa 4 requeriría una mayor inversión en comparación con las alternativas 2 y 3, como se puede apreciar en la **Tabla 5-4**. La alternativa 3 sería la más económica, aproximadamente 50 millones de pesos mexicanos menos que la alternativa 2, además en esta última habría que considerarse el costo de operación de la compuerta durante toda la vida útil de la obra.

Tabla 5-4.- Inversiones económicas estimadas de las alternativas 2, 3 y 4.

Alternativa	Inversión (millones de pesos mexicanos)
2	280
3	232
4	8,775

En relación a la posibilidad de que la actividad económica de la zona se vea afectada por algunas de estas alternativas de actuación, la alternativa 3 supondría poca afectación en ese sentido, dado que el canal solo reduciría su área transversal un 30% con respecto a la geometría actual, por lo que no alteraría las actividades de quienes hoy en día utilizan el canal como acceso a mar abierto y, por otro lado, no impediría el intercambio de agua marina al que está sujeto el subsistema de Cuautla.. En el caso de la alternativa 4 dado que un mayor volumen de agua de mar ingresaría al sistema a través de la boca de Teacapán, casi el doble de lo que ingresa antes de la actuación, habría un dominio marino en la mezcla de las masas de agua, lo que supondría un insumo de especies depredadoras hacia el interior del sistema, y a la vez, la extracción constante hacia el mar de elementos nutritivos y de producción primaria, por lo que la actividad pesquera principalmente en la zona del subsistema de Teacapán se vería afectada. En cuanto a la alternativa de actuación 2, el grado de afectación en la actividad económica de la zona dependerá de la administración en el suministro de agua de mar para propiciar una buena mezcla entre las masas de agua dulce y marina, y así evitar los problemas asociados al dominio de una masa de agua sobre la otra.

De acuerdo a los distintos aspectos anteriormente mencionados se considera lo siguiente:

La alternativa de actuación 2 representa una solución adecuada para controlar la erosión del canal de Cuautla, y para contribuir a mediano plazo a aumentar el volumen de agua hacia las lagunas y esteros del norte del sistema. Es viable técnica y económicamente, pero la operación de la compuerta requiere un estricto control y monitoreo de los cambios en el sistema, tal vez de tecnología y mano de obra especializada, lo que la encarecería con el paso del tiempo, aunque se justificaría por el beneficio social y ambiental que supone el cuidado de las condiciones del agua en el sistema. Por otra parte, es recomendable un estudio hidrológico para prevenir el desbordamiento de la estructura, además de un análisis de tipo biológico para determinar la adecuada operación de la compuerta.

En cuanto a la alternativa de actuación 3, también es una solución adecuada para controlar la erosión del canal de Cuautla, además ofrece cierta protección al canal en caso de presentarse una descarga fluvial importante, pero presenta el inconveniente de que contribuye muy poco a aumentar el volumen de agua hacia las lagunas y esteros del norte del sistema. Es viable técnica y económicamente más barata, además requiere de menos mantenimiento. Esta alternativa poco afecta a las condiciones del agua en el sistema, y a la actividad pesquera en la zona, porque no impediría el intercambio de agua marina al que está sujeto el subsistema de Cuautla, sin embargo es necesario un análisis de tipo biológico para determinar si es adecuado alterarlo.

Mientras que la alternativa de actuación 4 es una solución poco recomendable, porque únicamente ofrece posibilidades de aumentar el volumen de agua hacia las lagunas y esteros del norte del sistema solo con agua de mar, lo cual supondría una afectación en la flora y fauna del sistema y a la actividad pesquera en la zona, y por otra parte, la erosión del canal de Cuautla continuaría. Además implica una altísima inversión y de que solo se trata de una solución provisional, por lo que se requiere un estudio adicional de vida útil para determinar cuándo sería necesario un nuevo dragado.

Como actuaciones complementarias para cualquiera de las 3 alternativas de actuación, se recomienda el acondicionamiento de pasos de agua en aquellas obras como canales, bordos y caminos que interrumpen el flujo de mareas; la plantación de vegetación especialmente mangle para incrementar su cobertura de bosque, y la remoción de la estructura ubicada en la desembocadura del río Baluarte que bloquea en gran parte la salida de sedimento de este río hacia el mar. Por último, se recomienda un plan de seguimiento y evaluación del conjunto de obras que se realicen, para verificación de los mismos y, en su caso, la valoración a posteriori del momento e intensidad de nuevas actuaciones en el sistema.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

6.1 CONCLUSIONES

En esta tesis se realizaron trabajos de campo en el sistema lagunar Teacapan – Aguan Brava – Majahual con fines de medición, muestreo y monitoreo para recabar información respecto de la dinámica de sus masas de agua, así como algunas propiedades de sus aguas y sedimento. Asimismo esta información sirvió de base para la calibración y validación de un modelo numérico compuesto por dos módulos: un hidrodinámico y otro de advección – dispersión. Aunque el proceso de validación en este trabajo no incorpora la comparación de los resultados numéricos con las mediciones en campo respecto de los valores medidos de salinidad y temperatura. La implementación de esta herramienta numérica ha permitido modelar las condiciones del sistema lagunar, y además, servirá para pronosticar las afectaciones o impactos que puede provocar una futura actuación ingenieril, permitiendo la evaluación de diferentes escenarios hipotéticos. Los resultados obtenidos en este trabajo servirán como un primer elemento para establecer el manejo, conservación y restauración del sistema lagunar. A continuación se mencionan las conclusiones a las que se llegó en este trabajo:

Conclusiones con base en los trabajos de campo:

- ✓ La configuración del fondo del sistema lagunar es, en general, bastante somera. Además la mayoría de los cuerpos de agua presentan un alto grado de azolvamiento, lo que puede ser consecuencia de grandes aportes de sedimento provenientes de los ríos y de la hidrodinámica que prevalece en casi todo el sistema lagunar.
- ✓ La homogeneidad vertical de las condiciones de salinidad y temperatura justifican el uso de un modelo numérico promediado en la vertical, teniendo presente que los fuertes gradientes horizontales de densidad pueden también contribuir al movimiento y generar incertidumbre en los resultados.
- ✓ Las condiciones energéticas del canal de Cuautla en forma generalizada son moderadas a través de un largo período de tiempo; generándose así una mezcla de fracciones gruesas y finas de sedimento con un predominio de las arenas. La distribución de las partículas de estos sedimentos tiende a seguir un modelo del tipo log – normal de probabilidad, es decir, que los logaritmos de los tamaños se disponen según una distribución normal o gaussiana de probabilidades. Corresponde a sedimentos moderadamente clasificados, casi simétricos y mesocurtico.

Conclusiones con base en los resultados del modelo numérico:

- ✓ Si bien los datos con los cuales se calibró y validó el modelo numérico fueron pocos, se aprecia un buen ajuste en el comportamiento del nivel de la superficie libre y en la magnitud de las velocidades que la marea y las descargas de los ríos generaron. Por lo tanto, son de suma importancia los resultados obtenidos en el presente trabajo, ya que se contó con una herramienta adaptada a las condiciones del sistema lagunar, la cual puede servir para diferentes aplicaciones que requieran el registro del comportamiento hidrodinámico del sistema, como por ejemplo: transporte de sustancias contaminantes, estudios de calidad de aguas, estudios de sedimentación y transporte de sedimentos, entre otros.

- ✓ Las ligeras discrepancias observadas entre lo registrado en campo y lo calculado con el modelo numérico pueden ser disminuidas, principalmente, con más información de campo, mediante la inclusión de otros mecanismos generadores de movimiento del agua, como el viento y las corrientes baroclínicas, así como la revisión de diversas simplificaciones del modelo, como el *Eddy viscosity* constante, fricción constante en todo el dominio, etc.

Conclusiones finales:

- ✓ Si el sistema continúa funcionando bajo las condiciones actuales, el canal de Cuautla seguiría creciendo en los próximos años principalmente durante verano, cuando las corrientes de reflujos de marea y de las descargas de los ríos tienen la suficiente fuerza para erosionar el canal. Consecuentemente, a medida que el canal crece, mayor será el volumen del aporte fluvial que se desvíe hacia el canal, lo que causará que se modifiquen los patrones de inundación dejando de inundarse especialmente aquellas zonas que se inundan por el efecto combinado de la marea y la llegada de las aguas de los ríos. Es bien sabido que la falta de inundación en zonas intermareales puede provocar, por un lado, el hundimiento paulatino del suelo, originado por la falta de aporte de sedimentos, y por otro lado, la desecación del suelo por la falta de agua. El sistema lagunar bajo estudio no sería la excepción, y estaría sujeto a los impactos mencionados.
- ✓ La hidrodinámica del sistema lagunar está dominada principalmente por las corrientes de marea que entran por la boca de Teacapán y por el canal de Cuautla. Estas corrientes al encontrarse entre sí en cada fase de flujo de marea, generan un fenómeno que separa al sistema en dos subsistemas: Tecapán y Cuautla. Este fenómeno regularmente se presenta al centro y sur del estero de Puerta del Río, aunque también se puede presentar al norte del estero de Cuautla, dependiendo de la amplitud de la marea y de la descarga de los ríos, principalmente la del río Acaponeta, sin embargo, en términos prácticos se puede decir que este fenómeno tiene lugar en la frontera del estero de Cuautla con el estero de Puerta del Río.
- ✓ Con las alternativas de actuación 2 y 3, junto con las demás acciones recomendadas en el capítulo cinco de esta tesis, se controlaría la erosión actual del canal de Cuautla, y se recuperaría gran parte de los espacios naturales que han sido degradados por el funcionamiento actual del sistema lagunar. De esta forma se abriría camino hacia el mejoramiento o recuperación de las condiciones ambientales de los ecosistemas y comunidades que se encuentran dentro y en las inmediaciones del sistema lagunar buscando que, en conjunto y a largo plazo, vuelvan a tener el valor natural que hoy día han perdido.
- ✓ La discusión de los resultados obtenidos permitió proponer una metodología para estudiar desde el punto de vista de ingeniero, científico y técnico la posibilidad de una actuación antrópica para controlar la erosión de una boca o canal artificial, en función del estado final de equilibrio que se obtendría tras su ejecución. En cuanto a la aplicabilidad de la metodología, si bien es cierto queda limitada a casos con problemáticas y características similares, posteriormente podría ser ampliada al aumentar el número de casos y estudios. El conocimiento generado permitirá una mejor comprensión del actuar frente a sistemas lagunares cuyo funcionamiento ha sido alterado por la construcción y/o la erosión de una boca o canal artificial.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En cuanto a trabajos en campo en la zona de estudio cabe resaltar como futuras líneas de trabajo a las siguientes:

- ✓ Debe considerarse la aplicación de programas de monitoreo permanentes a fin de contar con información de campo continua y de calidad. En este sentido es deseable contar, al menos, con la siguiente información:
 - Medición de la hidrodinámica y de algunas propiedades del agua como temperatura y salinidad en más puntos al interior del sistema lagunar.
 - Medición del aporte y propiedades del agua y sedimento de los ríos.
 - Medición del acarreo litoral y del transporte de sedimento a lo largo del canal de Cuautla y en la boca de Teacapán.
 - Medición de la batimetría con una mayor resolución.
- ✓ Realizar estudios de impacto ambiental con un enfoque metodológico adecuado, para tener un mayor conocimiento de los impactos adversos, directos e indirectos, de cualquier actuación ingenieril que se proponga, y asimismo poder detallar una propuesta de plan de manejo ambiental, es decir medidas para mitigar, eliminar y/o compensar dichos impactos.

En cuanto a la aplicación del modelo numérico para el estudio del sistema lagunar, existen diversos aspectos a mejorar, algunas de ellas son:

- ✓ Incluir la influencia del viento y corrientes baroclínicas en el campo de flujo de las aguas del sistema lagunar.
- ✓ Incluir el secado y mojado de celdas para simular la inundación de las zonas susceptibles a inundación.
- ✓ Es deseable añadir al modelo módulos de estimación de transporte de sedimentos y de calidad de agua para contar con una herramienta aún más completa.

BIBLIOGRAFÍA

- Badillo, J., y Rodriguez, R.** (1996). *Mecánica de Suelos*. Limusa - Noriega. México.
- Berlanga, C. A., & Ruiz, A.** (2007). "Analysis of change trends of the mangrove forest in Teacapán – Agua Brava lagoon system, Mexico. An approximation using Lansat satellite images". *Journal Coastal Research*, 23 (1):29-46, 2007.
- Blanco M. y Correa M.** (2011). "Diagnóstico Funcional de Marismas Nacionales". Informe final de los convenios de coordinación entre la Universidad Autónoma de Nayarit y la Comisión Nacional Forestal con el patrocinio del Gobierno del Reino Unido, Tepic, Nayarit. 190 páginas, 84 mapas + 1 DVD.
- Bruun, P.** (1968). *Tidal inlets and litoral drift*. Univer. Book Co., Oslo, Norway.
- Bruun, P.** (1990). Tidal inlets on alluvial shores. In: *Port Eng.*, Vol. 2, Chapter 9, Bruun, P., ed., Gulf Pub., 810 – 929.
- Bruun, P., and Gerritsen, F.** (1959). Natural bypassing of sand at coastal inlets. *J. Waterways and Harbors Div.* 85, ASCE, 401 – 412.
- Buonaiuto, F.S., and Kraus, N.C.** (2003). Limiting slopes and depths at ebb – tidal shoals. *Coastal Eng.* 48, 51 – 65.
- Carr de Betts, E.E.** (1999). An examination of flood tidal deltas at Florida's tidal inlets. M.S. Thesis, Coastal and Oceanographic Eng. Dept., U. of Florida, Gainesville, FL.
- Carr de Betts, E.E., and Metha, A.J.** (2001). An assessment of inlet flood deltas in Florida. *Proc. Coastal Dynamics '01*, ASCE, 252 – 262.
- Curray, J. P. y Moore, D. G.** (1963). Sedimentos e historia de la costa de Nayarit, México. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, t. XXVI, No. 2, pag. 107-116
- Dean, R.G. & Dalrymple, R.A.** (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 2. World Scientific, Singapur
- Del Valle Morales, J.** (2010). *Velocidad de caída de arenas costeras de la península de Yucatán, México*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 75 pp.
- Escoffier, F.F.** (1940). "The stability of tidal inlets". *Shore and Beach*, 8 (4), 114 – 115.
- Folk, R. L. y Ward, W. C.** (1957). "Brazos river bar. A study in the Significances of Grain Size Parameters". *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 27, pp 3-26.
- Floyd, C.D.** (1968). River mouth training in New South Wales, Australia. *Proc. 11th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1,267 – 1,281.
- Fuentes, O., Carrillo, J., de Luna, F., García, R., Gómez, H., Jiménez, M. y Vega, E.** (1999). "Estudio oceanográfico para el estudio de factibilidad técnica, biológica, económica, social y anteproyectos de obras para controlar los fenómenos de erosión y azolve, en las bocas de Cuautla y Teacapan, Nayarit". Informe del proyecto 8318, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- García, M., Maza J.** (1998). *Origen y Propiedades de los Sedimentos*. Capítulo 7 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 118 pp.
- García, E.,** (1993) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gibeaut, J.C., and Davis, R.A., Jr.** (1993). Statistical geomorphic classification of ebb – tidal deltas along the west – central Florida coast. *J. Journal Coastal Research*, SI 18, 165 – 184.
- Hey, R.D.** (1979). "Flow resistance in gravel bed rivers". *Journal of the Hydraulics*.

