

22
2010

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ ARAGON ”

LAS MAREAS Y SUS EFECTOS EN LA
INGENIERIA DE COSTAS

T E S I S
Que para obtener el Título de:
INGENIERO CIVIL
P r e s e n t a
GUSTAVO HERNANDEZ MEZA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

San Juan de Aragón, Edo. de Méx.

1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

GUSTAVO HERNANDEZ MEZA
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 7 de octubre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. JOSE MIGUEL MONTOYA RODRIGUEZ pueda dirigirle su trabajo de Tesis denominado "LAS MAREAS Y SUS EFECTOS EN LA INGENIERIA DE COSTAS", con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de México, 19 de Mayo de 1993.
EL DIRECTOR

[Firma manuscrita]
M. en C. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO



- c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica
- c c p Ing. José Paulo Mejorada Mota, Jefe de Carrera de Ingeniería Civil
- c c p Ing. José Miguel Montoya Rodríguez, Asesor de Tesis

CCMC/AIR/jj'

[Firma manuscrita]

[Firma manuscrita]

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
A R A G O N

LAS MAREAS Y SUS EFECTOS EN LA
INGENIERIA DE COSTAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :
Gustavo Hernández Meza

San Juan de Aragón, México

1994

A MI MADRE

QUE POR SUS SABIOS Y MATERNALES
CONSEJOS SUPO DESPERTAR EN MI EL
DESEO DE SUPERACION. LE AGRADEZCO
DE ANTEMANO EL GRAN APOYO MORAL Y
ECONOMICO QUE ME BRINDO. HOY CON
ORGULLO LE PUEDO DECIR SIMPLEMENTE
"MADRE ESTE TITULO ES PARA TI"

A MIS HIJOS Y MIS SOBRINOS
COMO UN RETO PARA SU
"SUPERACION PERSONAL"

AL ING. JOSE MIGUEL MONTOYA RODRIGUEZ

QUE SIEMPRE TUVO TIEMPO Y GANAS DE AYUDARME.
POR SU ORIENTACION, CONOCIMIENTO E
INCONDICIONAL APOYO EN LA ELABORACION DE ESTE
TRABAJO DESDE EL INICIO HASTA EL FINAL.

"GRACIAS MIGUEL"

A G R A D E C I M I E N T O S

A MIS HERMANOS: HILDA, LOURDES Y FRANCISCO. QUE AUNQUE CON ENOJOS, DISGUSTOS Y ALEGRÍAS, SIEMPRE TUVIERON UNA PALABRA DE ALIENTO PARA MI.

A LOS INGS. JESUS I. HEREDIA DOMINGUEZ, VALENTE TORRES ORTIZ Y EDUARDO GUERRERO MOLINA. POR SU AMISTAD Y SU APOYO EN LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.

A MI AMIGO M. TOMAS CONTRERAS GUZMAN. COMO UN RETO PARA SU SUPERACION. LE DESEO MUCHA SUERTE.

A EL AHORA DR. PORFIRIO RAMIREZ VALLEJO. POR SU COMPRESION Y APOYO PARA TODOS LOS QUE DESEAMOS SUPERARNOS.

A LA C. MA. DEL CARMEN PEREZ JIMENEZ. POR SU GRAN AYUDA Y EXELENTE TRABAJO EN LA CORRECCION Y MECANOGRAFIA DEL TEXTO.

A TODAS LAS PERSONAS QUE DE ALGUNA MANERA COLABORARON EN LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.

TAMBIEN LES AGRADESCO A TODAS AQUELLAS PERSONAS (SI ASI SE LES PUEDE LLAMAR) LOS OBSTACULOS QUE PUSIERON EN MI CAMINO. ESO SOLO SIRVIO PARA AUMENTAR EN MI EL DESEO DE SUPERACION.

INDICE	PAG.
1.- INTRODUCCION	1
2.- MAREA ASTRONOMICA	4
3.- MAREA DE TORMENTA	18
4.- EFECTOS DE LAS MAREAS EN LAS COSTAS	24
4.1 Métodos de predicción de la marea astronómica	24
4.2 Predicción de la marea de tormenta	36
4.3 Velocidad media de la corriente de marea	54
5.- ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LAS MAREAS PARA UN CASO ESPECIFICO	63
5.1 Localización de la zona de estudio	63
5.2 Recopilación de información de las corrientes en la desembocadura del río	63
5.3 Cálculo del prisma de marea	95
5.4 Cálculo de la sobreelevación por tormenta	102
5.5 Cálculo de las velocidades de la corriente de marea	104
6.- DISCUSIONES DE RESULTADOS	110
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
BIBLIOGRAFIA	119

1.- INTRODUCCION

Si nos paramos en la orilla del mar y preferentemente junto a un muelle, podemos comprobar que el nivel del mar varía en el transcurso de un día, ascendiendo poco a poco hasta alcanzar una altura máxima y descendiendo después hasta una altura mínima, para reiniciar nuevamente el ascenso. A estos movimientos alternativos del nivel del mar se les llama mareas.

El fenómeno de las mareas fué conocido por nuestros antepasados, habiendo tratado de explicarlo; Estrabón, Plinio, Kepler y muchos otros. Diez siglos antes de la era cristiana el rey judío David ya hablaba de las mareas. Los chinos explicaban el fenómeno, como la respiración y pulso de la tierra. Mientras que los árabes creían que se debía al calor solar que hacía más o menos densas las aguas del mar. Newton formuló una teoría sobre las causas de las mareas que, aunque ha sido modificada por astrónomos posteriores, como Laplace, Hædt y Lord, Kelvin, sentó las bases fundamentales de la explicación de este fenómeno. Según esta teoría las mareas son producidas por la atracción ejercida por la luna sobre las aguas del mar.

Existen dos tipos de mareas; la marea astronómica y la marea de tormenta. La marea astronómica se origina por la fuerza gravitacional de los astros; tierra, sol y luna provocando un aumento del nivel en la superficie libre del agua, estas variaciones de nivel del agua pueden ser mayores

o menores de acuerdo con la posición relativa del sol y la luna dando origen a mareas máximas y mareas mínimas.

La marea de tormenta se define como el aumento (o disminución) del nivel del agua arriba (o abajo) del nivel de la marea astronómica. La marea de tormenta se origina por la acción del esfuerzo del viento sobre la superficie del agua, los principales factores que influyen en la marea de tormenta son: vientos fuertes, presión baja en el centro de la tormenta, configuración de la costa, fase con la marea astronómica y otras.

Al producirse las mareas se originan flujos de agua (y reflujos), conocidos como corrientes de marea negativos (reflujo) en dirección hacia el mar y positivos (flujo) en dirección hacia tierra.

Las corrientes de marea tienen pequeñas influencias en playas abiertas pero pueden tener efectos considerables en el fenómeno del movimiento de arena, relacionado con el mantenimiento de accesos a puertos, en fenómenos de erosión en las proximidades de estructuras y en el azolvamiento de puertos, por lo general el efecto combinado de estas corrientes y el oleaje casi siempre originan la formación de barras de arena en el lado exterior de los puertos.

Para conocer las características de las corrientes de mareas y definir las estructuras más convenientes, a fin de

que dichas corrientes causen problemas en las costas, existen métodos de cálculo para predecir los niveles y las velocidades de la corriente de marea.

En este trabajo se discuten algunos métodos para calcular los fenómenos relacionados con las mareas, y su aplicación se realiza tomando como base una serie de campañas de mediciones efectuadas por el laboratorio de Hidráulica Marítima de la S.C.T. para el Puerto de Tecolutla Veracruz, se discuten los resultados obtenidos de las aplicaciones realizadas y se establecen las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

2.- MAREA ASTRONOMICA

El fenómeno de la marea astronómica es ocasionado por la atracción de cuerpos celestes sobre la superficie líquida de la tierra, dando lugar a movimientos de grandes masas de agua. Los cuerpos celestes que tienen influencia decisiva en las mareas son: el sol y la luna. Esta última por su cercanía a la tierra y el sol por su enorme masa; siendo sin embargo, la atracción de la luna 2.18 veces mayor que la del sol. Ya que la fuerza de atracción es directamente proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Las fuerzas de principal importancia en la generación de las mareas astronómicas son:

- a).- Las fuerzas gravitacionales del sol y la luna.
- b).- La fuerza centrífuga debida al movimiento de la tierra al rededor de su órbita.
- c).- La fuerza de Coriolis debida a la rotación de la tierra al rededor de su eje.
- d).- La fuerza de fricción debida al movimiento del agua con respecto a las fronteras que la contienen.

Si observamos las posiciones del sol y la luna, podemos darnos cuenta de la relación existente con el fenómeno de las mareas.

Esta influencia es función de las fases de la luna, la posición relativa de los tres astros: tierra, luna y sol, y la distancia de éstos con nuestro planeta, son las causas que determinan a las mareas. Por esta razón las fases de la luna

Juegan un papel muy importante en la amplitud de las mareas. Asimismo, recordaremos que la luna describe una órbita elíptica alrededor de la tierra, que ocupa uno de sus focos: que el período completo de sus fases o mes lunar es de 29 días, 12 horas, 44 minutos: que la duración del día lunar es de 24 horas, 50 minutos, 30 segundos.

Cuando las posiciones del sol y la luna están en línea recta con la tierra, se suman las atracciones de los dos astros y se producen las mareas vivas. Cuando la luna se halla en cuarto creciente o cuarto menguante, formando ángulo recto con los ejes de la tierra y el sol, las atracciones se contrarrestan, dando lugar a las mareas muertas.

Ahora bien, dentro de estas mareas vivas y muertas existen dos que corresponden a las sicigias de primavera y otoño, es decir, las llamadas equinocciales, que son las mareas vivas del año: mientras que las de menor carrera de marea (mareas muertas), son las correspondientes a los solsticios, comienzo de las estaciones de verano e invierno, ver figura 2.1.

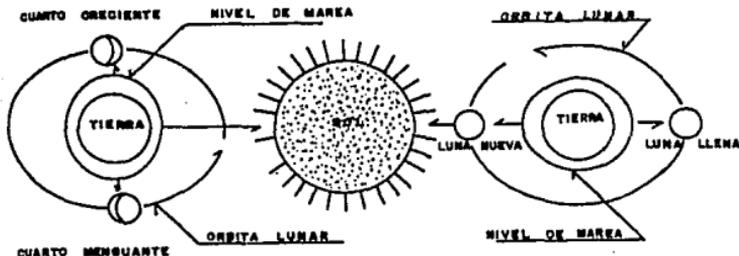


FIGURA 2.1

Los movimientos alternativos de las aguas del mar producidos por las mareas en un sitio determinado, se manifiestan por un ascenso del nivel hasta llegar a un máximo que recibe el nombre de pleamar, descendiendo después hasta alcanzar al cabo de cierto tiempo un valor mínimo llamado bajamar que se repite en forma periódica dependiendo del tipo característico de la marea. Por lo tanto, se entiende por periodo de la marea al tiempo transcurrido entre dos pleamares o dos bajamares consecutivos, y amplitud o carrera de la marea a la altura entre un pleamar y un bajamar siguiente o viceversa, es decir, la altura entre dos valores extremos consecutivos, ver figura 2.2.

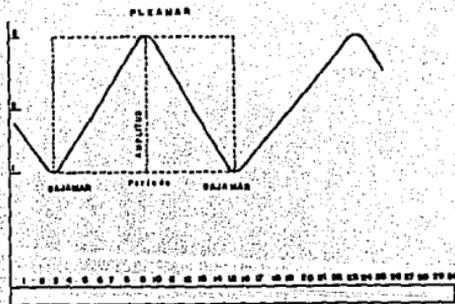


FIGURA 2.2

Atendiendo al número de pleamares (ascensos) y de bajamares (descensos) que tienen lugar en un día y su amplitud, las curvas de marea (mareograma) se clasifican en tres tipos como sigue:

- a).- Mareas semidiurnas.- Se caracterizan por tener dos

pleamares y dos bajamares en un día, se presentan bajo una forma muy regular, y su amplitud es aproximadamente la misma. Su periodo es de medio día (12 horas, 25 minutos), de aquí su nombre de semidiurna (figura 2.3a), este tipo de mareograma es el más frecuente en la mayoría de las costas del Atlántico.

b).- Mareas diurnas.- Llamadas así por presentar solamente un pleamar y un bajamar en un día. Su periodo es de un día (24 horas, 50 minutos), ver figura 2.3b, generalmente son de pequeña amplitud y tienen lugar en el Golfo de México.

c).- Mareas mixtas.- Caracterizadas por tener dos pleamares y dos bajamares por día, pero con la particularidad de presentar amplitudes de marea diferentes. Suele suceder que la primera bajamar del día es la más baja, y la segunda pleamar la mayor, ver figura 2.3c, este tipo suele terminar transformándose en el de marea diurna al cabo de un mes, ya que una de las amplitudes va disminuyendo gradualmente, y a la vez que el periodo de la otra aumenta paulatinamente, al ser cada vez más lento el proceso de ascenso y descenso de las aguas, hasta acabar en una sola marea por día. Este tipo de marea es muy frecuente en el Océano Pacífico y muy raro en el Atlántico, en ocasiones es posible observarlo en algún puerto de las Antillas.