- Hicks, D.M., and Hume, T.M.** (1996). Morphology and size of ebb tidal deltas at natural inlets on open – sea and pocket – bay coasts, North Island, New Zealand. *Journal Coastal Research*, 12 (1),:47 – 63.
- Hume, T.M. and Herdendorf, C.E.** (1990). Morphologic and Hydrologic characteristics of tidal inlets on a headland dominated, low littoral drift coast, Northeastern New Zealand . *Proc. Skagen Symposium, J. Coastal Res.* SI 9, 527 – 563.
- IMTA**, *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CD, México, **2005**.
- Jarret, J.T.** (1976). Tidal prism – inlet area relationships. GITI Reports 3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- King, D. y Galvin C.** (2002). *Coastal Sediment Properties*. En Vincent, L. y Demirbilek, Z., editores, Coastal Engineering Manual. Número 1110-2-1100 en Engineer Manual, capítulo III-I. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Kraus, N.C.** (1998). Inlets cross – sectional area calculated by process – based model. *Proc. 26th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 3,265 – 3,278.
- Kraus, N.C.** (2009). Engineering of tidal inlets and morphologic consequences. *U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory*.
- Le Conte, L.J.** (1905). Discussion on river and harbor outlets, notes on the improvement of river and harbor outlets in the United States, Paper No. 1009 by D. A. Watts. *Transactions ASCE* 55, 306 – 308.
- Leendertse, J.J.** (1970). “A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas. Vol. 1. Principles of computation”. RM-6230-RC. The Rand Corporation, Santa Mónica, California
- Madsen, P.A., Rugbjerg, M.Y Warren, I.R.** (1988). “Subgrid Modelling in Depth Integrated Flows”. *Proc. 21st Coastal Engineering Conference, ASCE, New York, N.Y.*, Vol. 1, pp. 505-511.
- Marino, J.N., and Mehta, A.J.** (1988). Sediment trapping at Florida’s east coast inlets. In: *Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets*, Aubrey , D.G., and Weishar, L., ed., Springer – Verlag, 284 – 296.
- Martínez, R.** (2014). “Evaluación de cotas de inundación en el litoral mexicano por ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis”. *Tesis de Maestría*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D. F.
- O’Brien, M.P.** (1931). Estuary and tidal prisms related to entrance areas. *Civil Eng.*, 1 (8), 738 – 739.
- O’Brien, M.P.** (1969). Equilibrium flow areas of inlets on sandy coasts. *J. Waterways, Ports, and Harbors Div.*, 95 (WW1), 43 – 52.
- Pedlosky, J.** (1987). “Geophysical fluid dynamics”. Springer – Verlag. New York.
- Peralta, A., Flores, F., Blanco, M., Ortiz, M., Serrano, D., Ruiz A., y Carrillo J.**(2012). *Diagnóstico del sistema de marismas asociado al Sistema Ambiental Regional Terrestre del proyecto CIP Costa Pacífico*, Instituto de Geografía, UNAM.
- Riedel, H.P. and Gourlay, M.R.** (1980). Inlets/estuaries discharging into sheltered waters. *Proc. 17th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 2,550 – 2,562.
- Ruiz. F., Merino. M., Alatorre M., Czitrom S., & Franco V.** (1994). “Dispositivo de bombeo de agua marina activado por oleaje”. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. IX, No. 2, Mayo-Agosto 1994, pp. 45-51.
- Ruiz Martínez, G.** (2009). *Determinación del estado morfodinámico de segmentos de playa que poseen obstáculos sumergidos y emergidos*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 668 pp.

Servicio Mareográfico Nacional (SM) (2013). *Información*. <http://www.mareografico.unam.mx>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2013.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (1951-2010). *Normales Climatológicas por Estación*. <http://smn.cna.gob.mx>. Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2013.

Shigemura, T. (1981). Tidal prisms – throat width relationships of the bay of Japan. *Shore and Beach*, 49 (3), 34 – 39.

Silva, R., Ruiz, G., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Espinal, J., Mendoza, E., Bautista, G. y Morán, D. (2008). *Atlas de Clima Marítimo de la Vertiente Pacífica Mexicana*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN en trámite.

Van Rijn, L.C. (1984b). “Sediment transport, Part II: Suspended load transport”. *Journal of the Hydraulics Engineering ASCE*, Vol. 110, No 11, pp 1613-1641

Van Rijn, L.C. (1993). “Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, University of Utrecht, Delft Hydraulics”, The Netherlands. 2.

Walton, T.L., and Adams, W.D. (1976). Capacity of inlet outer bars to store sand. *Proc. 15th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1,919 – 1,937.

ANEXO A

**DATOS GENERALES DE LOS LANCES DE
CTDSBE 19 DE LA PRIMERA Y SEGUNDA
CAMPAÑA**

N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha	N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha
	Longitud	Latitud			Longitud	Latitud	
	X	Y			X	Y	
1	432831.66	2453350.16	23/09/2012,11:32	51	432772.11	2453313.33	23/09/2012,15:17
2	433914.23	2453309.91	23/09/2012,11:35	52	432927.08	2453310.45	23/09/2012,15:20
3	433381.12	2453290.80	23/09/2012,11:39	53	433957.52	2453315.66	23/09/2012,15:22
4	433681.08	2453279.20	23/09/2012,11:42	54	433407.45	2453338.84	23/09/2012,15:26
5	434003.45	2453328.01	23/09/2012,11:45	55	432039.48	2453399.15	23/09/2012,15:29
6	434190.11	2453341.80	23/09/2012,11:47	56	432492.32	2453459.92	23/09/2012,15:33
7	434371.69	2453374.06	23/09/2012,11:50	57	434573.61	2453791.46	23/09/2012,15:37
8	433300.14	2453399.63	23/09/2012,11:52	58	434806.32	2453518.55	23/09/2012,15:40
9	434773.70	2453444.48	23/09/2012,11:55	59	435108.78	2453532.42	23/09/2012,15:43
10	434982.59	2453474.28	23/09/2012,11:57	60	435331.93	2453564.15	23/09/2012,15:46
11	435139.52	2453507.57	23/09/2012,12:00	61	435652.46	2453585.52	23/09/2012,15:50
12	435346.18	2453521.11	23/09/2012,12:03	62	436173.72	2453618.07	23/09/2012,15:53
13	435563.81	2453545.11	23/09/2012,12:04	63	436423.41	2453670.00	23/09/2012,15:59
14	435815.87	2453586.88	23/09/2012,12:05	64	436885.47	2453763.51	23/09/2012,16:02
15	435929.79	2453588.63	23/09/2012,12:12	65	437290.04	2453920.36	23/09/2012,16:06
16	436092.01	2453635.93	23/09/2012,12:15	66	437562.86	2454001.74	23/09/2012,16:08
17	436172.15	2453654.05	23/09/2012,12:17	67	437932.75	2454082.55	23/09/2012,16:10
18	436471.65	2453701.65	23/09/2012,12:21	68	437124.37	2454211.42	23/09/2012,16:14
19	436674.89	2453750.45	23/09/2012,12:23	69	436839.71	2455110.30	23/09/2012,16:18
20	436853.16	2453778.86	23/09/2012,12:26	70	436642.07	2455899.25	23/09/2012,16:20
21	437087.12	2453834.84	23/09/2012,12:28	71	436525.18	2456685.66	23/09/2012,16:23
22	437375.67	2453895.11	23/09/2012,12:31	72	436503.52	2457442.35	23/09/2012,16:28
23	437515.32	2453928.69	23/09/2012,12:33	73	436424.09	2458185.07	23/09/2012,16:30
24	436900.10	2454197.56	23/09/2012,12:37	74	436225.44	2459634.34	23/09/2012,16:34
25	436778.58	2454694.70	23/09/2012,12:39	75	435735.33	2460984.62	23/09/2012,16:39
26	436690.18	2455307.02	23/09/2012,12:41	76	435293.72	2462125.70	23/09/2012,16:43
27	436609.74	2455765.63	23/09/2012,12:44	7	435035.60	2463070.46	23/09/2012,16:47
28	436561.44	2456138.68	23/09/2012,12:46	78	434875.27	2464560.55	23/09/2012,16:51
29	436525.51	2456556.70	23/09/2012,12:48	79	434768.46	2466807.59	23/09/2012,16:57
30	436447.80	2457723.01	23/09/2012,12:54	80	434580.48	2468196.52	23/09/2012,17:02
31	436418.89	2458046.91	23/09/2012,12:56	81	434412.69	2469478.92	23/09/2012,17:05
32	436423.52	2458423.81	23/09/2012,12:58	82	434341.82	2470943.19	23/09/2012,17:09
33	436428.83	2458801.26	23/09/2012,13:00	83	434203.92	2472341.52	23/09/2012,17:13
34	436303.31	2459187.18	23/09/2012,13:02	84	434120.88	2473839.43	23/09/2012,17:17
35	436223.36	2459545.60	23/09/2012,13:04	85	433792.95	2475083.23	23/09/2012,17:21
36	436127.49	2459873.84	23/09/2012,13:06	86	433699.51	2475540.44	23/09/2012,17:23
37	435699.26	2460942.89	23/09/2012,13:10	87	432865.86	2453379.53	24/09/2012,12:16
38	435282.01	2461993.65	23/09/2012,13:14	88	433140.20	2453364.71	24/09/2012,12:18
39	434931.48	2463588.40	23/09/2012,13:17	89	433484.74	2453374.31	24/09/2012,12:21
40	434818.54	2464748.79	23/09/2012,13:22	90	433811.46	2453393.58	24/09/2012,12:25
41	434781.51	2465703.33	23/09/2012,13:26	91	434226.91	2453472.09	24/09/2012,12:27
42	434759.91	2467226.24	23/09/2012,13:30	92	434594.47	2453521.28	24/09/2012,12:30
43	434572.71	2468550.97	23/09/2012,13:34	93	434996.46	2453545.43	24/09/2012,12:33
44	434414.46	2469937.93	23/09/2012,13:38	94	435351.45	2453547.84	24/09/2012,12:36
45	434337.44	2471247.63	23/09/2012,13:42	95	435588.70	2453580.43	24/09/2012,12:39
46	434169.45	2472992.75	23/09/2012,13:47	96	436141.82	2453589.42	24/09/2012,12:42
47	434062.13	2474146.68	23/09/2012,13:51	97	436385.82	2453637.13	24/09/2012,12:46
48	433762.46	2475133.91	23/09/2012,13:55	98	436697.93	2453741.95	24/09/2012,12:49
49	433704.61	2475530.27	23/09/2012,13:57	99	436839.37	2453794.32	24/09/2012,13:57
50	432831.66	2453350.16	23/09/2012,15:15	100	437362.51	2453912.51	24/09/2012,14:01

N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha	N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha
	Longitud	Latitud			Longitud	Latitud	
	X	Y			X	Y	
101	437928.36	2454144.93	24/09/2012,14:03	151	448977.78	2442773.61	24/09/2012,16:35
102	438434.43	2454690.13	24/09/2012,14:07	152	448298.22	2442593.19	24/09/2012,16:40
103	438829.15	2455105.16	24/09/2012,14:09	153	447983.05	2442328.39	24/09/2012,16:42
104	439247.05	2455433.40	24/09/2012,14:12	154	450883.23	2441864.49	24/09/2012,16:47
105	439687.23	2455533.53	24/09/2012,14:14	155	449268.25	2441729.22	24/09/2012,16:48
106	440172.01	2456064.29	24/09/2012,14:17	156	449418.37	2441574.88	24/09/2012,16:50
107	440751.78	2456510.58	24/09/2012,14:20	157	450329.50	2442113.99	24/09/2012,16:54
108	441014.70	2456714.37	24/09/2012,14:21	158	451104.86	2443079.92	24/09/2012,16:58
109	441280.95	2456940.11	24/09/2012,14:23	159	451096.04	2443116.84	24/09/2012,17:00
110	441141.56	2456920.89	24/09/2012,14:26	160	451122.66	2442501.13	24/09/2012,17:02
111	441189.25	2456857.98	24/09/2012,14:27	161	451069.65	2442261.47	24/09/2012,17:05
112	441319.53	2456693.48	24/09/2012,14:29	162	449707.07	2442970.32	24/09/2012,17:09
113	441450.65	2456567.72	24/09/2012,14:32	163	448293.11	2443702.70	24/09/2012,17:14
114	440890.64	2455752.54	24/09/2012,14:36	164	446978.98	2444433.22	24/09/2012,17:17
115	440234.43	2454911.36	24/09/2012,14:40	165	444714.22	2445721.74	24/09/2012,17:23
116	439602.39	2453849.46	24/09/2012,14:43	166	443381.18	2446595.62	24/09/2012,17:29
117	439283.14	2453269.55	24/09/2012,14:46	167	441700.75	2447846.33	24/09/2012,17:34
118	438874.72	2452741.10	24/09/2012,14:49	168	440499.01	2449081.02	24/09/2012,17:38
119	438761.90	2452673.28	24/09/2012,12:50	169	439699.40	2449817.24	24/09/2012,17:43
120	439165.31	2452042.96	24/09/2012,14:54	170	438555.45	2450899.47	24/09/2012,17:50
121	439668.17	2451302.50	24/09/2012,14:56	171	437688.20	2452038.99	24/09/2012,17:54
122	440123.74	2450767.39	24/09/2012,14:59	172	437269.38	2452624.21	24/09/2012,17:57
123	440668.93	2450063.89	24/09/2012,15:02	173	436553.54	2453556.93	24/09/2012,18:02
124	441208.62	2449485.88	24/09/2012,15:06	174	434311.93	2453096.10	25/09/2012,11:39
125	441683.33	2448937.28	24/09/2012,15:09	175	434297.77	2453160.73	25/09/2012,11:40
126	442683.75	2448038.26	24/09/2012,15:14	176	434330.82	2453256.16	25/09/2012,11:42
127	443453.09	2447279.81	24/09/2012,15:17	177	434324.60	2453352.03	25/09/2012,11:44
128	444228.47	2445733.98	24/09/2012,15:23	178	434318.39	2453447.90	25/09/2012,11:45
129	444693.50	2444328.20	24/09/2012,15:27	179	434284.06	2453536.42	25/09/2012,11:46
130	444881.02	2443386.29	24/09/2012,15:30	180	434244.89	2453621.08	25/09/2012,11:48
131	444892.92	2442954.36	24/09/2012,15:32	181	434229.57	2453696.05	25/09/2012,11:50
132	445062.66	2442868.17	24/09/2012,15:35	182	434199.96	2453763.88	25/09/2012,11:51
133	445337.00	2443095.79	24/09/2012,15:39	183	434708.57	2453853.07	25/09/2012,11:56
134	445170.34	2443474.20	24/09/2012,15:41	184	434744.85	2453777.83	25/09/2012,11:56
135	444944.95	2443917.38	24/09/2012,15:43	185	434778.55	2453700.76	25/09/2012,11:59
136	446288.22	2444584.27	24/09/2012,15:47	186	434809.97	2453653.95	25/09/2012,12:01
137	447744.09	2445337.96	24/09/2012,15:51	187	434775.32	2453583.99	25/09/2012,12:02
138	448835.71	2446291.48	24/09/2012,15:55	188	434785.95	2453539.11	25/09/2012,12:04
139	450108.82	2447010.75	24/09/2012,16:01	189	434803.07	2453481.85	25/09/2012,12:06
140	451089.63	2447076.84	24/09/2012,16:05	190	434826.38	2453386.18	25/09/2012,12:08
141	451434.92	2447232.03	24/09/2012,16:07	191	434803.75	2453314.51	25/09/2012,12:09
142	451548.74	2447077.63	24/09/2012,16:09	192	434820.12	2453243.60	25/09/2012,12:11
143	451552.72	2447028.92	24/09/2012,16:10	193	434761.99	2453189.42	25/09/2012,12:12
144	451489.44	2446911.41	24/09/2012,16:12	194	434821.34	2453125.33	25/09/2012,12:14
145	451329.96	2446810.07	24/09/2012,16:13	195	434807.97	2453090.34	25/09/2012,12:15
146	451348.37	2447037.48	24/09/2012,16:16	196	435199.15	2453117.86	25/09/2012,12:18
147	451465.63	2447214.23	24/09/2012,16:19	197	435205.39	2453171.34	25/09/2012,12:19
148	450729.69	2445649.87	24/09/2012,16:23	198	435208.24	2453237.37	25/09/2012,12:20
149	450297.98	2444488.60	24/09/2012,16:27	199	435202.17	2453307.51	25/09/2012,12:21
150	449905.41	2443435.33	24/09/2012,16:31	200	435204.99	2453365.79	25/09/2012,12:22

N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha	N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha
	Longitud	Latitud			Longitud	Latitud	
	X	Y			X	Y	
201	435182.75	2453428.80	25/09/2012,12:24	251	434749.62	2453149.99	25/09/2012,15:05
202	435157.86	2453518.75	25/09/2012,12:25	252	434789.14	2453108.86	25/09/2012,15:07
203	435139.29	2453597.42	25/09/2012,12:27				
204	435121.74	2453675.16	25/09/2012,12:28				
205	435084.62	2453755.20	25/09/2012,12:30				
206	435106.89	2453824.29	25/09/2012,12:31				
207	435096.22	2453860.13	25/09/2012,12:32				
208	435532.42	2453807.77	25/09/2012,12:37				
209	435530.42	2453739.52	25/09/2012,12:39				
210	435533.48	2453690.99	25/09/2012,12:40				
211	435553.89	2453764.15	25/09/2012,12:42				
212	435549.68	2453576.17	25/09/2012,12:43				
213	435537.42	2453521.61	25/09/2012,12:45				
214	435409.79	2453446.68	25/09/2012,12:47				
215	435570.55	2453388.82	25/09/2012,12:49				
216	435582.80	2453317.37	25/09/2012,12:51				
217	435573.42	2453250.44	25/09/2012,12:53				
218	435587.59	2453228.61	25/09/2012,12:54				
219	435968.95	2453374.82	25/09/2012,12:56				
220	435972.07	2453424.26	25/09/2012,12:57				
221	435961.62	2453598.64	25/09/2012,12:59				
222	435941.06	2453572.53	25/09/2012,13:01				
223	435918.13	2453636.46	25/09/2012,13:03				
224	435906.36	2453700.16	25/09/2012,13:04				
225	435882.99	2453740.29	25/09/2012,13:05				
226	435867.88	2453783.70	25/09/2012,13:06				
227	435850.74	2453837.09	25/09/2012,13:08				
228	435852.95	2453871.58	25/09/2012,13:10				
229	434307.39	2453078.78	25/09/2012,14:25				
230	434213.72	2453153.71	25/09/2012,14:27				
231	434238.17	2453208.03	25/09/2012,14:28				
232	434180.94	2453286.68	25/09/2012,14:30				
233	434172.88	2453370.84	25/09/2012,14:32				
234	434143.97	2453443.47	25/09/2012,14:33				
235	434123.76	2453497.43	25/09/2012,14:35				
236	434108.09	2453613.17	25/09/2012,14:39				
237	434114.44	2453651.33	25/09/2012,14:41				
238	434056.90	2453737.92	25/09/2012,14:43				
239	434131.47	2453778.74	25/09/2012,14:45				
240	434712.15	2453845.31	25/09/2012,14:49				
241	434710.60	2453804.91	25/09/2012,14:50				
242	434658.97	2453701.63	25/09/2012,14:51				
243	434632.80	2453565.58	25/09/2012,14:54				
244	434627.57	2453505.09	25/09/2012,14:55				
245	434659.97	2453447.76	25/09/2012,14:57				
246	434673.11	2453385.72	25/09/2012,14:58				
247	434631.76	2453316.34	25/09/2012,15:00				
248	434642.22	2453270.72	25/09/2012,15:01				
249	434683.09	2453223.14	25/09/2012,15:03				
250	434713.36	2453187.96	25/09/2012,15:04				

N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha	N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha
	Longitud	Latitud			Longitud	Latitud	
	X	Y			X	Y	
1	433877.69	2453700.05	16/08/2013,12:09	51	436709.45	2454497.48	17/08/2013,12:38
2	434064.37	2453450.64	16/08/2013,12:17	52	436623.16	2455112.27	17/08/2013,12:45
3	434293.96	2453238.02	16/08/2013,12:27	53	436547.79	2455662.20	17/08/2013,12:52
4	434286.93	2453579.68	16/08/2013,12:32	54	434954.36	2453797.46	17/08/2013,14:00
5	434306.57	2453734.53	16/08/2013,12:35	55	432183.34	2453114.99	19/08/2013,11:01
6	434499.98	2453708.11	16/08/2013,12:39	56	432423.32	2453128.82	19/08/2013,11:05
7	434463.12	2453422.94	16/08/2013,12:43	57	432675.58	2453177.26	19/08/2013,11:08
8	434478.52	2453107.25	16/08/2013,12:47	58	432902.79	2453230.74	19/08/2013,11:11
9	434680.34	2453133.20	16/08/2013,12:50	59	433124.08	2453275.11	19/08/2013,11:13
10	434686.53	2453386.58	16/08/2013,12:54	60	433351.17	2453308.24	19/08/2013,11:17
11	434732.94	2453782.53	16/08/2013,12:59	61	433573.65	2453343.49	19/08/2013,11:19
12	435122.33	2453164.43	16/08/2013,13:11	62	433850.67	2453380.31	19/08/2013,11:22
13	435085.30	2453390.26	16/08/2013,13:15	63	433893.64	2453701.93	19/08/2013,11:28
14	435102.63	2453754.17	16/08/2013,13:20	64	433880.96	2453218.84	19/08/2013,11:33
15	435535.73	2453236.41	16/08/2013,13:45	65	434067.04	2453403.65	19/08/2013,11:36
16	435483.62	2453492.33	16/08/2013,13:48	66	434357.07	2453454.08	19/08/2013,11:40
17	435532.71	2453838.67	16/08/2013,13:54	67	434648.72	2453479.32	19/08/2013,11:43
18	436072.78	2453860.40	16/08/2013,14:42	68	434643.63	2453759.24	19/08/2013,11:47
19	436097.04	2453703.50	16/08/2013,14:44	69	434660.44	2453220.38	19/08/2013,11:53
20	436093.81	2453359.01	16/08/2013,14:53	70	434682.63	2453113.45	19/08/2013,11:55
21	436688.95	2453397.83	16/08/2013,15:11	71	435113.95	2453462.48	19/08/2013,12:01
22	436659.27	2453853.54	16/08/2013,15:17	72	435486.12	2453586.34	19/08/2013,12:06
23	436632.56	2454125.32	16/08/2013,15:21	73	435872.36	2453613.67	19/08/2013,12:10
24	432790.88	2453463.84	17/08/2013,09:03	74	435896.83	2453865.37	19/08/2013,12:14
25	432290.22	2453430.10	17/08/2013,09:09	75	435938.07	2453376.15	19/08/2013,12:19
26	432314.41	2453221.68	17/08/2013,09:13	76	436260.79	2453646.99	19/08/2013,12:23
27	432589.31	2453208.91	17/08/2013,09:16	7	436475.00	2453696.22	19/08/2013,12:27
28	432838.84	2453224.81	17/08/2013,09:19	78	436655.81	2453759.11	19/08/2013,12:30
29	433003.30	2453203.48	17/08/2013,09:22	79	436646.20	2453833.07	19/08/2013,12:33
30	433242.85	2453206.74	17/08/2013,09:26	80	436631.93	2453946.18	19/08/2013,12:35
31	433542.60	2453199.41	17/08/2013,09:30	81	436598.30	2454077.00	19/08/2013,12:37
32	433729.86	2453204.54	17/08/2013,09:32	82	436547.21	2454187.57	19/08/2013,12:40
33	432298.54	2452981.59	17/08/2013,09:48	83	436656.84	2453701.96	19/08/2013,12:45
34	432267.92	2453107.05	17/08/2013,09:53	84	436693.24	2453625.49	19/08/2013,12:48
35	431818.43	2452743.87	17/08/2013,10:45	85	436679.46	2453519.83	19/08/2013,12:50
36	432176.18	2453127.12	17/08/2013,11:10	86	436653.44	2453449.82	19/08/2013,12:52
37	432662.07	2453200.81	17/08/2013,11:19	87	436649.54	2453316.63	19/08/2013,12:55
38	432693.19	2453210.70	17/08/2013,11:20	88	436761.39	2453406.39	19/08/2013,12:57
39	433252.85	2453347.67	17/08/2013,11:29	89	436889.96	2453535.75	19/08/2013,12:59
40	433712.85	2453451.25	17/08/2013,11:38	90	436936.07	2453677.50	19/08/2013,13:01
41	434232.39	2453501.49	17/08/2013,11:46	91	436875.53	2453852.45	19/08/2013,13:04
42	434741.07	2453565.38	17/08/2013,11:56	92	436819.15	2453984.98	19/08/2013,13:06
43	435205.55	2453587.55	17/08/2013,12:03	93	436816.34	2454154.99	19/08/2013,13:09
44	435715.03	2453659.09	17/08/2013,12:11	94	436806.94	2454391.78	19/08/2013,13:13
45	436265.21	2453655.03	17/08/2013,12:19	95	436555.00	2454378.81	19/08/2013,13:16
46	436636.57	2453714.76	17/08/2013,12:25	96	436543.66	2454366.00	19/08/2013,13:16
47	436637.24	2453749.24	17/08/2013,12:26	97	436750.60	2454481.03	19/08/2013,13:20
48	436643.46	2453784.11	17/08/2013,12:28	98	436924.47	2454583.75	19/08/2013,13:24
49	436635.05	2453823.76	17/08/2013,12:29	99	437073.89	2454669.79	19/08/2013,13:26
50	436639.02	2453990.35	17/08/2013,12:31	100	437144.79	2454699.41	19/08/2013,13:28

N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha	N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha
	Longitud	Latitud			Longitud	Latitud	
	X	Y			X	Y	
101	437083.28	2454381.91	19/08/2013,13:31	151	432678.45	2453185.57	20/08/2013,10:18
102	437120.02	2454219.97	19/08/2013,13:34	152	432877.71	2453235.23	20/08/2013,10:21
103	437335.46	2454058.95	19/08/2013,13:39	153	433091.99	2453290.13	20/08/2013,10:23
104	437195.81	2453875.01	19/08/2013,13:41	154	433338.66	2453332.05	20/08/2013,10:25
105	437184.56	2453679.11	19/08/2013,13:44	155	433646.30	2453327.09	20/08/2013,10:28
106	437138.37	2453615.93	19/08/2013,13:45	156	433866.37	2453371.53	20/08/2013,10:30
107	437064.66	2453530.31	19/08/2013,13:47	157	434121.73	2453479.46	20/08/2013,10:32
108	437011.25	2453391.30	19/08/2013,13:49	158	434168.46	2453683.40	20/08/2013,10:35
109	437014.65	2453284.26	19/08/2013,13:51	159	434139.21	2453737.32	20/08/2013,10:38
110	436834.43	2453136.59	19/08/2013,13:54	160	434081.42	2453180.64	20/08/2013,10:44
111	436780.15	2453130.33	19/08/2013,13:55	161	434361.57	2453436.39	20/08/2013,10:47
112	436842.77	2452961.50	19/08/2013,13:57	162	434575.19	2453793.13	20/08/2013,10:51
113	436895.09	2452931.47	19/08/2013,13:59	163	434624.45	2453745.55	20/08/2013,10:52
114	437122.88	2453054.87	19/08/2013,14:02	164	434699.55	2453503.56	20/08/2013,10:55
115	437318.09	2453511.43	19/08/2013,14:11	165	434670.86	2453120.98	20/08/2013,10:59
116	437569.45	2453502.19	19/08/2013,14:16	166	435114.73	2453472.69	20/08/2013,11:03
117	437668.78	2453341.88	19/08/2013,14:20	167	435482.51	2453555.49	20/08/2013,11:06
118	438156.52	2453514.58	19/08/2013,14:27	168	435674.43	2453586.07	20/08/2013,11:07
119	437626.51	2453644.48	19/08/2013,14:35	169	435848.89	2453857.81	20/08/2013,11:10
120	436557.67	2454164.15	19/08/2013,14:48	170	435894.17	2453638.67	20/08/2013,11:13
121	436636.07	2454076.33	19/08/2013,14:51	171	435880.76	2453363.59	20/08/2013,11:17
122	436665.89	2453966.76	19/08/2013,14:53	172	435959.48	2453419.16	20/08/2013,11:18
123	436634.46	2453915.84	19/08/2013,14:55	173	436065.93	2453515.91	20/08/2013,11:19
124	436652.64	2453811.30	19/08/2013,14:05	174	436204.17	2453650.11	20/08/2013,11:21
125	436674.33	2453751.76	19/08/2013,15:00	175	436374.97	2453935.39	20/08/2013,11:25
126	436689.37	2453641.86	19/08/2013,15:02	176	436415.60	2453864.69	20/08/2013,11:27
127	436684.45	2453529.13	19/08/2013,15:04	177	436496.29	2453721.95	20/08/2013,11:36
128	436650.78	2453437.25	19/08/2013,15:06	178	436543.68	2453597.96	20/08/2013,11:39
129	436584.55	2453376.75	19/08/2013,15:08	179	436509.93	2453474.79	20/08/2013,11:41
130	436477.81	2453689.92	19/08/2013,15:13	180	436557.59	2453398.83	20/08/2013,11:44
131	436302.37	2453645.13	19/08/2013,15:16	181	436631.18	2453323.42	20/08/2013,11:46
132	436015.01	2453395.26	19/08/2013,15:23	182	436725.15	2453389.53	20/08/2013,11:48
133	435878.50	2453558.26	19/08/2013,15:26	183	436692.71	2453508.68	20/08/2013,11:50
134	435812.89	2453849.84	19/08/2013,15:31	184	436681.00	2453634.79	20/08/2013,11:52
135	435688.74	2453677.01	19/08/2013,15:34	185	436668.84	2453690.35	20/08/2013,11:53
136	435674.87	2453287.69	19/08/2013,15:38	186	436655.75	2453757.42	20/08/2013,11:55
137	435194.65	2453520.16	19/08/2013,15:44	187	436637.27	2453842.76	20/08/2013,11:56
138	434947.18	2453813.52	19/08/2013,15:49	188	436612.97	2453940.99	20/08/2013,11:58
139	434800.56	2453798.59	19/08/2013,15:51	189	436566.29	2454075.55	20/08/2013,12:00
140	434724.05	2453467.91	19/08/2013,15:56	190	436542.11	2454207.88	20/08/2013,12:02
141	434759.38	2453107.62	19/08/2013,16:02	191	436525.35	2454387.73	20/08/2013,12:04
142	434507.13	2453101.37	19/08/2013,16:06	192	436724.61	2454525.94	20/08/2013,12:07
143	434317.42	2453437.75	19/08/2013,16:10	193	436929.89	2454549.42	20/08/2013,12:10
144	434102.94	2453477.93	19/08/2013,16:12	194	437138.51	2454637.40	20/08/2013,12:12
145	433917.81	2453764.02	19/08/2013,16:17	195	437101.40	2454405.61	20/08/2013,12:16
146	434008.52	2453733.91	19/08/2013,16:18	196	437149.04	2454245.54	20/08/2013,12:19
147	434136.68	2453700.52	19/08/2013,16:21	197	437330.86	2454096.95	20/08/2013,12:21
148	434279.06	2453729.65	19/08/2013,16:24	198	437229.47	2453837.48	20/08/2013,12:24
149	434400.04	2453759.03	19/08/2013,16:26	199	437173.48	2453698.58	20/08/2013,12:26
150	432451.94	2453116.28	20/08/2012,10:16	200	437129.09	2453586.17	20/08/2013,12:29

N° de lance	Coordenadas UTM		Fecha
	Longitud	Latitud	
	X	Y	
201	437079.91	2453539.03	20/08/2013,12:30
202	437039.71	2453427.97	20/08/2013,12:32
203	437004.75	2453364.40	20/08/2013,12:34
204	436973.63	2453276.85	20/08/2013,12:35
205	436840.78	2453078.49	20/08/2013,12:38
206	436788.84	2453067.22	20/08/2013,12:39
207	436837.85	2452979.53	20/08/2013,12:41
208	436897.84	2452925.33	20/08/2013,12:42
209	437098.40	2453066.02	20/08/2013,12:46
210	437172.99	2453200.92	20/08/2013,12:47
211	437189.51	2453251.61	20/08/2013,12:48
212	437234.71	2453320.58	20/08/2013,12:49
213	437317.54	2453425.40	20/08/2013,12:52
214	437443.38	2453687.66	20/08/2013,12:55
215	437178.57	2453688.16	20/08/2013,12:58
216	436997.37	2453681.45	20/08/2013,13:01
217	436904.17	2453686.43	20/08/2013,13:02
218	436660.84	2453684.98	20/08/2013,13:05
219	436474.11	2453705.46	20/08/2013,13:07
220	436274.15	2453694.88	20/08/2013,13:09
221	435888.20	2453665.27	20/08/2013,13:12
222	435491.43	2453612.59	20/08/2013,13:15
223	435085.80	2453569.85	20/08/2013,13:18
224	434641.74	2453511.50	20/08/2013,13:21

ANEXO B

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE SEDIMENTO

INTRODUCCIÓN

Al tratar con algunos problemas costeros es imperativo conocer la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen el lecho marino y/o lacustre, dado el papel relevante que juega en los fenómenos relacionados con la mecánica del transporte de sedimentos, asimismo, nos permite de entre las muchas contribuciones de interés práctico relacionadas con el transporte de sedimentos seleccionar las más adecuadas de acuerdo a las características de una región, dado que la mayoría de dichas contribuciones rigen para sedimentos cohesivos mal graduadas. Además, la definición de los tipos de sedimento, la valoración de sus propiedades físicas básicas así como su distribución sobre una región coadyuva a inferir la movilidad, depósito, acumulación y la fuente o procedencia de los sedimentos.

Por otro parte, las observaciones de quienes se han dedicado al estudio de los sedimentos naturales llevan a la conclusión de que los tamaños de las partículas que constituyen tales sedimentos no se distribuyen según una ley única (García et al., 1998). Sin embargo, también dependiendo de las condiciones en las que se encuentran los sedimentos en el lecho marino y/o lacustre, se pueden dar casos que presentan una tendencia bastante definida hacia cierto tipo de distribución, es decir, existen sedimentos que se ajustan más a una determinada distribución que a otra, aunque la concordancia entre la distribución real y la distribución teórica difícilmente es perfecta, con el ajuste a una distribución teórica la determinación de los diámetros característicos es mucho más rápida y precisa. Además, para diversos propósitos prácticos, es necesaria la estimación de valores representativos de los parámetros granulométricos, cuando se trabaja con un conjunto de muestras de sedimento.

De acuerdo con lo anterior, en este anexo se describe la metodología que se siguió para analizar las muestras de sedimento recolectadas *in situ* durante la campaña de campo realizada entre el 20 y el 29 de septiembre del 2012. La ubicación de los sitios de muestreo se presenta en la **Figura 3-24** del capítulo 3.