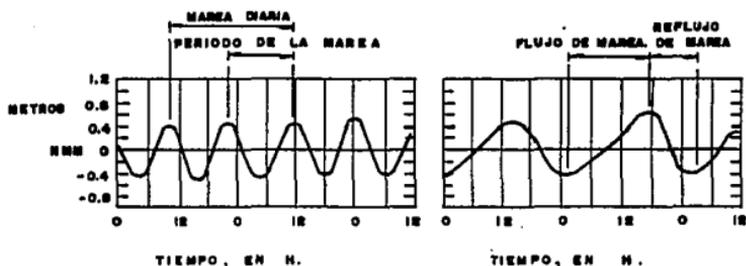


FIGURA 2.3a

FIGURA 2.3b



FIGURA 2.3c

La fase de ascenso de la marea astronómica en un estuario o en una laguna litoral se denomina flujo (flujo de agua con dirección del mar hacia aguas arriba) y la de descenso se denomina refluo o vaciante (flujo de agua con dirección de aguas arriba hacia el mar).

La variación de los niveles de agua producida por las mareas y la necesidad de tener alguna referencia para la construcción de una estructura, requiere algún plano de referencia. En general, se usan los planos que a continuación se definen:

Altura máxima registrada (A.M.R.).- Nivel más alto registrado en la estación.

Nivel de pleamar media superior (N.P.M.S.).- Promedio de la más alta de las dos pleamares diarias, durante el periodo considerado en cada estación.

Nivel de pleamar media (N.P.M.).- Promedio de todas las pleamares durante el periodo considerado en cada estación. Cuando el tipo de marea es diurna, este plano se calcula tomando el promedio de la pleamar más alta diaria, lo que equivale a que la pleamar media en este caso sea la misma que la pleamar media superior.

Nivel medio del mar (N.M.M.).- Promedio de las alturas horarias durante el periodo considerado en cada estación.

Altura mínima registrada.- Nivel más bajo registrado en la estación debido a efectos ajenos a la marea astronómica y sobrepuestos a ella.

Bajamar mínima registrada (B.M.R.).- Nivel más bajo registrado debido a la marea astronómica, bajo condiciones meteorológicas normales.

Nivel de bajamar media inferior (N.B.M.I.).- Promedio de

la más baja de las dos bajamares diarias, durante el período considerado en cada estación. Este plano es el que se utiliza como referencia para el pronóstico de mareas en la costa del Pacífico y Golfo de California, mismo que utiliza el Coast and Geodestic Survey.

Nivel de bajamar media (N.B.m.).- Promedio de todas las bajamares durante el período considerado en cada estación. Cuando el tipo de marea es diurno, este plano se calcula tomando el promedio de la bajamar más baja diaria, lo que equivale en este caso, a que la bajamar media es lo mismo que la bajamar media inferior.

Nivel de media marea (N.M.M.).- Plano equivalente entre la pleamar media y la bajamar media, se obtiene promediando estos dos valores.

Equipo de medición

La medición de las mareas al igual que el oleaje, representan uno de los grandes problemas de la instrumentación Oceanográfica no por las técnicas de diseño de los instrumentos, si no por su instalación pues se requiere fijarlos firmemente y referirlos algún punto, cuya elevación sea conocida.

El instrumento para medir las mareas se puede simplificar tanto, que puede sólo consistir en una escala graduada o regla, sobre la que visualmente se leen los desplazamientos del nivel de agua. Esto se utiliza cuando se efectúan mediciones durante un corto período de tiempo, menor de unos tres meses.

En estaciones definitivas o para la adquisición de datos durante períodos mayores se utilizan los mareógrafos que son aparatos destinados a registrar automáticamente las variaciones del nivel del mar. Se componen fundamentalmente de dos partes: un registrador y el sistema destinado a transmitir a dicho aparato la variación del nivel presentada por el agua.

Esta transmisión puede hacerse de diferentes maneras, lo que da lugar a dos tipos de mareógrafos: Los llamados de flotador y los de presión. Los primeros consisten en un flotador de bronce, unido por medio de un alambre a una pluma, que va registrando los movimientos del flotador sobre un papel milimétrico enrollado en un tambor; este se mueve accionado por un reloj, dando una rotación completa cada 24 horas. De esta manera se obtienen los mareogramas, que son las curvas de variación del nivel del mar en función del tiempo.

Generalmente este tipo de mareógrafo, que es muy usado, requiere de una pequeña obra para su instalación, que consiste en un tubo para el flotador y una caseta para el aparato registrador; por ello, una vez situado no se suele cambiar de lugar debido a las dificultades que entraña. Generalmente el agua del mar no llega directamente al tubo, sino a través de un sifón, para impedir el efecto de perturbaciones secundarias, ver figura 1.4.

Otro tipo de mareógrafo es el de presión. Estos normalmente son portátiles, y consisten en esencia de

unos manómetros registradores que miden las variaciones de presión ejercidas sobre el fondo del mar por la columna de agua que tienen encima, ver figura 2.5.

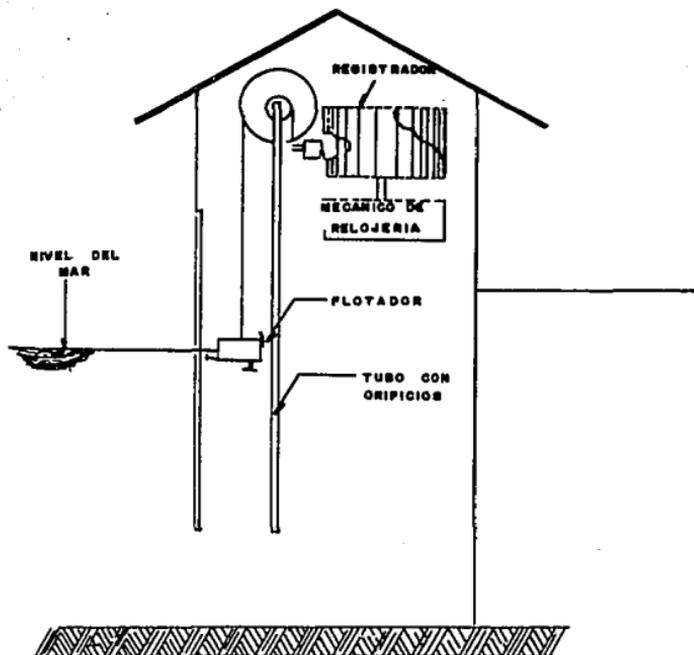


FIGURA 2.4

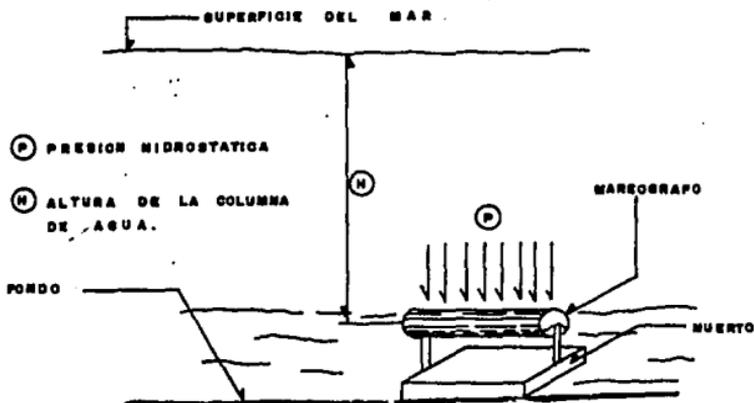


FIGURA 2.5

Corrientes de marea.

Junto con el desplazamiento vertical del agua al producirse la marea, existen también desplazamientos horizontales del agua a los que se les denomina corrientes de marea, las cuales se caracterizan por variar su dirección e intensidad con la marea; tienen poca significancia en mar abierto y en cambio, en puertos y estuarios estrechos, tienen mucha importancia.

La dirección de una corriente es el rumbo hacia el cual se dirige; es decir, la forma de designar la dirección de una corriente es contraria a la que se utiliza en los vientos, ya que en estos se considera de donde sopla el viento y no hacia donde sopla este. La velocidad de una corriente se expresa tradicionalmente en nudos, cuando se tratan aspectos

relativos a la navegación (un nudo = 1 milla marítima por hora = 1853 mts./hora = 0.5 mts./seg.).

En bahías o lagunas litorales comunicadas con el mar por un canal de ancho considerablemente menor que el área del cuerpo del agua, podemos considerar que las corrientes son rectilíneas. invirtiéndose el sentido según se presenta el ascenso o descenso de la marea.

La dirección del flujo es el establecido por la corriente, la máxima velocidad de la corriente se presenta más o menos al mismo tiempo en que se presenta el máximo cambio del nivel del agua.

La característica primordial de este tipo de corrientes, es su periodicidad que puede ser diurna, semidiurna o mixta según sea la marea astronómica. En las entradas, la corriente de una marea fluye en dos sentidos; cuando está creciendo hacia la zona interna (flujo) y cuando está descendiendo hacia mar adentro (reflujo), ver figura 2.6.

Las corrientes de marea tienen pequeñas influencias en playas abiertas, pero pueden tener efectos considerables en el fenómeno de movimientos de arena, relacionado con el mantenimiento de accesos a puertos, en fenómenos de erosión en las proximidades de estructuras y en el azolvamiento de puertos. Por lo general el efecto combinado de estas corrientes y el oleaje casi siempre originan la formación de barras de arena en el lado exterior de los puertos, y por el contrario en zonas de mar profundo estas corrientes mantienen una rotación periódica por causas de las fuerzas de Coriolis con velocidades relativamente bajas.

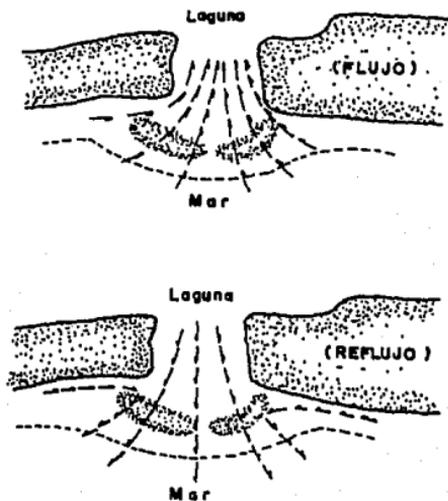


FIGURA 2.4

Las características de las corrientes de marea, como es fácil de comprender, cambian de un lugar a otro dependiendo en primer término del carácter de la marea y en función también de la profundidad y la complicada Topografía que en ocasiones esta compuesta por cuencas profundas y someras y/o por estrechos canales y umbrales que las conectan.

Medición de las corrientes.

La marea siendo un fenómeno complejo en una teoría general no se podrían explicar todas sus características y su propagación como corriente de marea.

Los métodos empleados para la medición de las corrientes pueden dividirse en dos grandes grupos: Directos e indirectos. los primeros consisten en hacer medidas con un aparato en el mismo punto. el aparato se llama corrientómetro y puede ser del tipo mecánico o electrónico (ver figura 2.7); estos aparatos se introducen al agua desde una lancha y registran la velocidad en base a una propela calibrada y un contador de revoluciones. el tipo de aparato que se emplee dependerá del sitio. número y duración de las mediciones.

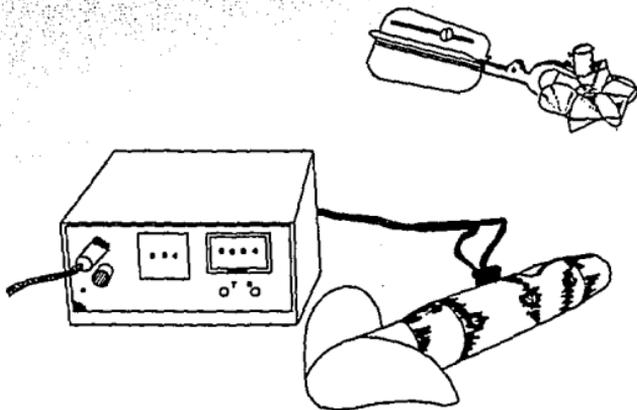


FIGURA 2.7

El aspecto de la circulación de las corrientes, es uno de los menos conocidos y la mayor parte de este conocimiento ha sido adquirido a partir de métodos indirectos como son: Modelos numéricos, Hidrografía, flujos de calor, observaciones de satélite, etc. Una teoría apoyada con mediciones de campo para determinar las características de las corrientes y niveles del mar puede ser posible mediante un método práctico para su estudio, dicho método consiste en modelos numéricos, y es uno de los más destacados. En general los trabajos realizados en base a modelos numéricos lineales muestran que las elipces de marea son casi unidireccionales en todo lo largo, se obtienen las máximas amplitudes en los canales estrechos que rodean a las grandes islas.

No hay que olvidar que a excepción de los modelos numéricos, los demás métodos indirectos para inferir la circulación de las corrientes no dan información acerca del campo instantáneo de velocidad.

La mayoría de los estudios realizados en base a mediciones cuentan con un reducido número, de ellas y representan condiciones en áreas restringidas.