METODOLOGÍA

Para el análisis de las muestras de sedimento recolectadas *in situ* fue necesario combinar distintas metodologías (García et al., 1998; Folk, 1957; Badillo et al., 1996, Ruiz, 2009). Primero se exponen las pruebas, métodos y técnicas para la valoración de las propiedades físicas básicas de las muestras, seguido de las propiedades físicas de las partículas individuales, y por último, el análisis de la distribución de los tamaños de las partículas.

VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS BÁSICAS DE LA MUESTRA

La expresión que se usó para determinar la densidad relativa del material (S_s) de la muestra a partir de datos de laboratorio fue:

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}}$$

Donde W_s es el peso del material seco (g), W_{fw} representa el peso del matraz con agua (g) y W_{fsw} es el peso del material inmerso en el agua del matraz (g).

A partir del cálculo de la densidad relativa del material, la densidad relativa del material dentro del agua se conoció utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta = S_s - 1$$

Donde S_s es la densidad relativa del material (adimensional) y Δ es la densidad relativa del material dentro del agua (adimensional). El peso específico de las partículas de la muestra se obtuvo de la ecuación:

$$\gamma_s = S_s \gamma_0$$

Donde γ_s es el peso específico de las partículas en kg/m^3 . Para conocer la densidad de las partículas de la muestra ζ se utilizó la relación:

$$\zeta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

En la cual, ρ_s es la densidad de las partículas en kg/m^3 y ρ es la densidad del agua, que tiene el valor de 1027 kg/m^3 (agua salada) (Ruiz, 2009).

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico consistió básicamente en conocer la distribución de los tamaños de las partículas, en determinar si dicha distribución se ajusta ó no a un modelo teórico, y en analizar los resultados mediante técnicas estadísticas.

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS

La separación de las muestras en diferentes fracciones, según los tamaños de sus partículas, se realizó mediante un instrumento optoelectrónico (CAMSIZER), como el que se muestra en la **Figura B-1**, cuyo principio de medición está basado en el procesamiento digital de imágenes dinámicas descrito en ISO 13322-2. La maniobra consistió básicamente en hacer pasar por separado las muestras de material a través del tubo receptor del CAMSIZER, una vez que fueron lavadas y secadas.

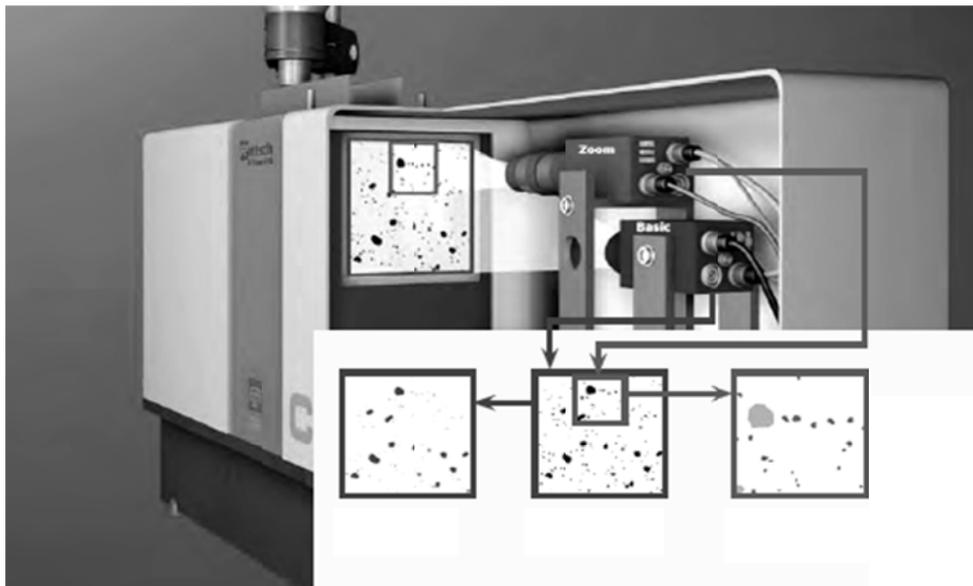


Figura B-1.- Instrumento optoelectrónico (CAMSIZER).

En seguida con los resultados de este instrumento se obtuvo la Tabla de Distribución de Frecuencias, la cual es una representación tabular de la granulometría.

Tabla B-1.- Tabla de Distribución de Frecuencias.

Malla No.	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
(Col. 1)	(Col. 2)	(Col. 3)	(Col. 4)	(Col. 5)	(Col. 6)

Para después graficar la magnitud de los valores de las columnas 2 y 6 de la tabla de distribución de frecuencias en diferentes tipos de papel o sistemas coordenados. El resultado de esta representación gráfica se le conoce como curva granulométrica de la muestra.

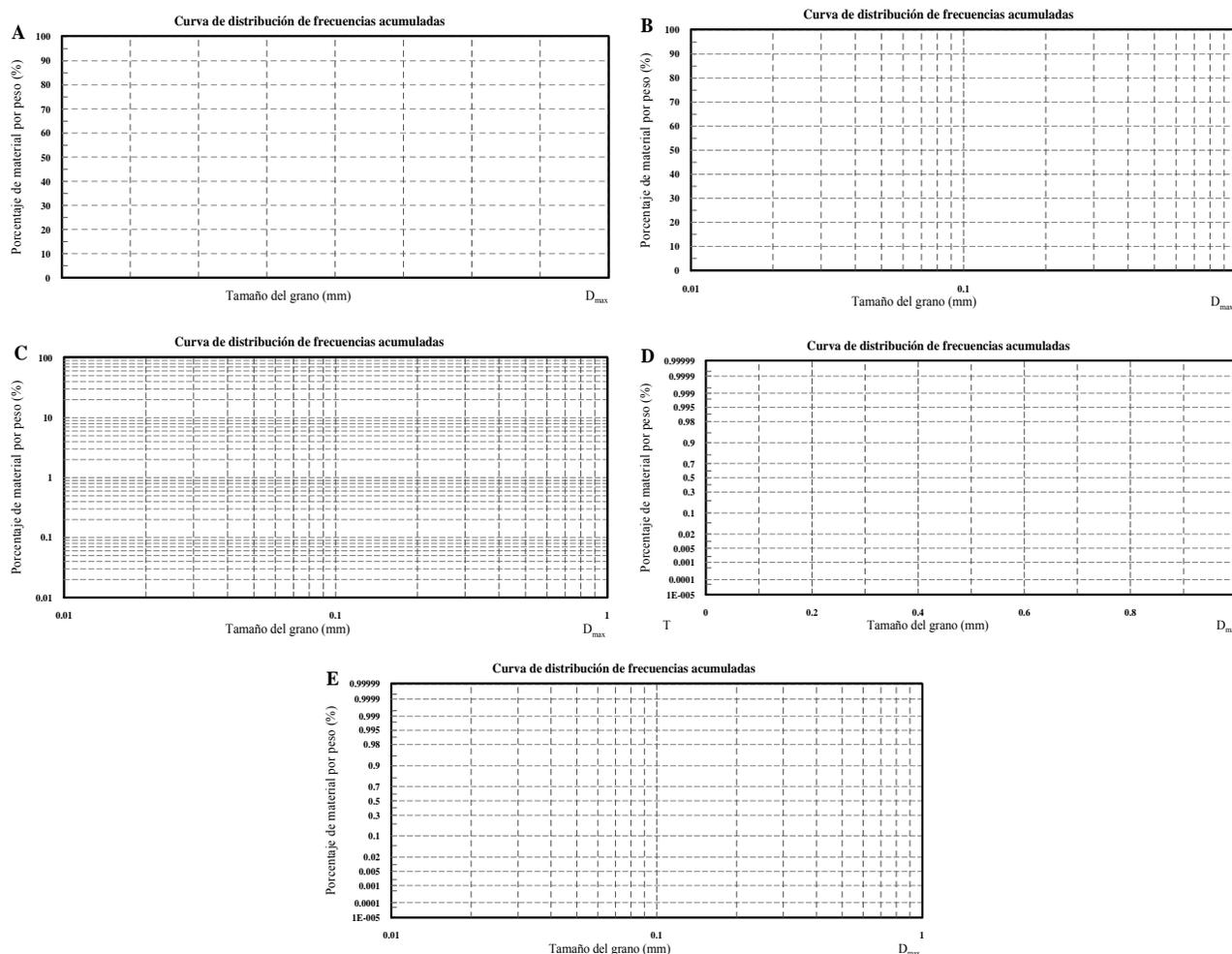


Figura B-2.- Diferentes tipos de papel o sistemas coordenados: A) Papel aritmético (la escala de ambos ejes coordenados es aritmética), B) Papel semilogaritmico (la escala del eje de las abscisas es logaritmica y la del eje de las ordenadas es aritmética), C) Papel logaritmico (la escala de ambos ejes coordenados es logaritmica), D) Papel probabilidad (la escala del eje de abscisas es aritmética y la del eje de las ordenadas sigue una ley de probabilidad normal o gaussiana), E) Papel log - normal (la escala del eje de las abscisas es logaritmica y la del eje de las ordenadas es conforme a una ley de probabilidad normal).

La representación gráfica de la curva granulometrica en estos tipos de papel o sistemas coordenados facilita el análisis de la muestra y a encontrar la distribución teórica que mejor se ajusta a los datos obtenidos. Sin embargo, primero hay que verificar si el numero y tamaño de las

mallas que se utilizará para separar las muestras de sedimento es el adecuado, por que emplear pocas mallas hace que en la curva granulométrica, aparezcan escalones o discontinuidades, y aunque se dispongan de muchas mallas, la equivocación suele estar en una selección incorrecta de las mismas.

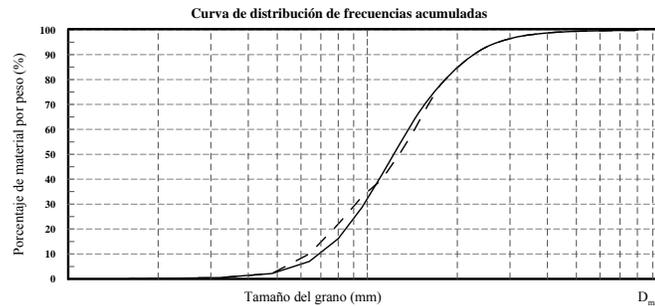


Figura B-3.- Las dos curvas granulométricas pertenece a la misma muestra, aunque la curva de línea discontinua (---) se obtuvo con un conjunto de mallas diferente de la curva de línea continua (—).

La verificación del juego de mallas se hace analizando preliminarmente dos muestras, las cuales a simple vista sean las que presentan mayor dispersión de tamaños, o bien las que contienen el material más fino y el más grueso. Luego, de acuerdo con los tamaños de las partículas, se escoge tentativamente un conjunto de seis o más mallas, para después hacer pasar las muestras juntas o íntegramente a través del conjunto de mallas y pesar el material retenido en cada de ellas. En seguida se dibuja en papel semilogaritmico la curva granulométrica de la muestra analizada y se determina si las mallas utilizadas quedaron convenientemente espaciadas. En todo caso hay que emplear las mallas que estén más próximas a los diámetros que interesan como son el D_5 , D_{16} , D_{35} , D_{50} , D_{75} , D_{84} , D_{90} y D_{95} .

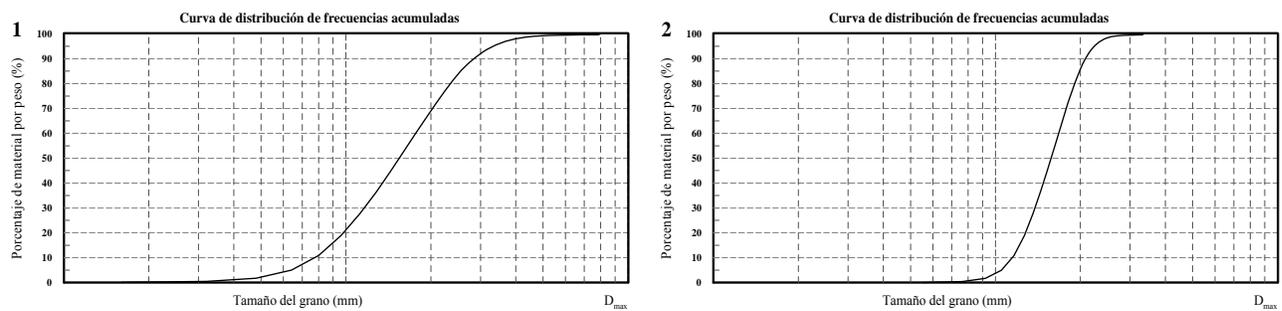


Figura B-4.- La curva de la gráfica de la izquierdapertenece a una muestra de material de granulometría extendida o bien graduada o mal clasificada, es decir, que presenta una variedad de tamaños de partículas, mientras que la curva de la otra gráfica pertenece a una muestra de granulometría uniforme o mal graduada o bien clasificada, es decir, que el tamaño de las partículas se agrupa en torno a un solo tamaño, por lo tanto, presentan una pequeña desviación estándar.

Una vez definidas las mallas por utilizar en el análisis granulométrico, se procedió a hacer pasar por separado todas las muestras de material a través del conjunto de mallas seleccionadas y en pesar el material retenido en cada una de ellas, para así obtener la tabla de distribución de frecuencias de cada muestra. La representación gráfica de la curva granulométrica de cada muestra, se hizo en papel semilogaritmico donde se dibujaron los límites que recomienda la ASTM para la clasificación granulométrica.

Para obtener la curva granulométrica representativa del conjunto de muestras, se sumaron los pesos retenidos en cada malla de cada una de las muestras tomadas y se completó la tabla de distribución de frecuencias del conjunto de muestras.

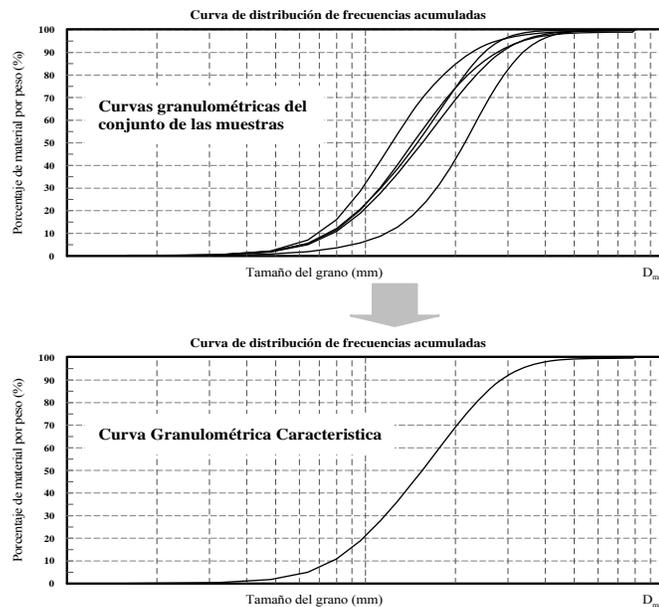


Figura B-5.- Obtención de la curva granulométrica representativa del conjunto de muestras.

ANÁLISIS PARA EL AJUSTE A UN MODELO TEÓRICO

Existen diferentes modelos teóricos en las que la distribución de tamaños de las partículas de una muestra de material se puede ajustar, aunque la concordancia entre una distribución real y una teórica difícilmente es perfecta, presentándose regularmente las discordancias en los extremos o colas de la distribución: las fracciones de material muy fino o muy grueso son las que se alejan de la distribución.

En el análisis de mejor ajuste a un modelo teórico, para determinar si la curva granulométrica representativa del conjunto de muestras puede o no ajustarse a un modelo teórico, se utilizaron los siguientes modelos:

MODELO LOG – NORMAL

Si la distribución de tamaños de las partículas tienden a seguir una ley del tipolog - normal de probabilidades, es decir, que los logaritmos de los tamaños se disponen según una distribución normal o gaussiana de probabilidades, puede describirse mediante la ecuación:

$$D_n = D_{60} (\sigma_g)^{Z_n}$$

donde:

Z_n variable aleatoria estándar. Es una variable que tiene distribución normal, con media igual a cero y desviación estándar igual a uno. Esta variable puede asumir cualquier valor en el intervalo $-\infty \leq Z_n \leq \infty$, según se satisfaga una probabilidad dada. El valor de Z_n para un porcentaje dado, se obtien con ayuda de la tabla x.