En términos generales, el cálculo de las corrientes de marea se realiza para pronosticar los cambios que estas sufren, y que se originan por la construcción de puertos, rellenos y estructuras en aprovechamientos lagunarios y estuarios en zonas costeras y portuarias, así como en los estudios de contaminación de las áreas de agua portuarias y costeras antes mencionadas.

3.- MAREA DE TORMENTA

Una tormenta es una perturbación atmosférica caracterizada por fuertes vientos, los cuales pueden ir acompañados de precipitación. Las tormentas se clasifican en: Tormentas originadas en el trópico, llamadas tormentas tropicales y las tormentas que son el resultado de un frente frío con un caliente llamadas tormentas extratropicales. Ambas tormentas pueden producir levantamientos anormales en el nivel del agua y en zonas poco profundas cercanas a la costa.

Algunas tormentas tropicales son llamadas huracanes cuando los máximos vientos sostenidos son alrededor de 75 millas por hora (65 nudos). Algunos huracanes pueden llegar a alcanzar vientos de 150 millas por hora o más. Los huracanes generalmente están bien organizados y tienen un patrón de viento circular con vientos circulando alrededor de un centro u ojo (que no necesariamente es el centro geométrico). El ojo es una área de baja presión atmosférica, y ligeros vientos. La presión atmosférica y la velocidad del viento se incrementan conforme se va alejando del centro u ojo hasta llegar a una zona de máximo viento, el cual puede estar desde las 4 hasta las 60 millas náuticas desde el centro. Desde la zona de máximo viento a la periferia del huracán, la presión continúa en aumento; sin embargo, la velocidad del viento decrece, ver figura 3.1.

Las tormentas extratropicales que ocurren a lo largo de las costas del noroeste de nuestro país y Estados Unidos son llamadas nortes y estos tienden a ocurrir en el periodo que comprenden los meses de noviembre-abril, en cambio los meses de huracanes ocurren de junio a noviembre.

Un norte típico consiste en un simple centro de baja presión y los vientos giran alrededor de este centro pero los patrones de viento son menos sistemáticos que los asociados con los huracanes.

La marea de tormenta se define como el aumento (o disminución) del nivel del agua arriba (o abajo) del nivel de la marea astronómica, debido a la acción del esfuerzo del viento sobre la superficie del agua.

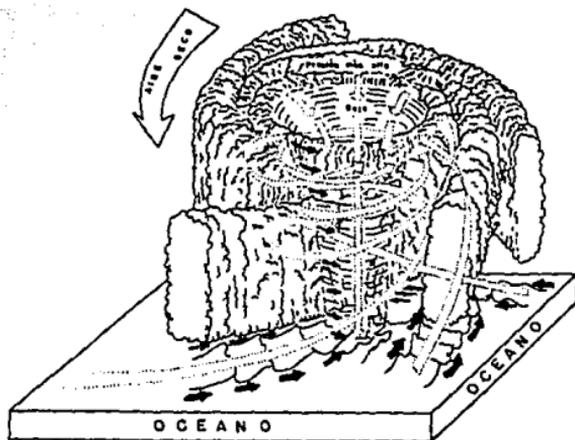


FIGURA B.1 FORMACION DE UN HURACAN.

Los principales factores que influyen en la marea de tormenta son:

- 1.- Vientos fuertes.
- 2.- Presión baja en el centro de la tormenta.
- 3.- Configuración de la costa.
- 4.- Pendiente de la plataforma continental.
- 5.- Angulo entre la trayectoria del huracán y la línea costa.
- 6.- Fase con la marea astronómica.
- 7.- Efectos debidos a la lluvia.
- 8.- Rompimiento del oleaje.
- 9.- Convergencia de corrientes generadas por el viento en el mar.

La marea de tormenta es conocida también como sobreelevación del nivel medio del mar: esta sobreelevación se produce por varias razones. Una de ellas es que el viento en dirección perpendicular a la costa ejerce una fuerza cortante sobre la superficie del mar, que al no poder generar una corriente (por ser perpendicular a la costa), se contrarresta con una sobreelevación en la costa. Por otra parte, el viento en dirección tangencial a la costa produce una corriente a lo largo de esta, y la fuerza de Coriolis tiende a desviar a la derecha; y si la costa se localiza a la derecha de la corriente, no ocurre desviación alguna y de nuevo se origina una sobreelevación del nivel.

La marea de tormenta suele ser muy importante en áreas costeras sujetas a vientos ciclónicos o huracanados, ya que puede causar aumento o disminución de los niveles de agua debidos a las mareas astronómicas, este aumento depende de la

coincidencia de la pleamar o bajamar con la incidencia del huracán, por lo que, para el caso de algunos proyectos específicos es de vital importancia tomar en cuenta su efecto. En el caso de mareas de tormenta positivas (ascensos) el viento sopla contra la costa considerada y en caso contrario (descensos) el viento sopla a la dirección opuesta, ver figura 3.2.

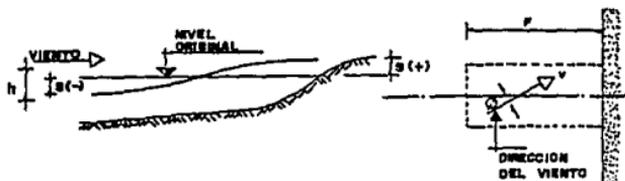


FIGURA 3.2 MAREA DE TORMENTA (BRETSCHNEIDER)

Factores que generan una marea de tormenta. La extensión para el cual el nivel de agua empezará a ascender depende de varios factores, estos factores se relacionan con:

- 1.- Características y comportamiento de la tormenta.
- 2.- Hidrografía de la cuenca.
- 3.- Estado inicial del sistema.
- 4.- Otros efectos que pueden ser considerados exteriores al sistema.

Algunos factores diferentes que pueden ser responsables en el cambio de niveles durante el paso de una tormenta son los siguientes:

- 1.- Las mareas astronómicas.
- 2.- Vientos directos.
- 3.- La diferente presión atmosférica.
- 4.- La rotación de la tierra.
- 5.- La lluvia.
- 6.- Las olas superficiales y las asociadas con la sobreelevación.
- 7.- Efectos del movimiento de la tormenta.

La sobreelevación del nivel en una cuenca depende de la intensidad de la tormenta, la ruta o trayecto, duración, variación de la presión atmosférica, velocidad de traslación, magnitud de la tormenta y lo asociado con la lluvia. Las características de la cuenca que influyen en los cambios en el nivel del agua son: La magnitud de la cuenca y su forma, así como la configuración de la superficie del fondo y la rugosidad.

El principal efecto de esta marea es la inundación de extensas zonas costeras que, dependiendo de la Topografía, puede cubrir franjas de varios kilómetros. En el hemisferio norte, las máximas mareas de tormenta se esperan a la derecha del punto de incidencia del huracán en tierra.

Las bahías y otras entrantes de la costa también son vulnerables a la marea de tormenta. Otra situación crítica se presenta en la desembocadura o en las aguas costeras de los ríos, cuando el valor máximo de la inundación debida a las

lluvias se produce al mismo tiempo que la marea de tormenta, teniéndolo como consecuencia niveles altos de agua.

La marea de tormenta alcanza mayor altura en regiones donde la plataforma continental es de pendientes tendidas, como en la costa norte de Yucatán. En costas cerradas o vasos estrechos, puede ser mayor la marea de tormenta, es decir, bahías como Acapulco, Ensenada y estuarios.

El avance de un huracán hacia la costa, trae consigo un aumento anormal en el nivel de mareas, siendo en ocasiones para huracanes intensos superiores a 5 metros sobre la marea normal, este efecto es el que más daños produce cuando se presenta en las zonas costeras.

Para evaluar la marea de tormenta se debe tomar en cuenta la sobreelevación por viento y sumar los efectos de la presión atmosférica y los de la marea astronómica.

El principio físico sobre el que se basa la fuerza de Coriolis y la fuerza centrífuga, es un principio de inercia de la naturaleza. Este principio expresa que existen tres magnitudes físicas que tienden a permanecer constantes: la energía, conservación del momento e impulso angular. Este principio nos dice que todo cuerpo libre, sobre el que actúan fuerzas exteriores, tiende a conservar el impulso que le a sido comunicado. Un carrusel rígido, formado por masas puntuales que son libres, tiene en todos sus puntos la misma velocidad angular; el impulso angular es máximo en la parte exterior a gran distancia del eje de rotación, y mínimo en las proximidades del eje.

4. EFECTOS DE LAS MAREAS EN LAS COSTAS

4.1 Métodos de predicción de la marea astronómica.

Los pronósticos de la marea astronómica para los principales puertos de la República Mexicana se obtienen de los cálculos basados en los registros de la red de mareógrafos instalada por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. Se utilizan series de 369 días de alturas horarias para calcular 48 constantes armónicas para cada puerto, por el método de mínimos cuadrados, a manera de ejemplo en la tabla No. 4.1 se presentan las principales constantes armónicas para el puerto de Veracruz Ver. publicadas por dicho Instituto (referencia 4.1).

PRINCIPALES CONSTANTES ARMONICAS

COMPONENTE	H		g (grados) 90°W
M ₂	0.289 pies	0.088 m	69.10
S ₂	0.088 pies	0.027 m	71.14
N ₂	0.075 pies	0.023 m	56.23
K ₁	0.504 pies	0.154 m	287.36
O ₁	0.495 pies	0.151 m	291.37
P ₁	0.151 pies	0.046 m	292.52

Tipo de marea: Mixta diurna.

TABLA 4.1

Las tablas de predicción y los calendarios gráficos de mareas publicados por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. contienen la hora en que ocurrirán las pleamares y bajamares, así como la altura con relación al plano de referencia. En la tabla 4.2 y figura 4.1 se presentan a manera de ejemplo los datos de mareas que dicho Instituto publicó para el Puerto de Veracruz para el mes de enero de 1993.

Las pleamares y las bajamares pueden ser identificadas por la comparación de alturas consecutivas, correspondiendo las pleamares a las de mayor valor y las bajamares a las de menor valor.

La hora usada para la predicción en cada puerto corresponde a la del meridiano del lugar y se indica al pie de cada página de las tablas de predicción. Se cuenta desde las 00 hs que corresponde a la media noche.

Altura de marea. Las alturas de las mareas están dadas en pies y décimas y sus respectivas conversiones a metros, a partir del plano de referencia.

Los planos de referencia y los bancos de nivel están referidos al nivel medio del mar. La publicación de los diferentes planos de mareas, cotas de bancos de nivel y el croquis de localización de dichos bancos para cada puerto, es con el fin de dar una mayor información mareográfica para los fines prácticos de ingeniería portuaria, obras hidráulicas, construcciones próximas al mar, etc.

Los diferentes planos de mareas están calculados tomando como base al nivel medio del mar, indicándose para cada

ESTACION			VERACRUZ, VER.			ENERO, 1993		
DIA	HORA	PIES METROS	DIA	HORA	PIES METROS	DIA	HORA	PIES METROS
1	0247	.2 .06	11	0248	1.4 .43	21	0723	-.3 -.09
	1800	1.2 .37		1007	.0 .00		1606	1.7 .52
				1725	1.5 .46			
				2323	.9 .27			
2	0325	.1 .03	12	0423	1.3 .40	22	0801	-.2 -.06
	1524	1.3 .40		1100	.4 .12		1619	1.6 .49
				1742	1.4 .43			
3	0405	-.1 -.03	13	0012	.6 .18	23	0835	-.1 -.03
	1425	1.4 .43		0612	1.2 .37		1630	1.5 .46
				1149	.8 .24		2200	1.1 .34
				1753	1.4 .43			
4	0448	-.3 -.09	14	0107	.3 .09	24	0124	1.2 .37
	1441	1.6 .49		0823	1.3 .40		0906	.0 .00
				1247	1.1 .34		1639	1.4 .43
				1753	1.3 .40		2217	1.0 .30
5	0530	-.5 -.15	15	0207	.1 .03	25	0224	1.1 .34
	1505	1.7 .52		1121	1.4 .43		0935	.2 .06
							1643	1.3 .40
						2243	.8 .24	
6	0611	-.6 -.18	16	0307	-.2 -.06	26	0327	1.0 .30
	1536	1.8 .55		1314	1.5 .46		0956	.4 .12
							1647	1.2 .37
						2317	.6 .18	
7	0700	-.7 -.21	17	0407	-.3 -.09	27	0443	.9 .27
	1602	1.8 .55		1406	1.6 .49		1013	.6 .18
							1647	1.2 .37
							2354	.4 .12
8	0742	-.7 -.21	18	0506	-.4 -.12	28	0620	.9 .27
	1630	1.8 .55		1443	1.7 .52		1017	.8 .24
						1647	1.2 .37	
9	0830	-.6 -.18	19	0553	-.4 -.12	29	0038	.2 .06
	1648	1.7 .52		1517	1.7 .52		1635	1.2 .37
	2221	1.3 .40						
10	0115	1.4 .43	20	0642	-.4 -.12	30	0130	.1 .03
	0918	-.4 -.12		1542	1.7 .52		1600	1.3 .40
	1708	1.6 .49						
	2245	1.1 .34						
HORA DEL MERIDIANO 90 W.						31	0224	.0 .00
							1419	1.4 .43

TABLA 4.2

ENERO 1993

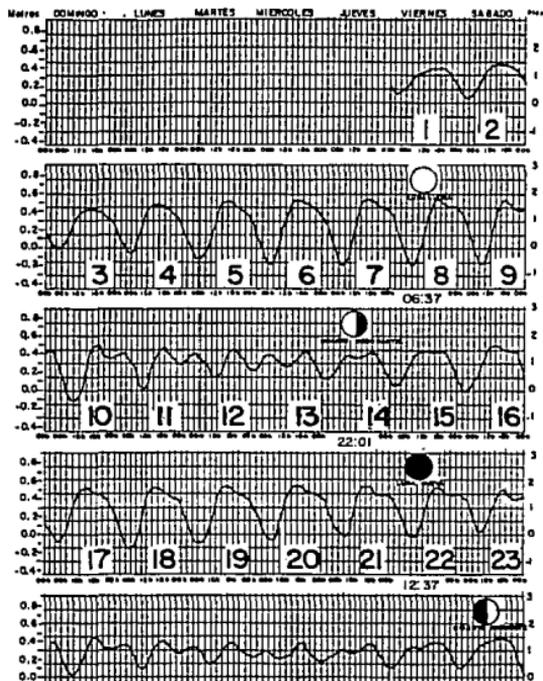


FIGURA 4.1

puerto el período de dicho cálculo basado en los registros mareográficos. En la tabla No. 4.3 se presentan los diferentes planos de mareas publicados por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. para el Puerto de Veracruz Ver.

Lat. 19°12'.1 N

Long. 96°08'.2 W

Enero de 1953 a Diciembre de 1971.

PLANOS DE MAREAS REFERIDOS AL NIVEL MEDIO DEL MAR

Pleamar máxima registrada	3.048 pies	0.929 m
Nivel de pleamar media	0.726 pies	0.221 m
Nivel medio del mar	0.000 pies	0.000 m
Nivel de media marea	-0.131 pies	-0.040 m
Nivel de Bajamar media	-0.988 pies	-0.301 m
Bajamar mínima registrada	-2.552 pies	-0.778 m

COTAS DE LOS BANCOS DE NIVEL REFERIDAS AL NIVEL MEDIO DEL MAR

BN1	6.936 pies	2.114 m
BN4	6.148 pies	1.874 m
BN7	7.024 pies	2.141 m
BN8	6.050 pies	1.844 m

TABLA 4.3

Las alturas de los bancos de nivel están referidas al nivel medio del mar. Para obtener la altura de un banco de nivel con relación a un plano de referencia que esté bajo el nivel medio del mar (los valores negativos), habrá que sumar a la cota del banco elegido el valor absoluto de dicho plano. Lo contrario se hará para los planos que estén sobre el nivel medio del mar, es decir, a la cota del banco se le restará el valor del plano de referencia.

4.1.1 Factores que intervienen en las componentes armónicas.

Los métodos para la predicción de la marea astronómica pueden ser clasificados como armónicos y no armónicos (espectrales), el método armónico describe el movimiento vertical del agua, originado por las mareas, como la superposición lineal de una serie de términos armónicos, llamados "componentes".

En el caso de los niveles del mar las componentes para un determinado lugar e intervalo de tiempo, se caracterizan por los siguientes tres factores:

- Amplitud (h_j): Es la diferencia vertical en altura entre el más alto (o más bajo) nivel y el nivel promedio (m).
- Período (w_j): Es el tiempo en horas requerido por el efecto de una componente para recurrir (expresado en grados/hora).
- Ángulo de fase (α_j): Es el tiempo transcurrido entre el paso de un astro (luna o sol) a través del meridiano del lugar considerado y el tiempo real de ocurrencia (expresado en grados).

4.1.2 Análisis armónico de la corriente de marea.

La velocidad de la corriente de marea "U" se expresa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$U = U_0 + U_1 \cos(\sigma t - \mu_1) + U_2 \cos(2\sigma t - \mu_2) + U'(t) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

U	Velocidad de la corriente de marea.
U ₀	Corriente constante durante el día.
U ₁ Cos (σt - μ ₁)	Corriente de marea diurna.
U ₂ Cos (2σt - μ ₂)	Corriente de marea semidiurna.
U'(t)	Varias corrientes que tienen periodos menores que la componente semidiurna, pero que no son confiables en la medición.
μ	Angulo de fase.
σ	$\frac{2\pi}{T}$
T	Periodo de la corriente.

El periodo de la corriente de marea es de 24 horas lunares, es decir, cada 24 horas lunares se repiten los mismos valores de la velocidad de la corriente. Una hora lunar corresponde a 1.0417 de hora solar ó 24 horas lunares corresponden a 25 horas solares.

El periodo de la marea diurna es de 24 horas lunares y el periodo de la marea semidiurna es de 12 horas lunares.

Desarrollando la ecuación 4.1 resulta:

$$U = U_0 + U_1 \cos \sigma t \cos \mu_1 + U_2 \cos 2\sigma t \cos \mu_2 + U_1 \operatorname{Sen} \sigma t \operatorname{Sen} \mu_1 + U_2 \operatorname{Sen} 2\sigma t \operatorname{Sen} \mu_2 + U'(t) \quad \text{Ec. 4.2}$$

Reduciendo la ecuación anterior resulta:

$$U = U_0 + \sum_{k=1} [U_k \cos k\omega t \cos \mu_k + U_k \sin k\omega t \sin \mu_k] + U'(t)$$

Si el valor de la corriente "U" en un tiempo t_m es U_m en la ecuación anterior se tendrá:

$$U_m = U_0 + \sum_{k=1} [U_k \cos k\omega t_m \cos \mu_k + U_k \sin k\omega t_m \sin \mu_k] + U'(t) \quad \text{Ec. 4.3}$$

Por otro lado si el intervalo de los datos para discretizar el registro se expresa como "t" y el número de datos se expresa como "N". El periodo T queda expresado como sigue:

$$T = (\Delta t)N$$

Al usar la definición anterior, se tiene:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{(\Delta t)N} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$t_m = m (\Delta t)$$

$$\sigma t_m = \frac{2\pi}{(\Delta t)N} m \Delta t = \frac{2\pi m}{N} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Al sustituir la ecuación 4.5 en la ecuación 4.3 se tiene:

$$U_m = U_0 + \sum_{\kappa=1}^2 [U_{\kappa} \cos \mu_{\kappa} \cos \frac{2\pi}{N} \kappa m + U_{\kappa} \sin \mu_{\kappa} \sin \frac{2\pi}{N} \kappa m +$$

$$U'(t) \dots \dots \dots \text{Ec. 4.6}$$

El valor de U_m en las series del tiempo queda expresado en la ecuación 4.7, por la aproximación finita de Fourier como sigue:

$$U_m = \frac{A_0}{2} + \sum_{\kappa=0}^{\frac{N}{2}-1} [A_{\kappa} \cos \frac{2\pi}{N} \kappa m + B_{\kappa} \sin \frac{2\pi}{N} \kappa m] +$$

$$\frac{\Delta N/2}{2} \cos \frac{2\pi(N/2) m}{N} \dots \dots \dots \text{Ec. 4.7}$$

Donde:

$$A_{\kappa} = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_m \cos \frac{2\pi}{N} \kappa m; \quad \kappa = 0, 1, 2, \dots, \frac{N-1}{2}, \frac{N}{2}$$

$$B_{\kappa} = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_m \sin \frac{2\pi}{N} \kappa m; \quad \kappa = 1, 2, 3, \dots, \frac{N-1}{2} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Comparando las ecuaciones 4.6 y 4.7 término a término, se tiene:

$$U_G = \frac{A_0}{2}$$

$$U_k \cos \mu_k = A_k$$

$$U_k \sin \mu_k = B_k$$

el valor del ángulo de fase se calcula, con la razón de B_k y A_k .

$$\frac{B_k}{A_k} = \frac{U_k \sin \mu_k}{U_k \cos \mu_k} = \tan \mu_k$$

$$\mu_k = \tan^{-1} \left(\frac{B_k}{A_k} \right) \quad \text{Ec. 4.9}$$

la amplitud está expresada al tomar la suma de los cuadrados de A_k y B_k como sigue:

$$(U_k)^2 = (A_k)^2 + (B_k)^2 \quad ; \quad U_k = [(A_k)^2 + (B_k)^2]^{1/2} \quad \text{Ec. 4.10}$$

4.1.3 Análisis armónico de los niveles del mar.

En la siguiente tabla (4.4), se presentan algunos términos armónicos o constituyentes más importantes, aunque el total de ellos asciende a más de 200, la influencia de los restantes, es relativamente pequeña.

PRINCIPALES CONSTANTES ARMONICAS



COMPONENTE (SIMBOLO)	C A U S A	W_j (°/HORA)	T (hr) (360°/W _j)
M ₂	MAREA LUNAR	28.98	12.42
S ₂	MAREA SOLAR	30.00	12.00
N ₂	ELIPTICA LARGA DE LA LUNA	28.44	12.66
K ₂	MAREA SEMIDIURNA LUNA/SOL	30.08	11.97
K ₁	MAREA DIURNA LUNA/SOL	15.04	23.94
O ₁	MAREA DIURNA LUNAR	13.94	25.83
P ₁	MAREA DIURNA SOLAR	14.96	24.06

TABLA 4.4

Los valores w_j y T expresados en la tabla anterior son los mismos para cualquier lugar del mundo; los valores h_j y α_j ; son únicos para un lugar en particular y se obtienen a partir de observaciones de campo.

En un cierto lugar y para un tiempo dado cuando se conocen los valores de h y α , para cada uno de los componentes (M₂, S₂, N₂, K₂, K₁, O₁, P₁), el nivel h_i de marea puede ser expresado en su forma general como sigue:

$$h_t = h_o + \sum_{M2}^{P1} [h_j \cos (W_j t - \alpha_j)] \quad \text{Ec. 4.11}$$

o en su forma más desarrollada:

$$h_t = h_o + \sum_{M2}^{P1} f h_j \cos [W_j t + (V_o + M) - g] \quad \text{Ec. 4.12}$$

Donde:

- h_t: Nivel del agua en el tiempo t (m).
- h_o: Nivel del agua promedio; es decir el promedio de una larga serie de observaciones horarias de marea (m).
- t: Tiempo considerado (hr).
- f: Factor de corrección de la amplitud, función de la longitud del módulo lunar.
- (V_o + M): Fase teórica del constituyente y las cero horas del primero de enero de cada año (grados).
- g: Angulo de fase o época del constituyente.

Para el análisis de una marea (calculados h_j y α_j), se recomienda contar con un periodo de 29 días de observaciones horarias, como mínimo. Para eliminar posibles efectos de marea de tormenta, oleaje o errores mecánicos en los instrumentos de medición, es recomendable también mayor cantidad de tiempo. (referencia 4.2).

4.2 Predicción de la marea de tormenta

4.2.1 Generalidades.

Aunque el nivel del mar varía por la marea astronómica en el tiempo normal, este nivel aumenta mucho cuando algún huracán y la depresión atmosférica originada por el efecto de este, pasan cerca de la costa. El aumento del nivel del mar a consecuencia del huracán, depende de la depresión en el centro de éste y la velocidad del viento. Existiendo muchas diferencias en el aumento del nivel, las cuales dependen de la localización y la configuración del sitio en estudio.

Las inundaciones en la costa provocadas por la marea de tormenta son una consecuencia de la fuerza del viento sobre la superficie del mar; en la zona donde sopla en dirección a la costa, provocando en ésta un aumento en el nivel del mar. Otra causa de inundaciones en la costa se debe a la diferencia de presión que existe en el ojo del huracán y la presión normal fuera de éste. Además, el flujo que corre paralelo a la costa también a causa de los vientos, sufre una desviación a la derecha en el hemisferio norte por la acción de la fuerza de Coriolis, y si la costa se encuentra a la derecha entonces se presenta una sobre-elevación en el nivel del mar.

De acuerdo al lugar en donde se presentan los efectos provocadores de marea de tormenta, ya sea en costas abiertas, costas cerradas o semicerradas, existen métodos de cálculo de la sobre-elevación del nivel del mar por la marea de tormenta, a continuación se describen algunos de estos métodos:

4.2.2 Predicción de la marea de tormenta en dársenas cerradas.

Una de las formas más simples para calcular la marea de tormenta (caso de dársenas cerradas o mares limitados, lagunas, albúferas) es mediante el empleo de la fórmula de Bretschneider expresada como sigue:

$$S = \frac{CV^2 F \cos \theta}{h} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Donde:

- S: Sobreelevación del mar por la marea de tormenta m.
- C: Coeficiente igual a $0.4 \times 10^{-6} \text{ seg}^2/\text{m}$.
- V: Velocidad del viento a 6 metros arriba del nivel del mar (m/seg).
- F: Fetch o longitud del área del mar sobre la cual el viento esta soplando (m).
- θ : Ángulo entre la dirección del viento y la línea centro o eje del área considerada.
- h: Profundidad promedio del área considerada medida a lo largo del eje de Fetch (m).