σ_g desviación estándar geométrica. Es una medida de dispersión que indica que tan alejados están los datos respecto de un valor central. Se define como:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$$

Además, si la granulometría es log - normal, se verifica que:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}} = \frac{D_{50}}{D_{16}} = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}} \right)^{1/2}$$

o sea que la desviación estándar geométrica es un parámetro adimensional. De la ecuación anterior se obtiene que:

$$D_{50} = \sqrt{D_{84} D_{16}}$$

Por otro lado, como la distribución log - normal no es simétrica, la mediana (D50) y la media (Dm) no son iguales, o sea $D_{50} \neq D_m$, la ecuación para determinar el diámetro medio es

$$D_m = D_{50} \exp \left[\frac{1}{2} (\log_e \sigma_g)^2 \right]$$

MODELO NORMAL

Si la distribución de tamaños de las partículas tienden a seguir una distribución de tamaños normal o gaussiana, entonces puede describirse mediante la ecuación:

$$D_n = D_{50} + Z_n \sigma$$

donde:

Z_n variable aleatoria estándar.

σ_g desviación estándar geométrica. Se define como:

$$\sigma = D_{84} - D_{50}$$

Cuando la granulometría es normal, se cumple que:

$$\sigma = D_{84} - D_{50} = D_{50} - D_{16} = \frac{1}{2} (D_{84} - D_{16})$$

o sea que la desviación estándar tiene las unidades de la variable aleatoria. De la ecuación anterior se llega a:

$$D_{50} = \frac{1}{2} (D_{84} + D_{16})$$

Asimismo, dado que la distribución normal es simétrica, media, mediana y moda coinciden; es decir

$$D_{50} = D_m$$

MODELO SEMILOGARÍTMICA

Si los logaritmos de los tamaños de las partículas se distribuyen linealmente, entonces la distribución de los tamaños puede describirse por medio de la ecuación:

$$D_n = D_{50} \sigma_g^{P_n}$$

donde:

P_n variable, cuyo valor depende del porcentaje n correspondiente al diámetro que interesa determinar. Se calcula mediante la ecuación:

$$P_n = \frac{n - 50}{34}$$

σ_g desviación estándar geométrica. Se define como:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$$

Además, como en el caso de la distribución log – normal, si la distribución es logarítmica, se verifica que:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}} = \frac{D_{50}}{D_{16}} = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}} \right)^{1/2}$$

MODELO LOG – LOG

Si los logaritmos de los tamaños de las partículas se distribuyen logarítmicamente, entonces la distribución de los tamaños puede describirse por medio de la ecuación:

$$D_n = D_{50} \sigma_g^{q_n}$$

donde:

q_n variable, cuyo valor depende del porcentaje n correspondiente al diámetro que interesa determinar. Se calcula como:

$$q_n = 4.43835 \log \left(\frac{n}{50} \right)$$

σ_g desviación estándar geométrica. Se define como:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$$

Si la granulometría es logarítmica, se verifica que:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}} = \left(\frac{D_{50}}{D_{16}} \right)^{0.45531} = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}} \right)^{0.31286}$$

donde:

$$D_{50} = (D_{16})^{0.31286} (D_{84})^{0.68714}$$

El análisis de mejor ajuste consistió primero en dibujar la curva granulométrica en los distintos papeles o sistemas coordenados que se presentan en la **Figura B-6**, y observar si en alguno de ellos los datos de la curva tienden a ponerse en línea recta. Cuando los puntos quedan aproximadamente alineados a lo largo de una recta en un determinado tipo de papel, se está entonces ante un problema de regresión o ajuste, ante esta situación se puede optar por encontrar la recta o función que se adapta mejor a los datos reales siguiendo un criterio estándar, como el método de mínimos cuadrados, o efectuar el ajuste de forma gráfica, dibujando una recta que pase más o menos en medio de todos los puntos.

Para efectuar el ajuste de forma gráfica se acepta como recta de ajuste la que resulta de unir los puntos cuyas coordenadas son $(D_{15.87}, 15.87\%)$ y $(D_{84.13}, 84.13\%)$ en el papel donde los puntos de la curva granulométrica tienden a alinearse. Es de esta recta de donde se obtienen los diámetros característicos (D_n) de forma gráfica, o analíticamente obteniendo primero de la gráfica él $(D_{15.87}, 15.87\%)$ y $(D_{84.13}, 84.13\%)$ para después utilizar las ecuaciones del modelo que mejor se ajustó a los datos.

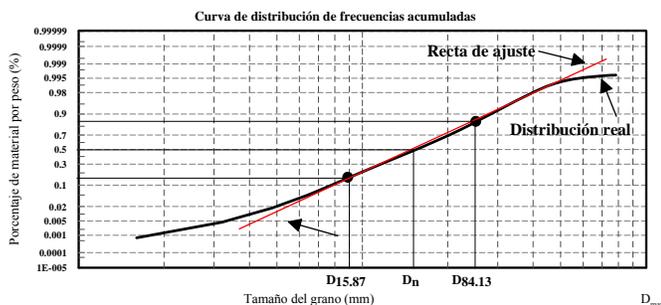


Figura B-6.- Obtención de la recta de ajuste.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para el cálculo de los parámetros estadísticos se empleó la metodología de Folk (1957), misma que a continuación se detalla:

Se convirtieron los diámetros nominales de interés (en este caso, $D_5, D_{10}, D_{16}, D_{25}, D_{30}, D_{50}, D_{60}, D_{75}, D_{84}, D_{86}$ y D_{95}) con unidades en milímetros a unidades Phi. Las ecuaciones utilizadas para realizar dicha transformación fueron:

$$\phi = -\log_2 D$$

$$D = 2^{-\phi}$$

Donde D es el diámetro del sedimento en milímetros y ϕ son las unidades Phi.

Para el cálculo de las medidas estadísticas para el análisis de las muestras, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Diámetromedio = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

→ Es el promedio de los 3 percentiles seleccionados de la distribución de frecuencias en escala Phi.

$$Desviación\ estándar = \frac{\phi_{84} + \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{4}$$

→ Es la medida de como una muestra varía de una distribución normal, es decir, el grado en que una muestra se extiende alrededor de la media.

$$Sesgo = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

→ Es el grado en el cual una distribución se aparta de la simetría.

$$Curtosis = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

→ Sirve para medir el apuntalamiento de las distribuciones, esto es la medida de la concentración de frecuencias alrededor de la media y en la zona central de la distribución.

Adicionalmente a los parámetros estadísticos calculados con la metodología se Folk, se determinaron los coeficientes de uniformidad C_c y de curvatura C_u de la muestra, ambos coeficientes fueron calculados utilizando las siguientes expresiones (Badillo et al., 1996):

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$$

→ Es una medida simple de uniformidad de un suelo, propuesto por Allen Hazen. Los suelos con un $C_u < 3$ se consideran muy uniformes.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

→ Es un dato complementario necesario para definir la graduación. Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados.

Donde D_n representa el n percentil en milímetros.

Relaciones relativas a los rangos de desviación estándar, sesgo y curtosis se muestran en la **Tabla B-2**.

Tabla B-2.- Distribución de rangos para la desviación estándar, sesgo y la curtosis de la distribución de tamaños de las muestras de sedimento (tomado de King y Galvin, 2002).

Rango Phi	Descripción
Desviación estándar :	
<0.35	Muy bien clasificada
0.35 – 0.50	Bien clasificada
0.50 – 0.71	Moderadamente bien clasificada
0.71 – 1.00	Moderadamente clasificada
1.00 – 2.00	Mal clasificada
2.00 – 4.00	Muy mal clasificada
>4.00	Extremadamente mal clasificada
Sesgo :	
<-0.3	Muy asimétrica hacia los gruesos
-0.3 a -0.1	Asimétrica hacia los gruesos
-0.1 a 0.1	Casi simétrica
0.1 a 0.3	Asimétrica hacia los finos
>0.3	Muy asimétrica hacia los finos
Curtosis :	
<0.65	Muy platicúrtico (plano)
0.65 – 0.90	Platicúrtico
0.90 – 1.11	Mesocúrtico
1.11 – 1.50	Leptocúrtico
1.50 – 3.00	Muy leptocúrtico
>3.00	Extremadamente leptocúrtico

Con los valores proporcionados del análisis granulométrico, así como de la estadística, las muestras de sedimento se clasificaron según las escalas de Wentworth y de la ASTM. En la **Tabla B-3** se muestran los tipos de sedimento según su rango de acuerdo con dichas escalas.

Tabla B-3.- Clasificación según escala de Wentworth y de la ASTM (tomado de King y Galvin, 2002).

Unidades en mm

Clasificación	Límite de los rangos
Wentworth :	
Gravas muy grandes	64 – 32
Gravas grandes	32 – 16
Gravas medianas	16 – 8
Gravas pequeñas	8 – 4
Gránulos	4 – 2
Arena muy gruesa	2 – 1
Arena gruesa	1 – 0.5
Arena media	0.5 – 0.25
Arena fina	0.25 – 0.125
Arena muy fina	0.125 – 0.0625
ASTM :	
Grava gruesa	76.11 – 19.03
Grava fina	19.03 – 4.76
Arena gruesa	4.76 – 2.00
Arena media	2.00 – 0.425
Arena fina	0.425 – 0.075
Grano fino	< 0.075

VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS PARTÍCULAS INDIVIDUALES

Para determinar la forma de las partículas de la muestra o sedimento se utilizó la expresión de forma de forma:

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}}$$

para este fin se tomaron fotografías de las partículas de arena y se extrajeron las dimensiones correspondientes a lo largo (a), ancho (b) y espesor del sedimento (c). Para el caso de esferas, $SF = 1$, para otras formas se obtendrá que $SF < 1$.

Tabla B-4.- Clasificación según la forma de la partícula (tomado de García et al., 1998).

Redondez	Descripción	SF
Muy angular	Partículas con superficie de fracturas recientes, múltiples aristas y bordes cortantes	0.12 – 0.17
Angular	Presentan esquinas y bordes ásperos, lastiman, no son tan cortantes o afiladas si no de formas más bien prismáticas.	0.17 – 0.25
Subangular	Se distinguen bordes y aristas pero están despuntadas o ligeramente redondeadas.	0.25 – 0.35
Subredondeada	Se distinguen pero no se sienten las aristas no los bordes. Se aprecia que estos han sido redondeados.	0.35 – 0.49
Redondeada	Tiende a equidimensional. No se diferencian esquinas o puntas al rolarlo con los dedos.	0.49 – 0.70
Bien redondeada	Partículas con superficie llana o pulida. Aproximadamente esféricas o elipsoidales.	0.70 – 1.00

La velocidad de caída de las partículas de sedimento se realizó mediante medición experimental. Este experimento consistió en seleccionar las partículas de sedimento con un D_{50} cercano al D_{50} teórico, proveniente del análisis granulométrico. Para esto se realizó un análisis fotográfico que permitió conocer cuáles eran las partículas adecuadas. Después de esto se dejaban caer en una probeta con agua uno por uno. La caída de las partículas se grabó con una cámara de video en función del tamaño de las partículas. Posteriormente se realizó un análisis de los videos con lo cual se obtuvieron los tiempos de recorrido de cada una de las partículas (Del Valle, 2010). Conociendo la distancia y el tiempo se aplicó la siguiente expresión para el cálculo de la velocidad de caída para cada partícula de sedimento.

$$W_f = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}}$$

ANEXO C

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 1 de 10		Muestra : 1		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.99 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.79	99.21
#18	0.980	0.13	99.87	0.01732"	0.440	0.91	99.09
0.03780"	0.960	0.14	99.86	#40	0.420	1.05	98.95
0.03701"	0.940	0.15	99.85	0.01575"	0.400	1.23	98.77
0.03622"	0.920	0.16	99.84	0.01496"	0.380	1.47	98.53
0.03543"	0.900	0.17	99.83	#45	0.360	1.78	98.22
0.03465"	0.880	0.18	99.82	0.01339"	0.340	2.17	97.83
#20	0.860	0.19	99.81	0.01260"	0.320	2.68	97.32
#20	0.840	0.20	99.80	#50	0.300	3.39	96.61
0.03228"	0.820	0.21	99.79	0.01102"	0.280	4.37	95.63
0.03150"	0.800	0.22	99.78	0.01024"	0.260	5.69	94.31
0.03071"	0.780	0.24	99.76	0.00945"	0.240	7.60	92.40
0.02992"	0.760	0.25	99.75	0.00866"	0.220	10.42	89.58
0.02913"	0.740	0.27	99.73	0.00787"	0.200	14.30	85.70
#25	0.720	0.29	99.71	#80	0.180	19.41	80.59
#25	0.700	0.32	99.68	0.00630"	0.160	26.28	73.72
0.02677"	0.680	0.33	99.67	0.00551"	0.140	35.89	64.11
0.02598"	0.660	0.36	99.64	0.00472"	0.120	48.81	51.19
0.02520"	0.640	0.38	99.62	0.00394"	0.100	64.63	35.37
0.02441"	0.620	0.39	99.61	0.00315"	0.080	80.96	19.04
#30	0.600	0.42	99.58	0.00236"	0.060	93.01	6.99
0.02283"	0.580	0.44	99.56	0.00157"	0.040	98.44	1.56
0.02205"	0.560	0.47	99.53	#635	0.020	99.80	0.20
0.02126"	0.540	0.51	99.49	Charola	0.000	99.99	0.01
0.02047"	0.520	0.56	99.44				
#35	0.500	0.63	99.37			suma =	99.99
0.01890"	0.480	0.70	99.30			% de error =	0.01

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA		
	<p>% de material de la muestra :</p> <p>Grava : 00.00 % Arena : 93.01 % Finos : 6.99 %</p> <p>Tipo de sedimento :</p> <p>Wentworth : Arena muy fina ASTM : Arena fina</p>	
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.050 mm. D₁₀ = 0.066 mm. D₁₆ = 0.074 mm. D₂₅ = 0.087 mm. D₃₀ = 0.093 mm. D₅₀ = 0.119 mm. D₆₀ = 0.134 mm. D₇₅ = 0.161 mm. D₈₄ = 0.192 mm. D₉₀ = 0.224 mm. D₉₅ = 0.267 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.03$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 0.98$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 3.06 = 0.119 mm Devs. estandar = 0.93 = 0.525 mm Sesgo = -0.02 Curtosis = 1.11</p> <p>Clasificación :</p> <p>Devs. estandar = Clasif. moderada Sesgo = Cercanamente simetrica Curtosis = Mesocurtico</p>

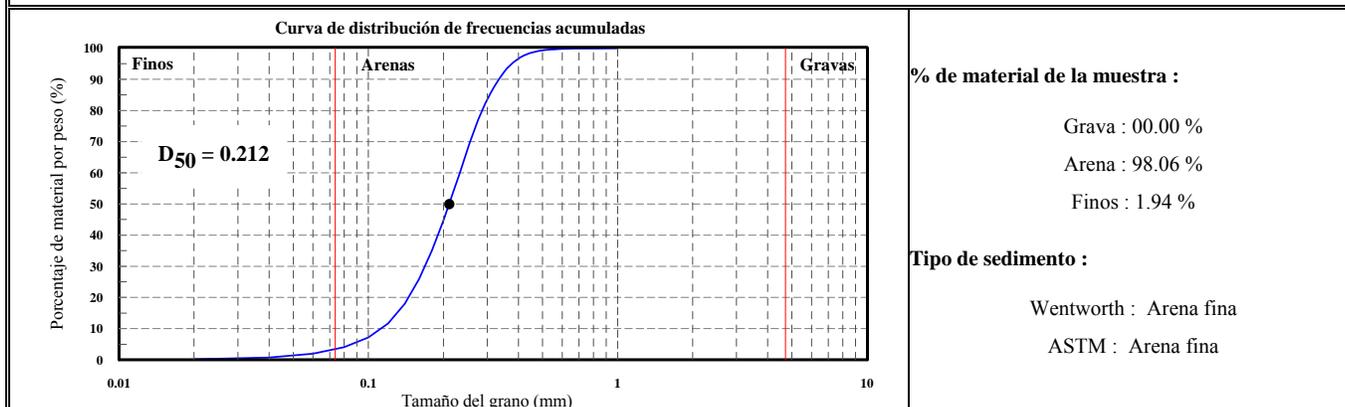
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 2 de 10		Muestra : 2		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.99 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.15	99.85
#18	0.980	0.03	99.97	0.01732"	0.440	0.19	99.81
0.03780"	0.960	0.03	99.97	#40	0.420	0.27	99.73
0.03701"	0.940	0.03	99.97	0.01575"	0.400	0.38	99.62
0.03622"	0.920	0.04	99.96	0.01496"	0.380	0.54	99.46
0.03543"	0.900	0.04	99.96	#45	0.360	0.79	99.21
0.03465"	0.880	0.04	99.96	0.01339"	0.340	1.20	98.80
#20	0.860	0.04	99.96	0.01260"	0.320	1.88	98.12
#20	0.840	0.04	99.96	#50	0.300	2.96	97.04
0.03228"	0.820	0.04	99.96	0.01102"	0.280	4.65	95.35
0.03150"	0.800	0.05	99.95	0.01024"	0.260	7.28	92.72
0.03071"	0.780	0.05	99.95	0.00945"	0.240	11.29	88.71
0.02992"	0.760	0.05	99.95	0.00866"	0.220	16.89	83.11
0.02913"	0.740	0.05	99.95	0.00787"	0.200	24.00	76.00
#25	0.720	0.05	99.95	#80	0.180	32.49	67.51
#25	0.700	0.05	99.95	0.00630"	0.160	42.22	57.78
0.02677"	0.680	0.06	99.94	0.00551"	0.140	52.73	47.27
0.02598"	0.660	0.07	99.93	0.00472"	0.120	63.55	36.45
0.02520"	0.640	0.07	99.93	0.00394"	0.100	74.79	25.21
0.02441"	0.620	0.07	99.93	0.00315"	0.080	85.86	14.14
#30	0.600	0.07	99.93	0.00236"	0.060	94.44	5.56
0.02283"	0.580	0.07	99.93	0.00157"	0.040	98.69	1.31
0.02205"	0.560	0.07	99.93	#635	0.020	99.84	0.16
0.02126"	0.540	0.08	99.92	Charola	0.000	99.99	0.01
0.02047"	0.520	0.09	99.91				
#35	0.500	0.11	99.89			suma =	99.99
0.01890"	0.480	0.13	99.87			% de error =	0.01