El efecto de la marea resultante (astronómica y de tormenta), puede ser obtenido por la suma o superposición lineal de los niveles de cada una de ellas.

4.2.3 Predicción de la marea de tormenta mediante el uso de las ecuaciones de continuidad y movimiento.

La determinación de la marea de tormenta, en muchos casos puede ser difícil de obtenerse ya que en la generalidad de los casos se carece de datos. Cuando se dispone de registros de niveles de agua, es posible determinar de éstos los efectos de la marea de tormenta, mediante la resta de los niveles generados por la marea astronómica.

Una forma más compleja de predecir la marea de tormenta es la que toma en cuenta las ecuaciones que describen los procesos generadores del fenómeno, dichas ecuaciones son: la ecuación de continuidad o conservación de la masa y la ecuación de movimiento expresada en términos de la segunda ley de Newton, estas ecuaciones representan una simplificación de las ecuaciones completas.

Las ecuaciones antes mencionadas se obtienen considerando las siguientes hipótesis:

- 1.- La aceleración vertical es despreciable.
- 2.- La curvatura de la tierra y los efectos de las olas en la superficie libre del agua pueden ser ignorados.
- 3.- El fluido es incompresible.
- 4.- El plano de la profundidad es fijo e impermeable.

En la figura 4.2 se indica un esquema para denotar la simbología y términos empleados.

Donde "D" es la profundidad total del agua en un tiempo "t", y es dado por $D = d + s$, donde "d" es la profundidad del agua tranquila y "s" es la más alta magnitud de la superficie libre arriba o enseguida originada por la marea

resultante. Los ejes coordenados cartesianos "X" y "Y" están en un plano horizontal en el nivel del agua inalterado y el eje "Z" es dirigido positivamente hacia arriba. El eje "X" es normal a la línea de costa (positivo en la dirección a la zona de costa), y el eje "Y" es paralelo a la costa (positivo a la izquierda cuando se para uno en la línea de costa mirando al mar).

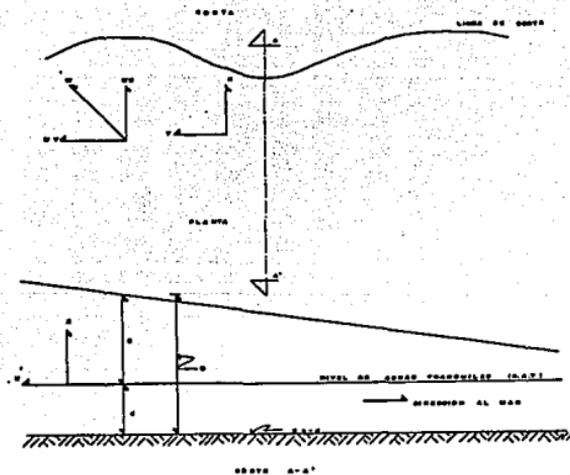


FIGURA 4.2

Las ecuaciones diferenciales apropiadas para problemas de marea de tormentas tropicales o extratropicales sobre costas abiertas y costas cerradas son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = fv - gD \frac{\partial s}{\partial x} + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{e} - \frac{\tau_{bx}}{e} + W_{xp} \quad \text{Ec. 4.14}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = fU - gD \frac{\partial s}{\partial y} + gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{yy}}{e} - \frac{\tau_{by}}{e} + W_{yp} \quad \text{Ec. 4.15}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = p \quad \dots \dots \dots \quad \text{Ec. 4.16}$$

Donde:

$$M_{xx} = \int_{-d}^0 u^2 dz$$

$$M_{yy} = \int_{-d}^0 v^2 dz$$

$$M_{xy} = \int_{-d}^0 u v dz$$

$$U = \int_{-d}^0 u dz$$

$$V = \int_{-d}^0 v dz$$

Las literales representan lo siguiente:

U, V;	Son las componentes en las direcciones "x" y "y" respectivamente del volúmen transportado por unidad de ancho.
t;	Es el tiempo.
Mxx, Myy, Mxy;	Momentum de cantidades transportadas.
f = 2 cos θ ;	coeficiente de Coriolis.
θ ;	Latitud geográfica.
τ_{sx}, τ_{sy} ;	Son las componentes en las direcciones "x" y "y" de la presión del viento en la superficie.
τ_{bx}, τ_{by} ;	Son las componentes en las direcciones "x" y "y" de la presión en el fondo.
ρ ;	Densidad del agua.
W_x, W_y ;	Son las componentes en las direcciones "x" y "y" de la velocidad del viento.
ζ ;	Es la presión atmosférica en calor de agua.
ζ ;	Marea astronómica potencial en calor de agua.
u, v;	Son las componentes en las direcciones "x" y "y" de la velocidad de la corriente.
p;	Porcentaje de precipitación.

g : Aceleración de la gravedad.
 ϕ : Angulo de medición del viento en sentido contrario a las manecillas del reloj desde el eje "x".

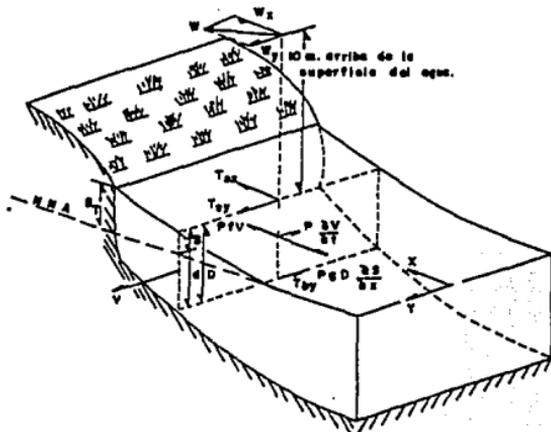
Las ecuaciones 4.14 y 4.15 son expresiones aproximadas para las ecuaciones de movimiento y la ecuación 4.16 es la relación de continuidad para un fluido con densidad constante.

La solución de las ecuaciones anteriores, resulta ser muy complicada. Sin embargo, para la determinación de este fenómeno se usan técnicas simplificadas en las que, utilizando calculadoras de escritorio se puede resolver el problema.

4.2.4 Predicción de la marea de tormenta por el método quasi-estático.

Este método está basado en aproximaciones de las ecuaciones hidrodinámicas antes mencionadas, y el término de quasi-estático se usa para enfatizar que se debe restringir su aplicación sólo a huracanes que se mueven muy lentamente.

En la figura 4.3 se muestra esquemáticamente el sistema de fuerzas que actúan en el fenómeno.



ESQUEMA DE FUERZAS Y RESPUESTAS PARA LA APROXIMACION
BASTISTRAFICA

FIGURA 4.3

Las variables indicadas en la figura anterior, tienen el siguiente significado:

N.A.T.	Nivel de aguas tranquilas.
St	Sobreelevación total del nivel del mar en la costa.
S	Sobreelevación del nivel del mar.
d	Profundidad a partir del nivel de aguas tranquilas (N.A.T).
D	Profundidad total.
T_{ax}, T_{ay}	Componentes en las direcciones "x" y

V	"y" del esfuerzo cortante del viento. Componente en la dirección "y" del transporte del agua por unidad de ancho (de "x").
W	Velocidad del viento.
W _x , W _y	Componentes en las direcciones "x" y "y" de la velocidad del viento.
r _{by}	Componentes en la dirección "y" del esfuerzo en el fondo.
f	Coefficiente de Coriolis.
e	Densidad del agua.
g	Gravedad del agua.
t	Tiempo.

La ecuación diferencial que permite determinar la sobreelevación máxima a lo largo del eje "x" se expresa como sigue:

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial x} \dots \dots \dots \text{Ec. 4.17}$$

Donde:

$$\frac{\partial s_x}{\partial x} = \frac{KW^2 \cos \phi}{gD} \dots \dots \dots \text{Ec. 4.18}$$

$$\frac{\partial s_y}{\partial x} = \frac{FV}{gD} \dots \dots \dots \text{Ec. 4.19}$$

Y

- s_x Componente en la dirección "x" de la sobreelevación.
- s_y Componente en la dirección "y" de la sobreelevación.
- K Coeficiente adimensional de fricción en el fondo que puede variar de 2.0×10^{-9} y 3.0×10^{-9} (se recomienda utilizar 2.5×10^{-9}).
- W Velocidad del viento.
- ϕ Ángulo de incidencia del viento, medido en sentido contrario a las manecillas del reloj, a partir del eje "x".
- g Aceleración de la gravedad.
- d Profundidad.
- f Coeficiente de Coriolis = $2W \sin \phi$
- V Componente en la dirección "y" del transporte de agua por unidad de ancho (de "x").

Resolviendo por el método de diferencias finitas los valores de s_x y s_y pueden evaluarse en puntos espaciados Δx a lo largo del eje cartesiano "x". Los valores S_i del total de la sobreelevación para el incremento pueden estimarse como el valor medio entre los puntos "x" y "x + Δx " en un tiempo "t". El transporte longitudinal del agua "v" es también evaluado entre esos puntos. Los datos del esfuerzo cortante y el coeficiente de Coriolis son proporcionados en los puntos "x" y "x + Δx ".

Los índices "i" y "n" se usan para describir puntos discretos en el espacio y tiempo respectivamente.

Las cantidades Δx y Δt son asignados para dar espacios no uniformes a lo largo de la línea transversal y los incrementos de tiempo. Las ecuaciones 4.18 y 4.19 podrían entonces escribirse introduciendo constantes dimensionales de la forma siguiente:

$$(\Delta S_x)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{C_1 \Delta x}{D_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}} (A_i + A_{i+1})^{n+1}$$

$$(\Delta S_y)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{C_2 \Delta x}{D_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}} [(\text{sen } \phi)_i + (\text{sen } \phi)_{i+1}] V_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}$$

$$V_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{\left(\frac{1}{4}\right) [(B_i + B_{i+1})^n + (B_{i+1} + B_i)^{n+1}] (\Delta t) + V_{i+\frac{1}{2}}^n}{1 + C_3 \left| V_{i+\frac{1}{2}}^n \right| \Delta t K (D^2)_{i+\frac{1}{2}}^{n+1/2}}$$

Donde:

$$A = KW^2 \cos \theta$$

$$B = KW^2 \text{sen } \theta$$

Y

$$K = K_1 \text{ para } W \leq W_c \text{ (Velocidad crítica del viento)}$$

$$K = K_1 + K_2 (1 - W_c/W)^2 \text{ Para } W \geq W_c$$

K1 y K2 son tomados usualmente como 1.1×10^{-6} y 2.5×10^{-6} respectivamente.

El lapso de tiempo especificado como el número ordinal "n" representa un nivel en ese tiempo para el cual ΔSx , ΔSy y V son determinadas.

El tirante total con un intervalo medio entre dos pasos está dado por:

$$D_{l+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{d_l + d_{l+1}}{2} + S_0 + \frac{S_l^n + S_{l+1}^{n+1}}{2} + (S_x + S_y)_{l+\frac{1}{2}}^n +$$

$$\left(\frac{1}{4}\right) \left([(S\Delta p)_l + (S\Delta p)_{l+1}]^n + [(S\Delta p)_l + (S\Delta p)_{l+1}]^{n+1} \right)$$

Donde:

S_0 ; Sobreelevación inicial.

S_0 ; Marea astronómica.

$S\Delta p$; Sobreelevación por efecto de la presión atmosférica.

$$S\Delta p = 1.14 (P_n - P_0) \left(1 - e^{-\frac{R}{r}}\right)$$

Y

P_n ; Es la presión en la periferia de la tormenta.

P_0 ; Es la presión en el centro de la tormenta.

r ; Es la distancia radial del centro de la tormenta al punto de cálculo.

La profundidad total para el nuevo nivel se calcula como sigue:

$$D_{i+1} = \frac{d_i + d_{i+1}}{2} + S_e + S_a + (S_x + S_y)_{i+1} + \frac{1}{2} [(S\Delta p)_i + (S\Delta p)_{i+1}]$$

La sobreelevación total está dada por todos los efectos anteriores que se resumen en:

$$S_T = S_x + S_y + S\Delta p + S_e + S_a + S_v + S_L$$

Donde:

S_v : Sobreelevación producida por el oleaje.

S_L : Sobreelevación local (por formas topográficas).

Para el sistema métrico, las unidades empleadas, así como las constantes son:

Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades
Δx	Km	Δt	hr
$\Delta S_x, \Delta S_y$	m	C_1	3.94
g	m/seg ²	C_2	2.06
D	m	C_3	(1000) ²
A, B	(Km/hr) ²	f	hr ⁻¹
V	Km ² /hr		

4.2.5 Predicción de la marea de tormenta por el Método del nomograma.

Un método simplificado para obtener una primera aproximación de la marea de tormenta provocada por un huracán, se puede obtener de un análisis empírico de registros.

Jalesniansky combinó los datos empíricos con los cálculos técnicos, y definió nomogramas que permiten estimar en forma rápida el máximo pico para cualquier latitud geográfica cuando se conocen algunos parámetros de tormenta.