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA		
	<p>% de material de la muestra :</p> <p>Grava : 00.00 % Arena : 94.44 % Finos : 5.56 %</p> <p>Tipo de sedimento :</p> <p>Wentworth : Arena fina ASTM : Arena fina</p>	
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.057 mm. D₁₀ = 0.071 mm. D₁₆ = 0.083 mm. D₂₅ = 0.099 mm. D₃₀ = 0.108 mm. D₅₀ = 0.144 mm. D₆₀ = 0.164 mm. D₇₅ = 0.197 mm. D₈₄ = 0.224 mm. D₉₀ = 0.244 mm. D₉₅ = 0.278 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.31$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.00$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 2.85 = 0.139 mm Devs. estandar = 0.87 = 0.549 mm Sesgo = -0.14 Curtosis = 0.94</p> <p>Clasificación :</p> <p>Devs. estandar = Clasif. moderada Sesgo = Sesgo grueso Curtosis = Mesocurtico</p>

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Prueba : 3 de 10		Muestra : 3		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.99 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	1.27	98.73
#18	0.980	0.06	99.94	0.01732"	0.440	1.71	98.29
0.03780"	0.960	0.06	99.94	#40	0.420	2.37	97.63
0.03701"	0.940	0.07	99.93	0.01575"	0.400	3.34	96.66
0.03622"	0.920	0.07	99.93	0.01496"	0.380	4.67	95.33
0.03543"	0.900	0.08	99.92	#45	0.360	6.45	93.55
0.03465"	0.880	0.08	99.92	0.01339"	0.340	8.87	91.13
#20	0.860	0.09	99.91	0.01260"	0.320	12.18	87.82
#20	0.840	0.09	99.91	#50	0.300	16.53	83.47
0.03228"	0.820	0.09	99.91	0.01102"	0.280	21.93	78.07
0.03150"	0.800	0.09	99.91	0.01024"	0.260	28.51	71.49
0.03071"	0.780	0.10	99.90	0.00945"	0.240	36.57	63.43
0.02992"	0.760	0.11	99.89	0.00866"	0.220	45.71	54.29
0.02913"	0.740	0.11	99.89	0.00787"	0.200	55.30	44.70
#25	0.720	0.12	99.88	#80	0.180	64.90	35.10
#25	0.700	0.13	99.87	0.00630"	0.160	74.02	25.98
0.02677"	0.680	0.15	99.85	0.00551"	0.140	82.03	17.97
0.02598"	0.660	0.16	99.84	0.00472"	0.120	88.34	11.66
0.02520"	0.640	0.19	99.81	0.00394"	0.100	92.85	7.15
0.02441"	0.620	0.22	99.78	0.00315"	0.080	95.95	4.05
#30	0.600	0.26	99.74	0.00236"	0.060	98.06	1.94
0.02283"	0.580	0.32	99.68	0.00157"	0.040	99.30	0.70
0.02205"	0.560	0.39	99.61	#635	0.020	99.85	0.15
0.02126"	0.540	0.47	99.53	Charola	0.000	99.99	0.01
0.02047"	0.520	0.57	99.43				
#35	0.500	0.73	99.27			suma =	99.99
0.01890"	0.480	0.96	99.04			% de error =	0.01

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA



Diámetros característicos

D₅ = 0.086 mm.
D₁₀ = 0.113 mm.
D₁₆ = 0.134 mm.
D₂₅ = 0.154 mm.
D₃₀ = 0.168 mm.
D₅₀ = 0.212 mm.
D₆₀ = 0.233 mm.
D₇₅ = 0.267 mm.
D₈₄ = 0.299 mm.
D₉₀ = 0.331 mm.
D₉₅ = 0.371 mm.

Coefficiente de no uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.06$$

C_u < 3, suelo muy uniforme

Coefficiente de curvatura

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.07$$

1 < C_c < 3, suelo bien graduado.

Parámetros estadísticos :

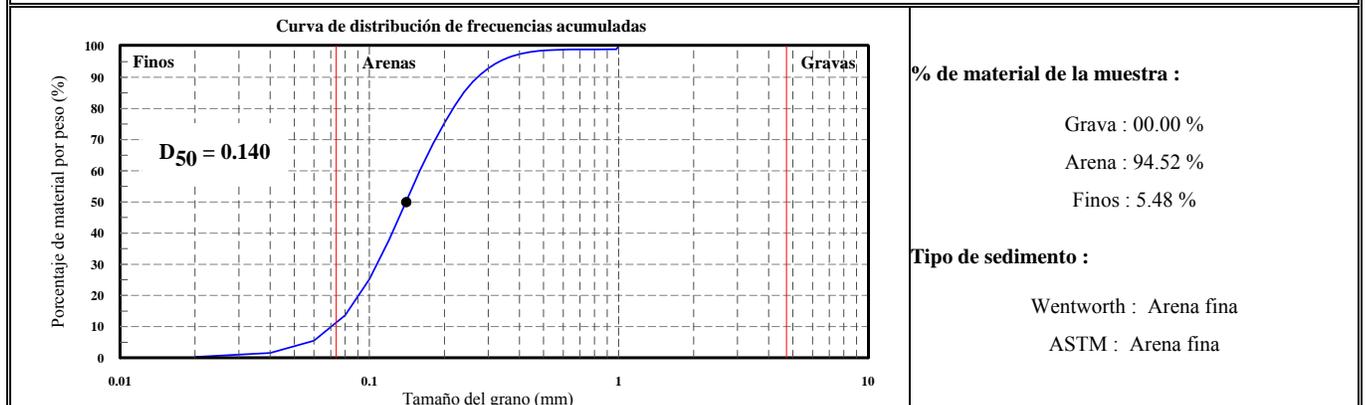
D_m = 2.29 = 0.204 mm
Desv. estandar = 0.63 = 0.645 mm
Sesgo = -0.19
Curtosis = 1.09

Clasificación :

Desv. estandar = Moderada bien clasif.
Sesgo = Sesgo grueso
Curtosis = Mesocurtico

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 4 de 10		Muestra : 4		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.98 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	1.70	98.30
#18	0.980	1.04	98.96	0.01732"	0.440	1.91	98.09
0.03780"	0.960	1.04	98.96	#40	0.420	2.19	97.81
0.03701"	0.940	1.04	98.96	0.01575"	0.400	2.57	97.43
0.03622"	0.920	1.04	98.96	0.01496"	0.380	3.06	96.94
0.03543"	0.900	1.04	98.96	#45	0.360	3.71	96.29
0.03465"	0.880	1.04	98.96	0.01339"	0.340	4.54	95.46
#20	0.860	1.05	98.95	0.01260"	0.320	5.64	94.36
#20	0.840	1.05	98.95	#50	0.300	7.09	92.91
0.03228"	0.820	1.05	98.95	0.01102"	0.280	8.97	91.03
0.03150"	0.800	1.05	98.95	0.01024"	0.260	11.41	88.59
0.03071"	0.780	1.05	98.95	0.00945"	0.240	14.74	85.26
0.02992"	0.760	1.06	98.94	0.00866"	0.220	19.15	80.85
0.02913"	0.740	1.06	98.94	0.00787"	0.200	24.62	75.38
#25	0.720	1.07	98.93	#80	0.180	31.32	68.68
#25	0.700	1.07	98.93	0.00630"	0.160	39.74	60.26
0.02677"	0.680	1.08	98.92	0.00551"	0.140	50.12	49.88
0.02598"	0.660	1.09	98.91	0.00472"	0.120	62.13	37.87
0.02520"	0.640	1.10	98.90	0.00394"	0.100	74.82	25.18
0.02441"	0.620	1.12	98.88	0.00315"	0.080	86.37	13.63
#30	0.600	1.14	98.86	0.00236"	0.060	94.52	5.48
0.02283"	0.580	1.17	98.83	0.00157"	0.040	98.47	1.53
0.02205"	0.560	1.21	98.79	#635	0.020	99.73	0.27
0.02126"	0.540	1.25	98.75	Charola	0.000	99.98	0.02
0.02047"	0.520	1.31	98.69				
#35	0.500	1.40	98.60			suma =	99.98
0.01890"	0.480	1.53	98.47			% de error =	0.02

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA



% de material de la muestra :

Grava : 00.00 %

Arena : 94.52 %

Finos : 5.48 %

Tipo de sedimento :

Wentworth : Arena fina

ASTM : Arena fina

Diámetros característicos

- D₅ = 0.059 mm.
- D₁₀ = 0.072 mm.
- D₁₆ = 0.085 mm.
- D₂₅ = 0.100 mm.
- D₃₀ = 0.107 mm.
- D₅₀ = 0.140 mm.
- D₆₀ = 0.157 mm.
- D₇₅ = 0.200 mm.
- D₈₄ = 0.234 mm.
- D₉₀ = 0.270 mm.
- D₉₅ = 0.340 mm.

Coefficiente de no uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.18$$

C_u < 3, suelo muy uniforme

Coefficiente de curvatura

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.01$$

1 < C_c < 3, suelo bien graduado.

Parámetros estadísticos :

$$D_m = 2.83 = 0.141 \text{ mm}$$

$$\text{Desv. estandar} = 0.78 = 0.582 \text{ mm}$$

$$\text{Sesgo} = 0.01$$

$$\text{Curtosis} = 1.04$$

Clasificación :

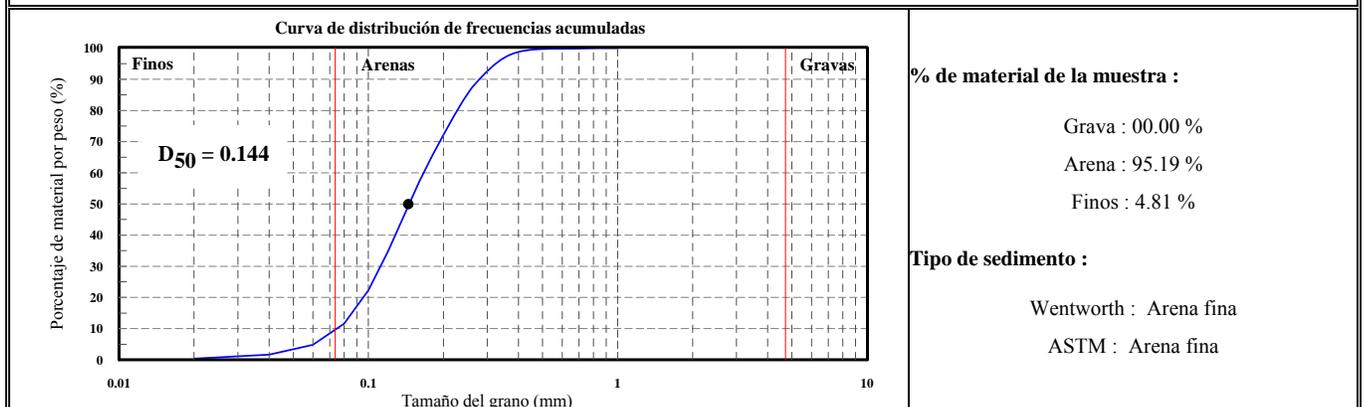
Desv. estandar = Clasif. moderada

Sesgo = Cercanamente simetrica

Curtosis = Mesocurtico

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 5 de 10		Muestra : 5		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.98 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.48	99.52
#18	0.980	0.00	100.00	0.01732"	0.440	0.62	99.38
0.03780"	0.960	0.00	100.00	#40	0.420	0.85	99.15
0.03701"	0.940	0.01	99.99	0.01575"	0.400	1.24	98.76
0.03622"	0.920	0.01	99.99	0.01496"	0.380	1.80	98.20
0.03543"	0.900	0.01	99.99	#45	0.360	2.58	97.42
0.03465"	0.880	0.01	99.99	0.01339"	0.340	3.71	96.29
#20	0.860	0.01	99.99	0.01260"	0.320	5.32	94.68
#20	0.840	0.01	99.99	#50	0.300	7.39	92.61
0.03228"	0.820	0.01	99.99	0.01102"	0.280	9.79	90.21
0.03150"	0.800	0.02	99.98	0.01024"	0.260	12.72	87.28
0.03071"	0.780	0.03	99.97	0.00945"	0.240	16.81	83.19
0.02992"	0.760	0.06	99.94	0.00866"	0.220	21.93	78.07
0.02913"	0.740	0.11	99.89	0.00787"	0.200	27.77	72.23
#25	0.720	0.13	99.87	#80	0.180	34.63	65.37
#25	0.700	0.14	99.86	0.00630"	0.160	42.94	57.06
0.02677"	0.680	0.15	99.85	0.00551"	0.140	53.18	46.82
0.02598"	0.660	0.16	99.84	0.00472"	0.120	65.20	34.80
0.02520"	0.640	0.17	99.83	0.00394"	0.100	77.73	22.27
0.02441"	0.620	0.19	99.81	0.00315"	0.080	88.44	11.56
#30	0.600	0.20	99.80	0.00236"	0.060	95.19	4.81
0.02283"	0.580	0.20	99.80	0.00157"	0.040	98.36	1.64
0.02205"	0.560	0.20	99.80	#635	0.020	99.64	0.36
0.02126"	0.540	0.22	99.78	Charola	0.000	99.98	0.02
0.02047"	0.520	0.26	99.74				
#35	0.500	0.30	99.70			suma =	99.98
0.01890"	0.480	0.38	99.62			% de error =	0.02

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA



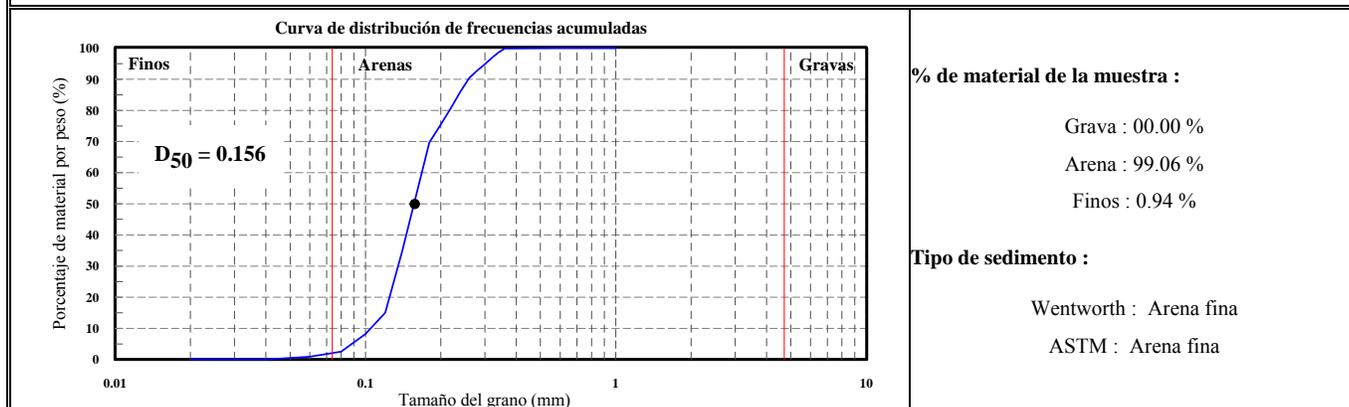
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.060 mm.</p> <p>D₁₀ = 0.075 mm.</p> <p>D₁₆ = 0.087 mm.</p> <p>D₂₅ = 0.103 mm.</p> <p>D₃₀ = 0.112 mm.</p> <p>D₅₀ = 0.144 mm.</p> <p>D₆₀ = 0.166 mm.</p> <p>D₇₅ = 0.206 mm.</p> <p>D₈₄ = 0.244 mm.</p> <p>D₉₀ = 0.278 mm.</p> <p>D₉₅ = 0.326 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.21$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.01$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 2.78 = 0.145 mm</p> <p>Desv. estandar = 0.78 = 0.583 mm</p> <p>Sesgo = -0.01</p> <p>Curtosis = 1.00</p> <p>Clasificación :</p> <p>Desv. estandar = Clasif. moderada</p> <p>Sesgo = Cercanamente simetrica</p> <p>Curtosis = Mesocurtico</p>
--	--	---

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 6 de 10		Muestra : 6		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.98 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	8.38	91.62
#18	0.980	0.56	99.44	0.01732"	0.440	9.33	90.67
0.03780"	0.960	0.58	99.42	#40	0.420	10.64	89.36
0.03701"	0.940	0.61	99.39	0.01575"	0.400	12.26	87.74
0.03622"	0.920	0.63	99.37	0.01496"	0.380	13.85	86.15
0.03543"	0.900	0.65	99.35	#45	0.360	15.41	84.59
0.03465"	0.880	0.68	99.32	0.01339"	0.340	17.25	82.75
#20	0.860	0.72	99.28	0.01260"	0.320	19.74	80.26
#20	0.840	0.79	99.21	#50	0.300	22.70	77.30
0.03228"	0.820	0.87	99.13	0.01102"	0.280	25.71	74.29
0.03150"	0.800	0.96	99.04	0.01024"	0.260	29.17	70.83
0.03071"	0.780	1.06	98.94	0.00945"	0.240	34.07	65.93
0.02992"	0.760	1.21	98.79	0.00866"	0.220	39.96	60.04
0.02913"	0.740	1.35	98.65	0.00787"	0.200	46.03	53.97
#25	0.720	1.48	98.52	#80	0.180	52.58	47.42
#25	0.700	1.65	98.35	0.00630"	0.160	59.97	40.03
0.02677"	0.680	1.86	98.14	0.00551"	0.140	68.18	31.82
0.02598"	0.660	2.12	97.88	0.00472"	0.120	76.94	23.06
0.02520"	0.640	2.41	97.59	0.00394"	0.100	85.67	14.33
0.02441"	0.620	2.75	97.25	0.00315"	0.080	92.85	7.15
#30	0.600	3.14	96.86	0.00236"	0.060	97.13	2.87
0.02283"	0.580	3.63	96.37	0.00157"	0.040	99.02	0.98
0.02205"	0.560	4.20	95.80	#635	0.020	99.78	0.22
0.02126"	0.540	4.83	95.17	Charola	0.000	99.99	0.01
0.02047"	0.520	5.50	94.50				
#35	0.500	6.35	93.65			suma =	99.99
0.01890"	0.480	7.40	92.60			% de error =	0.01

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA		
	<p>% de material de la muestra :</p> <p>Grava : 00.00 % Arena : 97.13 % Finos : 2.87 %</p> <p>Tipo de sedimento :</p> <p>Wentworth : Arena fina ASTM : Arena fina</p>	
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.069 mm. D₁₀ = 0.089 mm. D₁₆ = 0.103 mm. D₂₅ = 0.123 mm. D₃₀ = 0.134 mm. D₅₀ = 0.185 mm. D₆₀ = 0.222 mm. D₇₅ = 0.286 mm. D₈₄ = 0.355 mm. D₉₀ = 0.434 mm. D₉₅ = 0.538 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.49$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 0.91$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 2.40 = 0.189 mm Desv. estandar = 0.45 = 0.731 mm Sesgo = 0.05 Curtosis = 1.00</p> <p>Clasificación :</p> <p>Desv. estandar = Buena clasificacion Sesgo = Cercanamente simetrica Curtosis = Mesocurtico</p>

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 7 de 10		Muestra : 7		Peso total de la muestra Seca (W _s) =		100.00 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.01	99.96
#18	0.980	0.00	100.00	0.01732"	0.440	0.01	99.95
0.03780"	0.960	0.00	100.00	#40	0.420	0.01	99.94
0.03701"	0.940	0.00	100.00	0.01575"	0.400	0.01	99.93
0.03622"	0.920	0.00	100.00	0.01496"	0.380	0.01	99.91
0.03543"	0.900	0.00	100.00	#45	0.360	0.01	99.90
0.03465"	0.880	0.00	100.00	0.01339"	0.340	1.27	98.64
#20	0.860	0.00	100.00	0.01260"	0.320	1.71	96.92
#20	0.840	0.00	100.00	#50	0.300	2.04	94.89
0.03228"	0.820	0.00	100.00	0.01102"	0.280	2.07	92.82
0.03150"	0.800	0.00	100.00	0.01024"	0.260	2.38	90.44
0.03071"	0.780	0.00	100.00	0.00945"	0.240	4.34	86.10
0.02992"	0.760	0.00	100.00	0.00866"	0.220	5.21	80.89
0.02913"	0.740	0.00	100.00	0.00787"	0.200	5.37	75.52
#25	0.720	0.00	100.00	#80	0.180	5.80	69.72
#25	0.700	0.00	99.99	0.00630"	0.160	16.59	53.13
0.02677"	0.680	0.00	99.99	0.00551"	0.140	18.44	34.69
0.02598"	0.660	0.00	99.99	0.00472"	0.120	19.67	15.02
0.02520"	0.640	0.00	99.99	0.00394"	0.100	6.86	8.16
0.02441"	0.620	0.00	99.99	0.00315"	0.080	5.64	2.52
#30	0.600	0.00	99.99	0.00236"	0.060	1.58	0.94
0.02283"	0.580	0.00	99.99	0.00157"	0.040	0.94	0.00
0.02205"	0.560	0.00	99.99	#635	0.020	0.00	0.00
0.02126"	0.540	0.00	99.98	Charola	0.000	0.00	0.00
0.02047"	0.520	0.00	99.98				
#35	0.500	0.00	99.98			suma =	100.00
0.01890"	0.480	0.01	99.97			% de error =	0.00

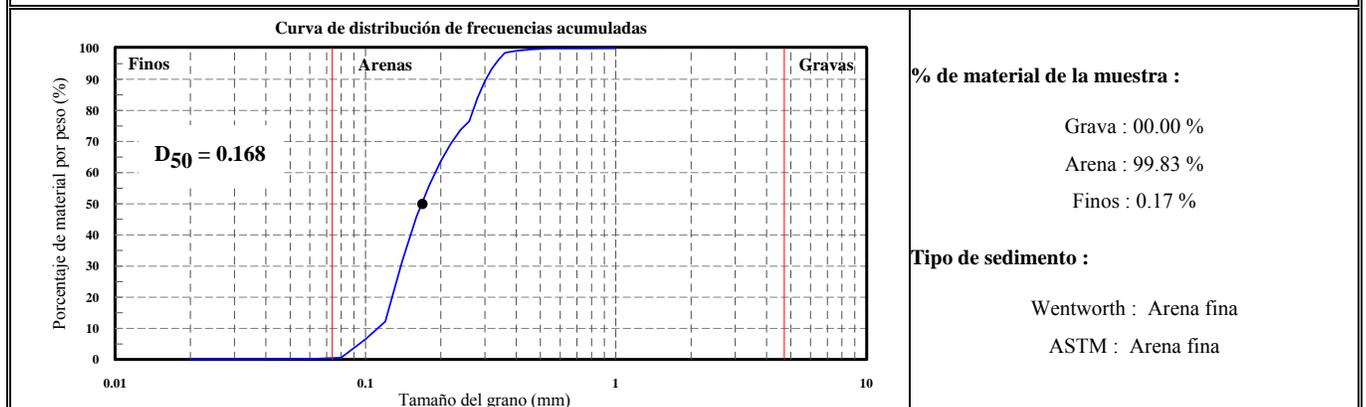
COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA



<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.088 mm. D₁₀ = 0.105 mm. D₁₆ = 0.120 mm. D₂₅ = 0.130 mm. D₃₀ = 0.134 mm. D₅₀ = 0.156 mm. D₆₀ = 0.168 mm. D₇₅ = 0.197 mm. D₈₄ = 0.231 mm. D₉₀ = 0.256 mm. D₉₅ = 0.297 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.60$ <p>$C_u < 3$, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.02$ <p>$1 < C_c < 3$, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>$D_m = 2.62 = 0.163$ mm Devs. estandar = 0.86 = 0.553 mm Sesgo = 0.53 Curtosis = 1.20</p> <p>Clasificación :</p> <p>Devs. estandar = Clasif. moderada Sesgo = Muy asimétrica hacia finos Curtosis = Leptocurtico</p>
--	--	--

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 8 de 10		Muestra : 8		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		99.99 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.10	99.63
#18	0.980	0.04	99.96	0.01732"	0.440	0.14	99.49
0.03780"	0.960	0.00	99.96	#40	0.420	0.16	99.33
0.03701"	0.940	0.00	99.96	0.01575"	0.400	0.21	99.12
0.03622"	0.920	0.00	99.95	0.01496"	0.380	0.28	98.84
0.03543"	0.900	0.00	99.95	#45	0.360	0.36	98.48
0.03465"	0.880	0.00	99.95	0.01339"	0.340	2.19	96.29
#20	0.860	0.00	99.95	0.01260"	0.320	2.86	93.43
#20	0.840	0.00	99.94	#50	0.300	3.98	89.45
0.03228"	0.820	0.00	99.94	0.01102"	0.280	5.49	83.96
0.03150"	0.800	0.00	99.94	0.01024"	0.260	7.40	76.56
0.03071"	0.780	0.01	99.93	0.00945"	0.240	2.85	73.71
0.02992"	0.760	0.00	99.93	0.00866"	0.220	4.21	69.49
0.02913"	0.740	0.01	99.92	0.00787"	0.200	5.80	63.70
#25	0.720	0.01	99.92	#80	0.180	7.64	56.06
#25	0.700	0.01	99.91	0.00630"	0.160	10.24	45.82
0.02677"	0.680	0.00	99.91	0.00551"	0.140	14.33	31.49
0.02598"	0.660	0.01	99.90	0.00472"	0.120	19.27	12.22
0.02520"	0.640	0.01	99.89	0.00394"	0.100	5.70	6.52
0.02441"	0.620	0.00	99.89	0.00315"	0.080	5.89	0.63
#30	0.600	0.01	99.88	0.00236"	0.060	0.46	0.17
0.02283"	0.580	0.01	99.87	0.00157"	0.040	0.16	0.01
0.02205"	0.560	0.01	99.87	#635	0.020	0.00	0.01
0.02126"	0.540	0.01	99.85	Charola	0.000	0.00	0.01
0.02047"	0.520	0.01	99.84				
#35	0.500	0.02	99.82			suma =	99.99
0.01890"	0.480	0.08	99.74			% de error =	0.01

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA



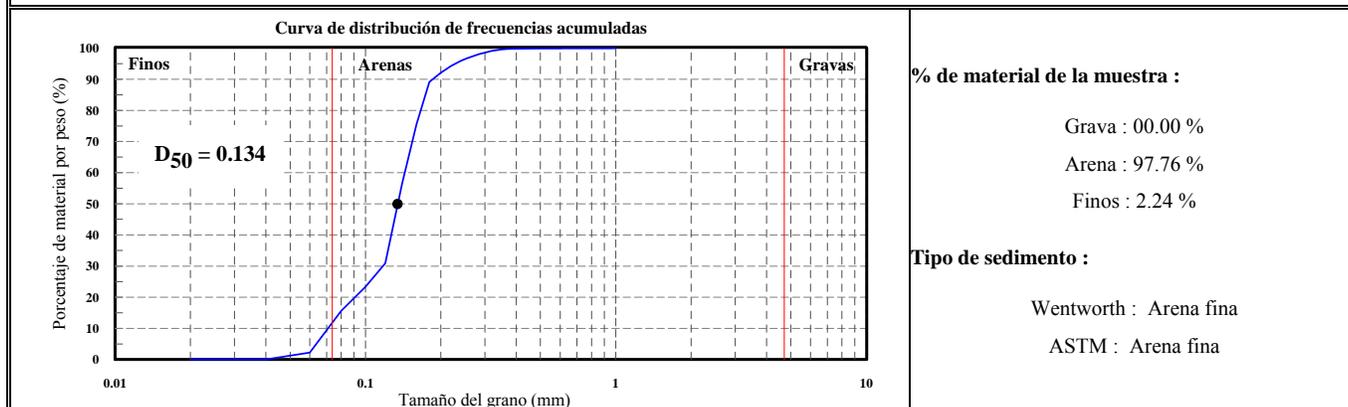
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.094 mm.</p> <p>D₁₀ = 0.111 mm.</p> <p>D₁₆ = 0.124 mm.</p> <p>D₂₅ = 0.133 mm.</p> <p>D₃₀ = 0.138 mm.</p> <p>D₅₀ = 0.168 mm.</p> <p>D₆₀ = 0.190 mm.</p> <p>D₇₅ = 0.249 mm.</p> <p>D₈₄ = 0.280 mm.</p> <p>D₉₀ = 0.301 mm.</p> <p>D₉₅ = 0.331 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.71$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 0.90$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 2.97 = 0.180 mm</p> <p>Desv. estandar = 0.76 = 0.591 mm</p> <p>Sesgo = 0.54</p> <p>Curtosis = 0.82</p> <p>Clasificación :</p> <p>Desv. estandar = Clasif. moderada</p> <p>Sesgo = Muy asimétrica hacia finos</p> <p>Curtosis = Platicurtico</p>
--	--	---

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 9 de 10		Muestra : 9		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		100.00 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	1.10	94.69
#18	0.980	0.27	99.73	0.01732"	0.440	1.07	93.62
0.03780"	0.960	0.01	99.72	#40	0.420	1.47	92.15
0.03701"	0.940	0.01	99.71	0.01575"	0.400	1.82	90.33
0.03622"	0.920	0.01	99.70	0.01496"	0.380	1.79	88.54
0.03543"	0.900	0.01	99.69	#45	0.360	1.75	86.79
0.03465"	0.880	0.01	99.68	0.01339"	0.340	5.03	81.76
#20	0.860	0.02	99.66	0.01260"	0.320	6.81	74.95
#20	0.840	0.03	99.62	#50	0.300	8.09	66.85
0.03228"	0.820	0.04	99.58	0.01102"	0.280	8.23	58.62
0.03150"	0.800	0.04	99.54	0.01024"	0.260	9.46	49.16
0.03071"	0.780	0.05	99.49	0.00945"	0.240	3.46	45.70
0.02992"	0.760	0.07	99.42	0.00866"	0.220	4.16	41.54
0.02913"	0.740	0.07	99.36	0.00787"	0.200	4.29	37.26
#25	0.720	0.06	99.29	#80	0.180	4.63	32.63
#25	0.700	0.08	99.21	0.00630"	0.160	8.02	24.61
0.02677"	0.680	0.10	99.11	0.00551"	0.140	8.91	15.69
0.02598"	0.660	0.12	98.99	0.00472"	0.120	9.51	6.18
0.02520"	0.640	0.14	98.85	0.00394"	0.100	2.44	3.74
0.02441"	0.620	0.16	98.69	0.00315"	0.080	2.01	1.73
#30	0.600	0.19	98.50	0.00236"	0.060	1.66	0.07
0.02283"	0.580	0.23	98.27	0.00157"	0.040	0.07	0.00
0.02205"	0.560	0.27	98.00	#635	0.020	0.00	0.00
0.02126"	0.540	0.30	97.70	Charola	0.000	0.00	0.00
0.02047"	0.520	0.32	97.38				
#35	0.500	0.41	96.97			suma =	100.00
0.01890"	0.480	1.18	95.79			% de error =	0.00

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA		
<p>Curva de distribución de frecuencias acumuladas</p> <p>Finos Arenas Gravas</p> <p>D₅₀ = 0.262</p> <p>Porcentaje de material por peso (%)</p> <p>Tamaño del grano (mm)</p>	<p>% de material de la muestra :</p> <p>Grava : 00.00 %</p> <p>Arena : 99.93 %</p> <p>Finos : 0.07 %</p> <p>Tipo de sedimento :</p> <p>Wentworth : Arena media</p> <p>ASTM : Arena fina</p>	
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.110 mm.</p> <p>D₁₀ = 0.128 mm.</p> <p>D₁₆ = 0.141 mm.</p> <p>D₂₅ = 0.161 mm.</p> <p>D₃₀ = 0.173 mm.</p> <p>D₅₀ = 0.262 mm.</p> <p>D₆₀ = 0.283 mm.</p> <p>D₇₅ = 0.320 mm.</p> <p>D₈₄ = 0.348 mm.</p> <p>D₉₀ = 0.401 mm.</p> <p>D₉₅ = 0.463 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.21$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 0.83$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 2.09 = 0.234 mm</p> <p>Desv. estandar = 0.57 = 0.674 mm</p> <p>Sesgo = 0.40</p> <p>Curtosis = 0.86</p> <p>Clasificación :</p> <p>Desv. estandar = Clasif. bien moderada</p> <p>Sesgo = Muy asimétrica hacia finos</p> <p>Curtosis = Platicurtico</p>