Usando el nomograma de la figura 4.4 es posible obtener la sobreelevación pico "Si", generada por un huracán idealizado que se mueve perpendicularmente hacia la costa con una velocidad en la dirección "x" en millas/hora. Dicho nomograma indica que existe un tamaño de tormenta crítico resultado de los radios de los máximos vientos, "R" por una caída de presión mayor que cero, el máximo pico de la sobreelevación se produce para un valor crítico de "R", y cualquier otro valor de "R" mayor o menor que este, dá como resultado valores menores de la sobreelevación.

Un segundo factor "F_s" que se da en otro nomograma toma en cuenta los efectos batimétricos a lo largo de la costa. (ver figura 4.5).

Existe un nomograma más que se refiere al factor "F_m" el cual toma en cuenta el efecto de la velocidad de la tormenta y el ángulo con el que la trayectoria de está intercepta a la costa, (ver figura 4.6).

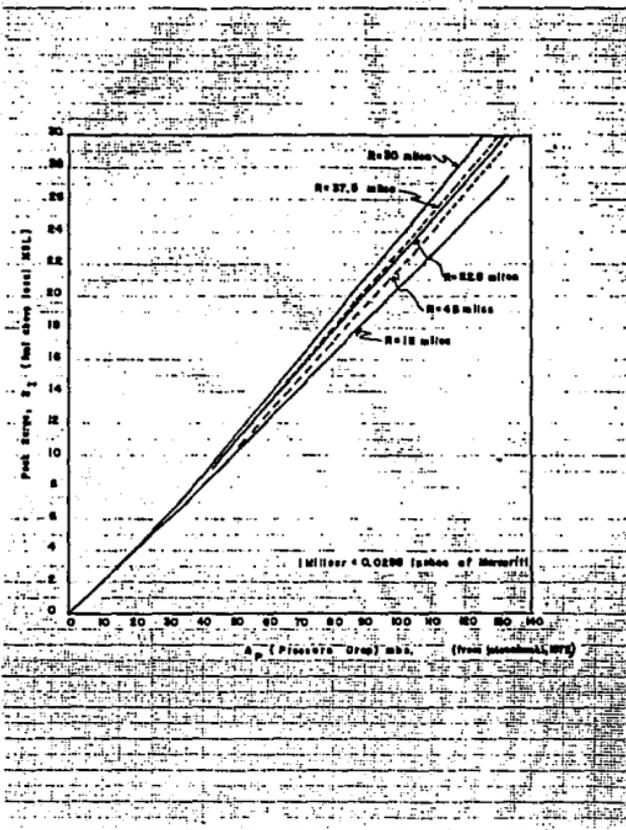


FIGURA 4.4

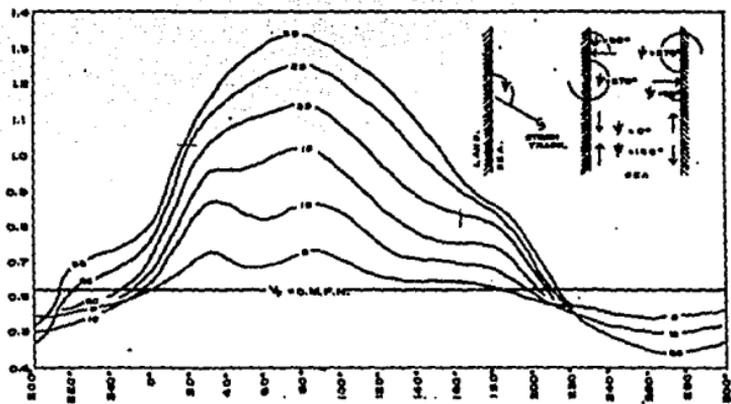


FIGURA 4. d

Pudiéndose determinar el máximo pico de la sobreelevación de la tormenta con la siguiente ecuación:

$$S_p = S_i F_s F_m$$

4.2.6 Predicción de la marea de tormenta en vasos cerrados.

Al considerar un vaso rectangular y una profundidad constante, el viento al soplar sobre su superficie presenta tres casos de deformación en su superficie libre como sigue:

Caso 1).- El abatimiento del lado del barlovento es menor.

Caso 2).- El abatimiento llega al fondo del vaso.

Caso 3).- Una porción del fondo queda expuesta.

Hellstrom (1951), propuso la siguiente ecuación para determinar la superficie libre del agua cuando sopla el viento sobre su superficie.

$$Y_z = \frac{2 \lambda J_o}{\rho u g} (x + C_1)$$

donde:

$$\lambda = 1 + \frac{F}{J_o}$$

F: Esfuerzo cortante en el fondo.

J_0 ; Esfuerzo cortante en la superficie del agua en general, se acostumbra asignar a λ los siguientes valores:

$$\lambda = 0.7 \text{ a } 2.0 \text{ para fondo liso}$$

$$\lambda = 1.0 \text{ a } 1.8 \text{ para fondo rugoso.}$$

C_1 debe obtenerse de condiciones de continuidad, y la ecuación podemos expresarla de la siguiente manera:

$$y_0 = \frac{2 \lambda J_0}{\rho \omega g} z$$

Por otra parte, la sobreelevación del lado del sotavento será:

$$h = \frac{2 \lambda J_0}{\rho \omega g} (x + C_1) - d$$

4.3 Velocidad media de la corriente de marea.

4.3.1 Generalidades.

La marea es una onda con período muy largo que se propaga con la velocidad de una onda en aguas someras, y se refleja en la costa originando una onda estacionaria.

Al producirse la marea, se generan movimientos periódicos verticales y horizontales del agua. Al movimiento horizontal se le llama corriente de marea, porque su período es grande, y ésta corriente cambia de dirección y velocidad con el período de la marea que puede ser de 12 horas 25 minutos ó 24 horas 50 minutos.

La corriente de marea cambia por la configuración Topográfica. En un estrecho, la velocidad media de la corriente de marea se puede calcular por la diferencia del nivel de la marea que se presenta entre ambos lados del estrecho, a partir de la siguiente ecuación.

$$V = \frac{1}{C_v} (2g |\eta_1 - \eta_2|)^{1/2} \quad \text{Ec. 4.20}$$

donde:

η_1, η_2 : Son los niveles de marea en ambos lados del estrecho.

C_v : Es el coeficiente de velocidad, expresado como sigue:

$$C_v = \frac{1}{\left[t_0 + f_0 + \frac{2gn^2}{R^{1/2}} \frac{1}{R} \right]^{1/2}} \quad \text{Ec. 4.21}$$

donde:

- fo: Coeficiente de pérdida en la entrada (0.5).
- to: Coeficiente de pérdida en la salida (1.0).
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning (n).
- l: Longitud del estrecho.
- R: Radio hidráulico (área / perímetro mojado).

4.3.2 Corriente de marea en la boca de una bahía o puerto.

Al producirse la marea astronómica, se origina una corriente de marea en las bocas de las bahías y de los puertos. Cuando el área de estos aprovechamientos no es muy grande y el tiempo de propagación de la marea es corto comparado con su periodo, se pueden calcular en forma aproximada la amplitud de la marea y la velocidad de la corriente de marea en la boca de la bahía o del puerto, conforme al procedimiento que a continuación se señala.

En la figura 4.7 el nivel del agua dentro de la bahía sube y baja por el efecto de la marea astronómica, debido a que su área no es muy grande. El agua entra y sale pasando por la boca de la bahía. Dependiendo de la diferencia de nivel entre esta y el mar abierto, de conformidad con la figura 4.7 la velocidad se calcula como sigue:

$$V = \frac{1}{C_v} [2g (\eta - y)]^{1/2} \quad \text{Ec. 4.22}$$

donde:

- $V > 0$ cuando $\eta > y$ (velocidad positiva)
- $V < 0$ cuando $\eta < y$ (velocidad negativa)

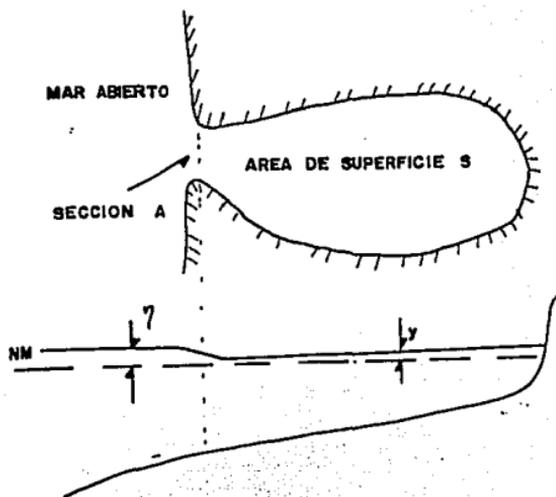


FIGURA 4.7 CORRIENTE DE MAREA EN LA BOCA DE LA BAHIA

La variación del nivel dentro de la bahía es igual a la cantidad de agua que pasa por la boca dividida entre el área de la superficie del agua en la bahía, dicha variación del nivel del agua dentro de la bahía se expresa con la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{A}{S} V = + \frac{C_v A}{S} (2g | \eta - y |)^{1/2} \quad \text{Ec. 4.23}$$

donde:

A: Área de la sección de la boca.

S: Área de la superficie del agua en la bahía.

Para encontrar un valor aproximado de dicha variación, suponemos que " η " y " y " varían senoidalmente, definiendo la amplitud de la marea exterior como " a ", y su periodo como " T ", la amplitud de la marea interior como λ y el tiempo de retraso de la marea como " τ ", se tiene la siguiente ecuación:

$$\eta = a \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} t \quad \text{Ec. 4.24}$$

$$y = \lambda \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t - \tau) \quad \text{Ec. 4.25}$$

De la ec. 4.25 se tiene:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \lambda \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} (t - \tau) \quad \text{Ec. 4.26}$$

Por otro lado sustituyendo las ec. 4.24 y 4.25 en la ec. 4.23 se obtiene:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{CvA}{S} \left[2g \left| a \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} t - \lambda \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} (t - \tau) \right| \right]^{1/2}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{CvA}{S} (2ga)^{1/2} \left[\left| \sin \frac{2\pi}{T} t - \frac{\lambda}{a} \sin \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right| \right]^{1/2}$$

Ec. 4.27

La diferencia entre los cuadrados de las ec. 4.26 y 4.27 es:

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \left\{ \lambda \left[\frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right]^2 \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \left(\frac{Cv}{S} \right)^2 2ga \left[\sin \frac{2\pi}{T} t - \frac{\lambda}{a} \sin \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right]^2 \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \left[\frac{\lambda}{a} \frac{2\pi}{T} \frac{S}{CvA} \left(\frac{a}{2g} \right)^{1/2} \cos \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right]^2 \right\}^{1/2} \\ &= \left[\sin \frac{2\pi}{T} t - \frac{\lambda}{a} \sin \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right] \left(\frac{CvA}{S} \right)^{1/2} \\ &= \left[\alpha k \cos \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right]^{1/2} \\ &= \left[\sin \frac{2\pi}{T} t - \alpha \sin \frac{2\pi}{T} (t-\tau) \right] \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.28}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{\lambda}{a} \quad , \quad k = \frac{2 \pi S}{T C v A} \left(\frac{a}{2 g} \right)^{1/2} \quad , \quad \text{Ec. 4.29}$$

Los valores de α y τ que minimizan el ángulo de fase (retrazo de la marea) $\epsilon(t)$ se pueden obtener suponiendo que $\epsilon(t) = 0$ cuando $t = \tau$ en la ec. 4.28, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\epsilon(t) = (\alpha k)^2 \left[\sin \frac{2 \pi}{T} \tau \right] = 0$$

Elevando al cuadrado la ecuación anterior, se obtiene:

$$\alpha^4 k^4 = \sin^2 \frac{2 \pi}{T} \tau \quad , \quad \text{Ec. 4.30}$$

Suponiendo que $\epsilon(t) = 0$, cuando $t = t + \frac{T}{4}$ se tiene:

$$\epsilon \left(t + \frac{T}{4} \right) = \left[\alpha k \cos \frac{2 \pi}{T} \left(t + \frac{T}{4} \right) \right]^2 +$$

$$\left[\sin \frac{2 \pi}{T} \left(t + \frac{T}{4} \right) - \alpha \sin \frac{2 \pi}{T} \frac{T}{4} \right]^2$$

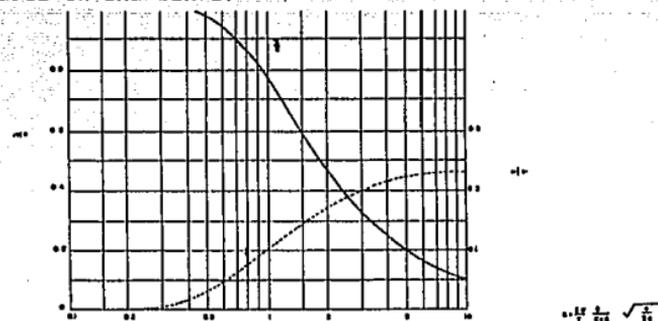
La velocidad media de la corriente que pasa por la boca usando la ec. 4.26 se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\partial y}{\partial t} = \frac{S}{A} = \frac{S}{A} \frac{2\pi}{\lambda} \cos \frac{2\pi}{T} (t-\tau)$$

La velocidad máxima ocurre cuando $t = \tau$, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{max} = \frac{S}{A} \frac{2\pi}{\lambda} \quad \dots \quad \text{Ec. 4.32}$$

En la figura 4.8 se presenta un diagrama de las ecuaciones 4.29 y 4.32, para encontrar la amplitud y el tiempo que tarda la marea en una bahía.



LA AMPLITUD Y EL TIEMPO QUE TARDA LA MAREA DENTRO DE LA BAHIA

FIGURA 4.8

5.- ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LAS MAREAS PARA UN CASO ESPECIFICO.

En este capitulo se presenta el análisis de los efectos de las mareas para el puerto de Tecolutla, Ver. Dicho sitio se seleccionó tomando como base la información disponible para la aplicación de algunos de los métodos discutidos en el capitulo anterior.

5.1 Localización de la zona de estudio.

El puerto de Tecolutla, se localiza en la desembocadura del río del mismo nombre en el Estado de Veracruz, la población se encuentra en la margen izquierda del río y está unida por carretera a la población de Gutierrez Zamora, a una distancia de 11 kms. Esta carretera se liga con la carretera 180 que une al Puerto de Veracruz con Poza Rica. El municipio de Tecolutla se extiende desde la margen izquierda del río Nautla hasta la población de Tecolutla Veracruz.

5.2 Recopilación de información de las corrientes en la desembocadura del río

La información recopilada de corrientes de marea, corresponde con las mediciones realizadas durante los días 12 y 13 de agosto de 1986 por el laboratorio de Hidráulica Marítima de la S.C.T. las cuales contemplan mediciones de la velocidad de la corriente en el río en una sección de control cerca de la desembocadura, realizando para tal efecto las siguientes actividades (referencia 5.1).

(1) Definición de la poligonal de apoyo.

Para referir las mediciones de la corriente del río

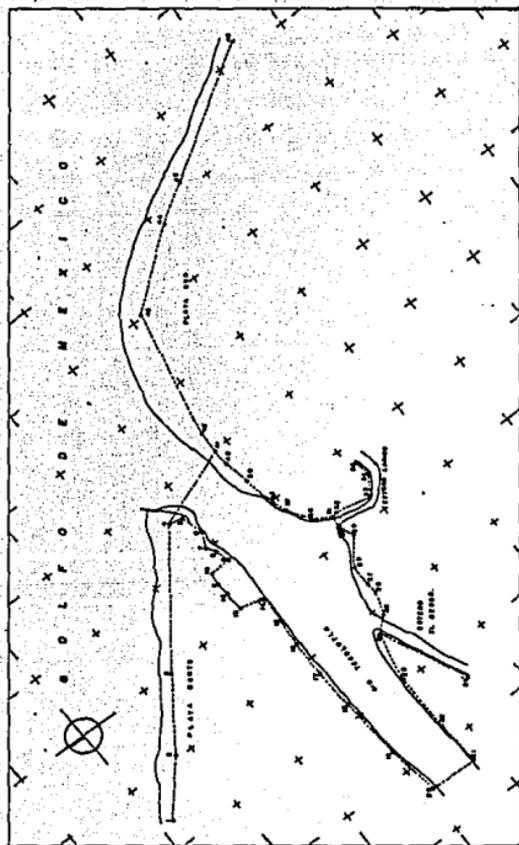


FIGURA No. 5.1

Tecolutla, se trazó una poligonal cerrada, definida a lo ancho y ambos márgenes del río, tal como se muestra en la figura 5.1.

(2) Instalación de la regla de mareas.

Con el objeto de contar con una referencia de los niveles de agua en el río, durante las mediciones de las velocidades de la corriente, se instaló una regla de mareas en la margen izquierda del río.

El cero de la regla se refirió al nivel de bajamar media tomando como base la mojonera más próxima y las tablas de predicción de mareas, publicadas por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.

Los resultados se muestran en la figura 5.2, observándose que la marea máxima tiene un valor de 0.55 m. y la marea mínima tiene un valor de 0.03 m. ambos niveles referidos al nivel de bajamar media.

(3) Medición de la corriente.

El equipo utilizado para realizar las mediciones fué un corrientómetro de tipo molinete. Para medir la dirección de la corriente se usó una cruceta cuyas características se indican en la figura 5.3, a esta cruceta se le colocó una piedra como escandallo, para que llegara a la misma profundidad de la medición de la corriente, y la dirección de la corriente se determinó por el rumbo que toma la cruceta al moverse por el efecto del movimiento del agua en el río.

A lo ancho de la sección de control en el río, se colocaron seis boyas, las cuales fueron referidas a la

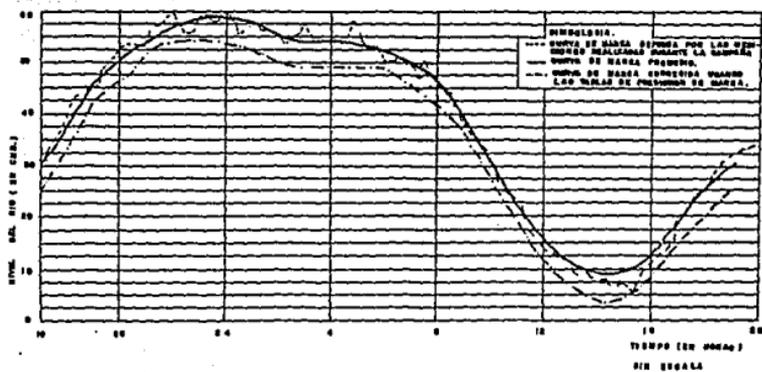


FIGURA No. 3.2 MAREOGRAMA MEDIO Y PREDECIDO

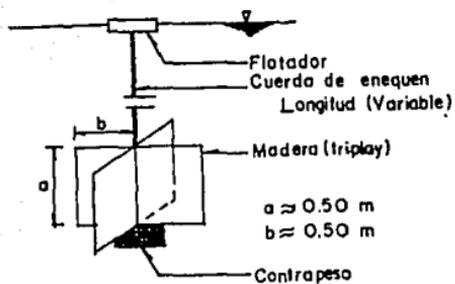


FIGURA No. 5.3 DIMENSIONES DE LA CRUCETA

poligonal de apoyo. La disposición de las boyas en la sección de control se indican en la figura 5.4. Las mediciones se realizaron en cada punto referido por las boyas antes mencionadas, a las profundidades de 0.00, -2.00, -4.00 m. con respecto al nivel del agua, durante aproximadamente un ciclo de marea. Registrando el tiempo en que se efectuó cada medición.

Las mediciones se iniciaron a las 17:36 hrs. de un día finalizando a las 18:25 hrs. del día siguiente, correspondiendo el tiempo de medición de la corriente en el río aproximadamente a 24 hrs.

(4) Datos de la medición de corrientes.

Para la representación gráfica de las mediciones de velocidad obtenidas, se usó un sistema de ejes cartesianos. Estando representado en el eje de las abscisas, el tiempo de medición en horas y en el eje de las ordenadas los datos de la velocidad de la corriente registrada en m/s.

Por conveniencia se consideraron en las gráficas antes mencionadas, velocidades negativas cuando la dirección de la corriente es en el sentido hacia aguas arriba del río y velocidades positivas cuando la dirección de la corriente es en el sentido hacia aguas abajo del río. En las figuras 5.5 a la 5.10 se indican los valores de la velocidad de la corriente en el río, obtenidas en las mediciones realizadas.

En las figuras antes mencionadas se indican tres ejes en las abscisas. El primer eje corresponde a la hora real de las mediciones. El segundo eje corresponde al tiempo de la medición en hora solar, donde la hora cero corresponde a la

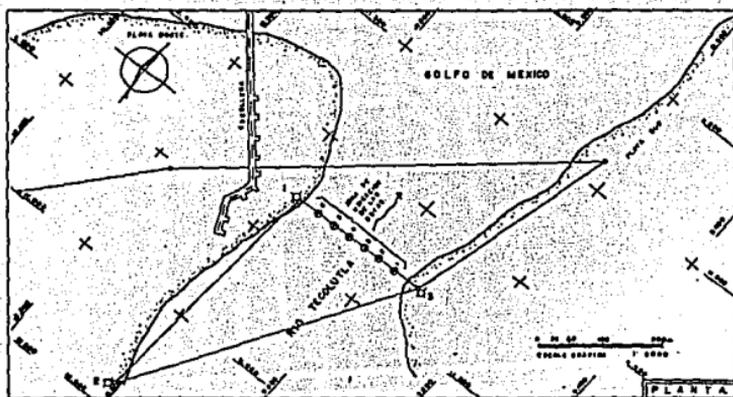


FIGURA No. 5.4 DISPOSICION DE LAS ROYAS EN LA SECCION DE CONTROL

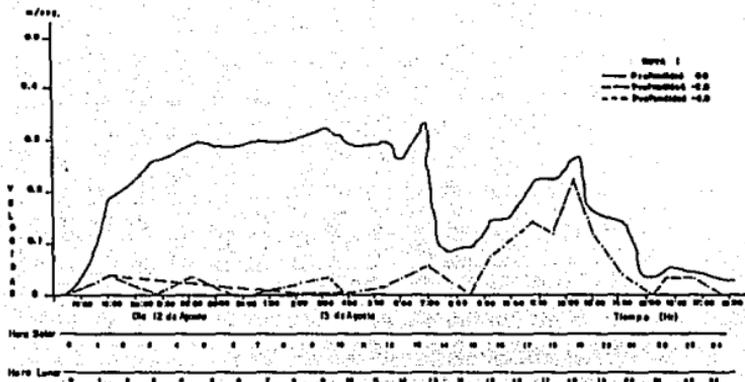


FIGURA No. 5.5 VALORES DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE OBTENIDOS EN LA BOYA 1.

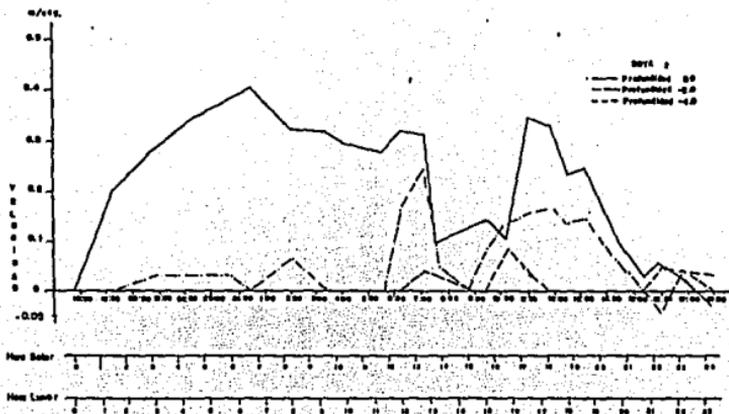


FIGURA No. 5.6 VALORES DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE OBTENIDOS EN LA BOYA 2.

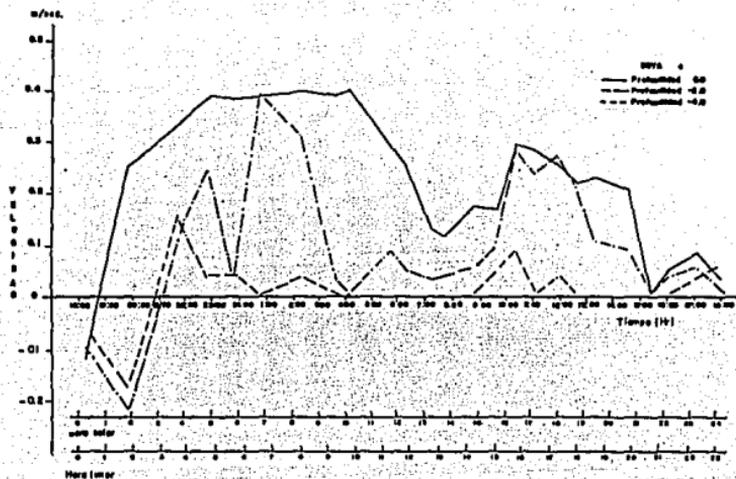


FIGURA No. 5.8 VALORES DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE OBTENIDOS EN LA BOYA 4.

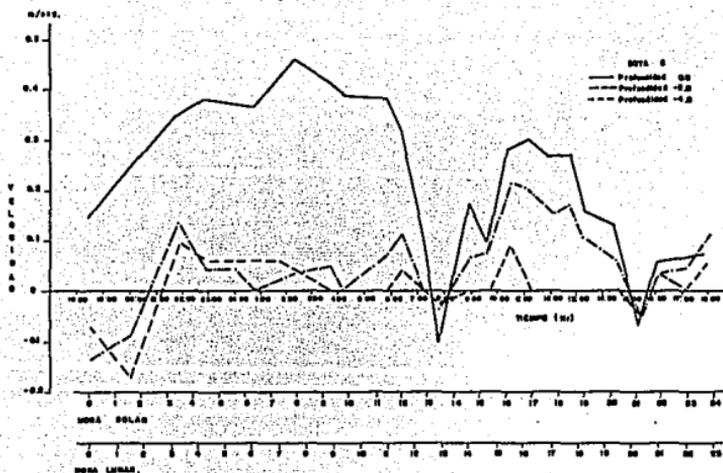


FIGURA No. 5. P VALORES DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE OBTENIDOS EN LA BOYA 5.