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba : 10 de 10		Muestra : 10		Peso total de la muestra Seca (W _i) =		100.00 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.01	99.86
#18	0.980	0.02	99.98	0.01732"	0.440	0.02	99.84
0.03780"	0.960	0.00	99.97	#40	0.420	0.02	99.82
0.03701"	0.940	0.00	99.97	0.01575"	0.400	0.03	99.80
0.03622"	0.920	0.00	99.97	0.01496"	0.380	0.03	99.76
0.03543"	0.900	0.00	99.97	#45	0.360	0.04	99.72
0.03465"	0.880	0.00	99.97	0.01339"	0.340	0.27	99.45
#20	0.860	0.00	99.96	0.01260"	0.320	0.35	99.09
#20	0.840	0.00	99.96	#50	0.300	0.49	98.60
0.03228"	0.820	0.00	99.96	0.01102"	0.280	0.68	97.92
0.03150"	0.800	0.00	99.96	0.01024"	0.260	0.92	97.00
0.03071"	0.780	0.00	99.95	0.00945"	0.240	1.09	95.91
0.02992"	0.760	0.00	99.95	0.00866"	0.220	1.62	94.29
0.02913"	0.740	0.00	99.95	0.00787"	0.200	2.22	92.07
#25	0.720	0.00	99.94	#80	0.180	2.93	89.14
#25	0.700	0.01	99.94	0.00630"	0.160	13.61	75.53
0.02677"	0.680	0.00	99.94	0.00551"	0.140	19.04	56.48
0.02598"	0.660	0.01	99.93	0.00472"	0.120	25.60	30.88
0.02520"	0.640	0.00	99.93	0.00394"	0.100	7.51	23.37
0.02441"	0.620	0.00	99.93	0.00315"	0.080	7.75	15.62
#30	0.600	0.01	99.92	0.00236"	0.060	13.38	2.24
0.02283"	0.580	0.00	99.92	0.00157"	0.040	2.24	0.00
0.02205"	0.560	0.01	99.91	#635	0.020	0.00	0.00
0.02126"	0.540	0.01	99.90	Charola	0.000	0.00	0.00
0.02047"	0.520	0.01	99.89				
#35	0.500	0.01	99.88			suma =	100.00
0.01890"	0.480	0.01	99.87			% de error =	0.00

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA



% de material de la muestra :

Grava : 00.00 %
Arena : 97.76 %
Finos : 2.24 %

Tipo de sedimento :

Wentworth : Arena fina
ASTM : Arena fina

Diámetros característicos

- D₅ = 0.063 mm.
- D₁₀ = 0.071 mm.
- D₁₆ = 0.081 mm.
- D₂₅ = 0.105 mm.
- D₃₀ = 0.118 mm.
- D₅₀ = 0.134 mm.
- D₆₀ = 0.143 mm.
- D₇₅ = 0.159 mm.
- D₈₄ = 0.172 mm.
- D₉₀ = 0.184 mm.
- D₉₅ = 0.228 mm.

Coefficiente de no uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.01$$

$C_u < 3$, suelo muy uniforme

Coefficiente de curvatura

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.37$$

$1 < C_c < 3$, suelo bien graduado.

Parámetros estadísticos :

$D_m = 3.02 = 0.123$ mm
Desv. estandar = $1.08 = 0.474$ mm
 $Sesgo = 0.41$
 $Curtosis = 1.27$

Clasificación :

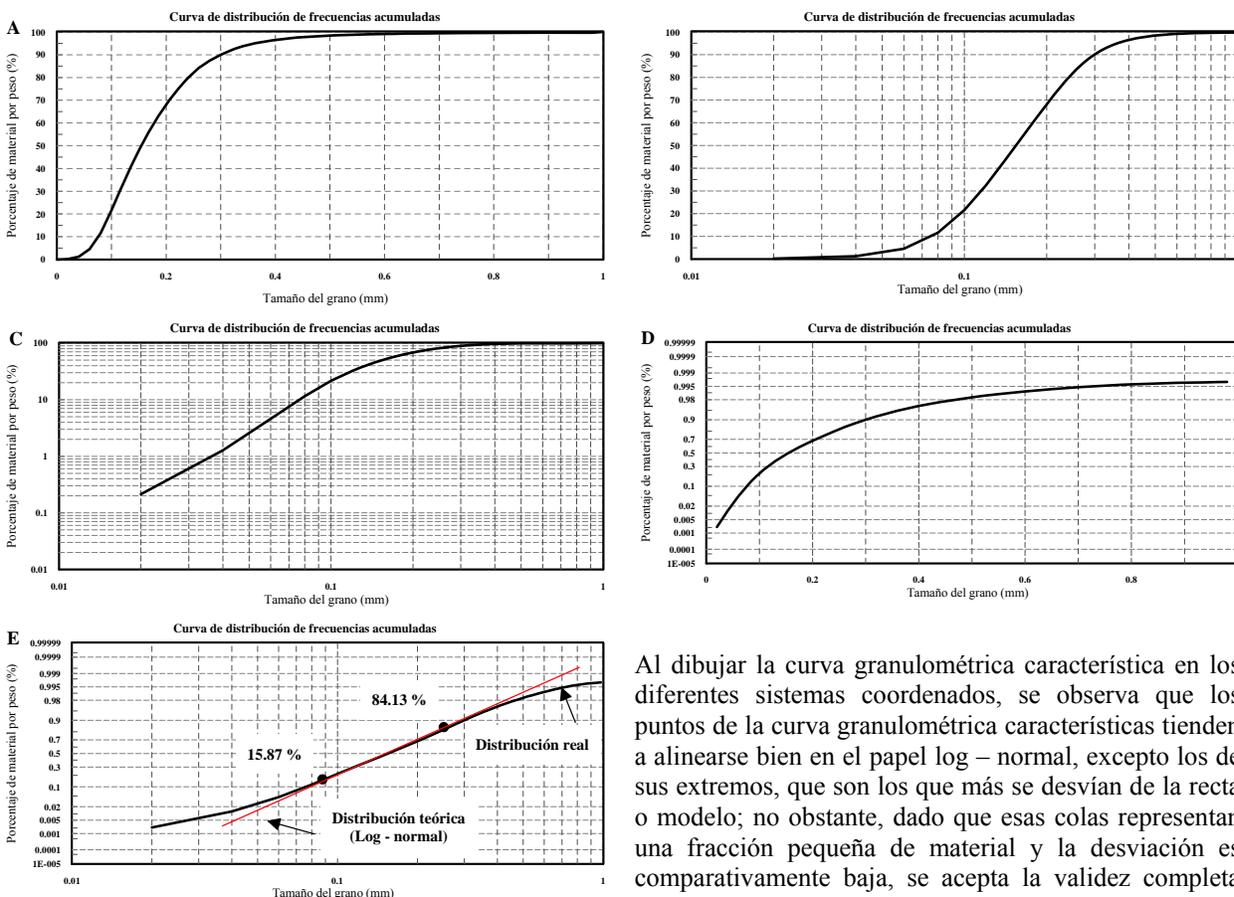
Desv. estandar = Mala clasificación
Sesgo = Muy asimétrica hacia finos
Curtosis = Leptocurtico

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO							
Prueba :		Muestra : CGC		Peso total de la muestra Seca (W _t) =		999.92 g	
Fecha : 3 / Junio / 2013		Calculista : Cuauhtémoc Franco Ochoa					
Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	0.29	98.14
#18	0.980	0.22	99.78	0.01732"	0.440	0.31	97.82
0.03780"	0.960	0.00	99.78	#40	0.420	0.44	97.39
0.03701"	0.940	0.01	99.77	0.01575"	0.400	0.57	96.82
0.03622"	0.920	0.01	99.77	0.01496"	0.380	0.65	96.17
0.03543"	0.900	0.01	99.76	#45	0.360	0.75	95.42
0.03465"	0.880	0.01	99.76	0.01339"	0.340	1.58	93.84
#20	0.860	0.01	99.75	0.01260"	0.320	2.14	91.70
#20	0.840	0.01	99.73	#50	0.300	2.72	88.97
0.03228"	0.820	0.01	99.72	0.01102"	0.280	3.18	85.79
0.03150"	0.800	0.02	99.70	0.01024"	0.260	3.95	81.84
0.03071"	0.780	0.02	99.68	0.00945"	0.240	3.80	78.03
0.02992"	0.760	0.03	99.66	0.00866"	0.220	4.82	73.21
0.02913"	0.740	0.03	99.63	0.00787"	0.200	5.56	67.65
#25	0.720	0.03	99.60	#80	0.180	6.43	61.22
#25	0.700	0.03	99.57	0.00630"	0.160	9.83	51.39
0.02677"	0.680	0.04	99.53	0.00551"	0.140	11.77	39.62
0.02598"	0.660	0.05	99.48	0.00472"	0.120	13.69	25.93
0.02520"	0.640	0.05	99.43	0.00394"	0.100	8.80	17.12
0.02441"	0.620	0.06	99.38	0.00315"	0.080	8.12	9.00
#30	0.600	0.07	99.31	0.00236"	0.060	5.90	3.10
0.02283"	0.580	0.08	99.22	0.00157"	0.040	2.34	0.76
0.02205"	0.560	0.10	99.12	#635	0.020	0.64	0.13
0.02126"	0.540	0.11	99.01	Charola	0.000	0.13	0.00
0.02047"	0.520	0.13	98.88				
#35	0.500	0.17	98.71			suma =	999.92
0.01890"	0.480	0.29	98.43			% de error =	0.00

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA		
	<p>% de material de la muestra :</p> <p>Grava : 00.00 % Arena : 96.90 % Finos : 3.10 %</p> <p>Tipo de sedimento :</p> <p>Wentworth : Arena fina ASTM : Arena fina</p>	
<p>Diámetros característicos</p> <p>D₅ = 0.065 mm. D₁₀ = 0.082 mm. D₁₆ = 0.098 mm. D₂₅ = 0.118 mm. D₃₀ = 0.125 mm. D₅₀ = 0.157 mm. D₆₀ = 0.176 mm. D₇₅ = 0.226 mm. D₈₄ = 0.270 mm. D₉₀ = 0.305 mm. D₉₅ = 0.352 mm.</p>	<p>Coefficiente de no uniformidad</p> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.15$ <p>C_u < 3, suelo muy uniforme</p> <p>Coefficiente de curvatura</p> $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = 1.08$ <p>1 < C_c < 3, suelo bien graduado.</p>	<p>Parámetros estadísticos :</p> <p>D_m = 2.64 = 0.160 mm Devs. estandar = 0.70 = 0.614 mm Sesgo = 0.01 Curtosis = 1.07</p> <p>Clasificación :</p> <p>Devs. estandar = Clasif. moderada Sesgo = Cercanamente simetrica Curtosis = Mesocurtico</p>

ANEXO D

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS



Al dibujar la curva granulométrica característica en los diferentes sistemas coordenados, se observa que los puntos de la curva granulométrica características tienden a alinearse bien en el papel log – normal, excepto los de sus extremos, que son los que más se desvían de la recta o modelo; no obstante, dado que esas colas representan una fracción pequeña de material y la desviación es comparativamente baja, se acepta la validez completa del modelo.

Figura D-1.- Representación gráfica de la curva granulométrica característica en diferentes sistemas coordenados o tipos de papel.

Tabla D-1.- Tabal de distribución de frecuencias de la curva granulométrica característica.

Malla (ASTM)	Malla (mm)	% Peso retenido (g)	% de peso que pasa	Malla (ASTM)	Malla (mm)	% Peso retenido (g)	% de peso que pasa
> #18	1.000	0.00	100.00	0.01811"	0.460	1.86	98.14
#18	0.980	0.22	99.78	0.01732"	0.440	2.18	97.82
0.03780"	0.960	0.22	99.78	#40	0.420	2.61	97.39
0.03701"	0.940	0.23	99.77	0.01575"	0.400	3.18	96.82
0.03622"	0.920	0.23	99.77	0.01496"	0.380	3.83	96.17
0.03543"	0.900	0.24	99.76	#45	0.360	4.58	95.42
0.03465"	0.880	0.24	99.76	0.01339"	0.340	6.16	93.84
#20	0.860	0.25	99.75	0.01260"	0.320	8.30	91.70
#20	0.840	0.27	99.73	#50	0.300	11.03	88.97
0.03228"	0.820	0.28	99.72	0.01102"	0.280	14.21	85.79
0.03150"	0.800	0.30	99.70	0.01024"	0.260	18.16	81.84
0.03071"	0.780	0.32	99.68	0.00945"	0.240	21.97	78.03
0.02992"	0.760	0.34	99.66	0.00866"	0.220	26.79	73.21
0.02913"	0.740	0.37	99.63	0.00787"	0.200	32.35	67.65
#25	0.720	0.40	99.60	#80	0.180	38.78	61.22
#25	0.700	0.43	99.57	0.00630"	0.160	48.61	51.39
0.02677"	0.680	0.47	99.53	0.00551"	0.140	60.38	39.62
0.02598"	0.660	0.52	99.48	0.00472"	0.120	74.07	25.93
0.02520"	0.640	0.57	99.43	0.00394"	0.100	82.88	17.12
0.02441"	0.620	0.62	99.38	0.00315"	0.080	91.00	9.00
#30	0.600	0.69	99.31	0.00236"	0.060	96.90	3.10
0.02283"	0.580	0.78	99.22	0.00157"	0.040	99.24	0.76
0.02205"	0.560	0.88	99.12	#635	0.020	99.87	0.13
0.02126"	0.540	0.99	99.01	Charola	0.000	100.00	0.00
0.02047"	0.520	1.12	98.88				
#35	0.500	1.29	98.71		suma =	100.00	
0.01890"	0.480	1.57	98.43		% de error =	0.00	

DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS EFECTIVOS SEGÚN EL MODELO TEÓRICO DE DISTRIBUCIÓN LOG - NORMAL

DETERMINACIÓN ANALÍTICA

$$0.100 = D_{50} \sigma_g^{Z_{17.12}} \Rightarrow Z_{17.12} = -0.78680$$

$$0.280 = D_{50} \sigma_g^{Z_{85.79}} \Rightarrow Z_{85.79} = 1.07094$$

$$0.080 = D_{50} \sigma_g^{Z_{9.00}} \Rightarrow Z_{9.00} = -1.34076$$

$$0.260 = D_{50} \sigma_g^{Z_{81.84}} \Rightarrow Z_{81.84} = 0.90903$$

Resolver para D_{50} y σ_g

$$D_{50} = 0.137mm \quad \sigma_g = 1.496$$

$$D_{50} = 0.172mm \quad \sigma_g = 1.580$$

Determinar $D_{15.87}$ y $D_{84.13}$

$$D_{15.87} = 0.137(1.496)^{Z_{15.87}} \Rightarrow Z_{15.87} = -1$$

$$D_{84.13} = 0.172(1.580)^{Z_{84.13}} \Rightarrow Z_{84.13} = 1$$

$$D_{15.87} = 0.092mm$$

$$D_{84.13} = 0.272mm$$

Para cualquier D_n

$$\sigma_g = \left(\frac{D_{84.13}}{D_{15.87}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{0.272}{0.092} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.719$$

$$D_{50} = \sqrt{(D_{15.87})(D_{84.13})} = \sqrt{(0.272)(0.092)} = 0.158mm$$

$$D_n = 0.158(1.719)^{Z_n}$$

n	Z_n	D_n en mm	D_n en Phi
95	1.64485	0.385	1.38
90	1.28155	0.316	1.66
84	0.99446	0.271	1.88
75	0.67449	0.217	2.20
60	0.25335	0.181	2.47
50	0.00000	0.158	2.66
30	-0.52440	0.119	3.07
25	-0.67449	0.110	3.18
16	-0.99446	0.092	3.44
10	-1.28155	0.079	3.66
5	-1.64486	0.065	3.94

COEFICIENTES DE CURVATURA Y UNIFORMIDAD Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Coefficiente de curvatura

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.181}{0.079} = 2.29$$

Coefficiente de uniformidad

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} = \frac{0.119^2}{(0.079)(0.181)} = 0.990$$

Parámetros estadísticos

$$D_m = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{86}}{3} = \frac{3.44 + 2.66 + 1.88}{3} = 2.66 = 0.158mm$$

$$\sigma = \frac{\phi_{84} + \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{4} = \frac{1.88 + 3.44}{4} + \frac{1.38 - 3.94}{4}$$

$$\sigma = 0.825 = 0.564mm$$

$$S_k = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

$$S_k = \frac{3.44 + 1.88 - 2(2.66)}{2(1.88 - 3.44)} + \frac{3.94 + 1.38 - 2(2.66)}{2(1.38 - 3.94)}$$

$$S_k = 0.00$$

$$K_q = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

$$K_q = \frac{1.38 - 3.94}{2.44(2.20 - 3.18)}$$

$$K_q = 1.071$$