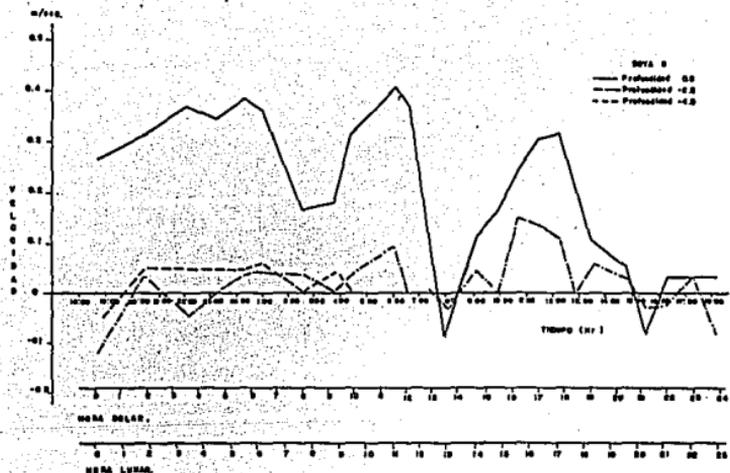


FIGURA NO. 5.10 VALORES DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE OBTENIDOS EN LA ROYA G.

primer medición de cada posición de las boyas. Y el tercer eje corresponde al tiempo de la medición transformado a hora lunar, donde la hora cero corresponde a la primer medición de cada posición de las boyas; en dichas figuras, la línea continua indica la velocidad registrada a lo largo del tiempo a la profundidad de 0.00 m. la línea con punto indica la velocidad registrada a la profundidad de -2.00 m, y la línea discontinua indica la velocidad registrada a la profundidad de -4.00 m.

(5) Análisis armónico de los datos de la velocidad de corriente.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la velocidad de la corriente de marea se puede considerar como la suma de varias componentes sinusoidales que tienen diferente amplitud y período.

Por lo tanto, una señal aleatoria puede ser representada por una serie de Fourier cuyas componentes son un múltiplo de la frecuencia fundamental $f_0 = 1/T$ (donde T es el período).

Como se dispone de un registro de las corrientes en el río, este se discretizó de acuerdo a un intervalo de tiempo seleccionado con el objeto de aplicar el método de la serie de Fourier.

Este método permite realizar el análisis armónico de la corriente en la desembocadura del río, ya que los registros de la corriente medida, satisfacen la definición de una función periódica.

El objetivo de este análisis es determinar las componentes armónicas de la corriente del río, medida en un ciclo de marea en la desembocadura.

El valor de las componentes de la corriente de marea se calculan siguiendo el procedimiento que a continuación se describe:

- a).- De las figuras 5.5 a 5.10 de datos se toman los valores de la muestra correspondiente a cada hora lunar.
 - b).- Se calculan los coeficientes A_k y B_k con la ec. 4.8.
 - c).- Se calculan la fase y la amplitud con las ec. 4.9 y 4.10
 - d).- Se calcula U_m con la ec. 4.3 después de omitir $U'(t_m)$ para comparar los valores calculados con los observados.
- (6) Análisis de resultados.

El análisis de Fourier se realizó para las profundidades de 0.0 m. y -2.0 m., los resultados del análisis se indican en las figuras 5.11 a la 5.22. los datos medidos a la profundidad -4.0 m. no se analizaron, ya que su valor fue muy pequeño.

En la parte superior de cada figura aparecen la amplitud y la fase para cada componente de la corriente; donde la amplitud $U_k(0)$ corresponde a la componente de la corriente del río, $U_k(1)$ corresponde a la componente de la marea diurna, $U_k(2)$ corresponde a la componente de la marea semidiurna. Los valores de $U_k(3)$ a $U_k(12)$ son amplitudes de

varias corrientes con período menor al de $U_k(2)$ donde el valor de $U_k(N)$ le corresponde una amplitud de marea que tienen un período de $24/N$ horas lunares. Igualmente la fase $M_k(N)$ también corresponde a las componentes anteriormente explicadas que tienen períodos de $24/N$ horas lunares.

En la parte inferior de cada figura, aparece la gráfica de los valores observados indicados con un círculo blanco y los resultados del análisis de Fourier indicados con línea continua. Del análisis de resultados se puede concluir lo siguiente:

Boya # 1.- (figuras 5.11 y 5.12). La velocidad de la corriente en la desembocadura del río es de 19.06 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 3.83 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea diurna es de 10.95 cm/seg. para la profundidad 0.0 m. y 4.52 para la profundidad -2.0 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea semidiurna es de 5.70 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 3.21 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m. La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de otras mareas es más pequeña que la diurna y semidiurna, aunque la marea con período de 8 horas lunares tiene un valor cercano al de la amplitud semidiurna.

Comparando valores de las amplitudes de las componentes de la corriente de marea, se puede observar que la amplitud es

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 19.0625
 UK(1) = 10.94960
 UK(2) = 5.70456
 UK(3) = 5.28552
 UK(4) = 1.34108
 UK(5) = 2.04184
 UK(6) = 0.38413
 UK(7) = 1.14572
 UK(8) = 0.38138
 UK(9) = 1.29811
 UK(10) = 1.10514
 UK(11) = 0.84841
 UK(12) = 0.20833

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
 MK(1) = 2.28946
 MK(2) = 3.15908
 MK(3) = 2.00817
 MK(4) = 5.34388
 MK(5) = 3.55577
 MK(6) = 3.36029
 MK(7) = 3.36134
 MK(8) = 5.04593
 MK(9) = 3.57524
 MK(10) = 2.37544
 MK(11) = 0.76327
 MK(12) = 3.14146

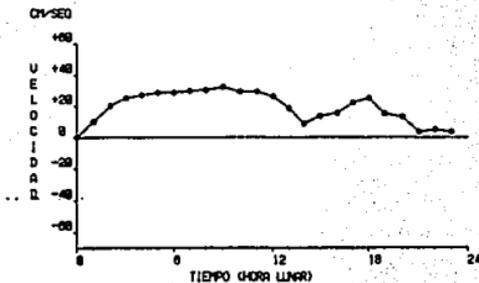


FIGURA No. 5.11 RESULTADOS DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS
 DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA
 BOYA 1, PARA LA PROFUNDIDAD DE 0.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 3.83333
 UK(1) = 4.52523
 UK(2) = 3.21653
 UK(3) = 2.30876
 UK(4) = 1.52937
 UK(5) = 1.55231
 UK(6) = 0.76925
 UK(7) = 1.19160
 UK(8) = 0.72087
 UK(9) = 0.82184
 UK(10) = 0.76099
 UK(11) = 0.73324
 UK(12) = 0.15000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
 MK(1) = 4.51319
 MK(2) = 2.77067
 MK(3) = 1.33775
 MK(4) = 6.01580
 MK(5) = 4.31178
 MK(6) = 2.26420
 MK(7) = 2.68844
 MK(8) = 1.03728
 MK(9) = 4.77342
 MK(10) = 3.10792
 MK(11) = 0.84104
 MK(12) = 3.36178

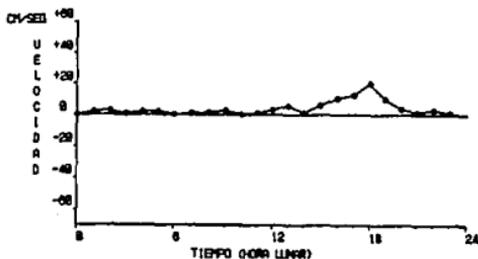


FIGURA No. 5.12 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 1, PARA LA PROFUNDIDAD -2.0 m.

mayor para la profundidad 0.0 m. que para la profundidad de -2.0 m.

Boya # 2.- (figuras 5.13 y 5.14). La velocidad de la corriente en la desembocadura del río es de 21.66 cm/seg. para la profundidad 0.0 m. y 8.50 cm/seg. para la profundidad de -2.00 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea diurna es de 12.53 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 2.95 cm/seg para la profundidad de -2.0 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea semidiurna es de 8.57 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 7.57 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

Las componentes de la corriente correspondientes a las siguientes amplitudes, son menores a medida que se incrementa "N"; lo que corresponde a una disminución del periodo.

Boya # 3.- (figuras 5.15 y 5.16). La velocidad de la corriente en la desembocadura del río para la profundidad de 0.0 m. es de 23.94 cm/seg; y para la profundidad de -2.0 m. es 8.50 cm/seg.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea diurna es 12.60 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 2.95 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 21.6667
 UK(1) = 12.53340
 UK(2) = 8.57341
 UK(3) = 5.04983
 UK(4) = 3.01125
 UK(5) = 3.02682
 UK(6) = 0.53034
 UK(7) = 1.08616
 UK(8) = 0.39747
 UK(9) = 2.15537
 UK(10) = 1.20154
 UK(11) = 1.27815
 UK(12) = 0.75000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
 MK(1) = 2.21201
 MK(2) = 2.90058
 MK(3) = 1.90249
 MK(4) = 5.65567
 MK(5) = 3.07794
 MK(6) = 2.35620
 MK(7) = 3.28284
 MK(8) = 4.76492
 MK(9) = 2.68974
 MK(10) = 6.24463
 MK(11) = 3.71554
 MK(12) = 3.14170

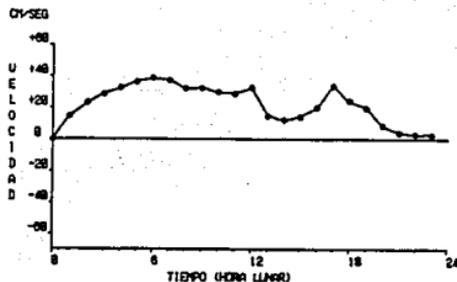


FIGURA No. 5. 19 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA COORIENTE EN LA BOYA 2, PARA LA PROFUNDIDAD 0.0 m.

AMPLITUD (m/s

UK(0) = 8.5000
UK(1) = 2.94737
UK(2) = 7.57423
UK(3) = 1.01522
UK(4) = 2.91902
UK(5) = 1.53565
UK(6) = 3.79379
UK(7) = 3.50477
UK(8) = 4.54372
UK(9) = 0.63797
UK(10) = 0.97843
UK(11) = 0.80620
UK(12) = 1.75000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
MK(1) = 3.63541
MK(2) = 3.18612
MK(3) = 3.13954
MK(4) = 5.40994
MK(5) = 5.96798
MK(6) = 6.25025
MK(7) = 1.81816
MK(8) = 3.41504
MK(9) = 3.84900
MK(10) = 4.34668
MK(11) = 0.30756
MK(12) = 8.67702

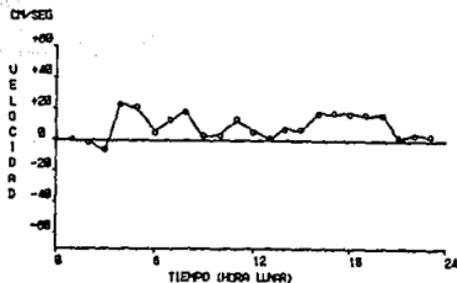


FIGURA No. 5.14 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 2, PARA LA PROFUNDIDAD DE -2.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 23.9417
UK(1) = 12.59950
UK(2) = 7.00332
UK(3) = 7.52670
UK(4) = 2.11189
UK(5) = 2.88242
UK(6) = 1.09764
UK(7) = 1.56428
UK(8) = 0.90485
UK(9) = 1.88202
UK(10) = 1.27625
UK(11) = 1.40121
UK(12) = 0.91666

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
MK(1) = 2.14096
MK(2) = 2.96885
MK(3) = 1.43703
MK(4) = 5.53078
MK(5) = 3.33064
MK(6) = 5.55155
MK(7) = 2.76317
MK(8) = 2.69644
MK(9) = 2.00248
MK(10) = 5.30040
MK(11) = 2.97182
MK(12) = 7.87819

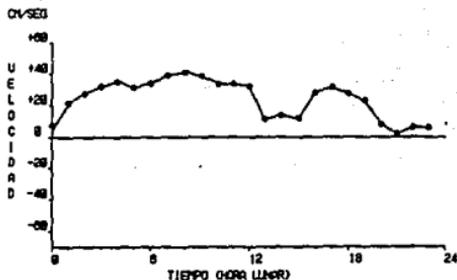


FIGURA No. 5.15 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 3, PARA LA PROFUNDIDAD DE 0.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 8.5
UK(1) = 2.94737
UK(2) = 7.57423
UK(3) = 1.01522
UK(4) = 2.91902
UK(5) = 1.53565
UK(6) = 3.79379
UK(7) = 3.50477
UK(8) = 4.54372
UK(9) = 0.63797
UK(10) = 0.97843
UK(11) = 0.80620
UK(12) = 1.75000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
MK(1) = 3.63541
MK(2) = 3.18602
MK(3) = 3.13954
MK(4) = 5.40994
MK(5) = 5.96798
MK(6) = 6.25025
MK(7) = 1.81816
MK(8) = 3.41504
MK(9) = 3.84900
MK(10) = 4.34668
MK(11) = 0.39756
MK(12) = 8.67702

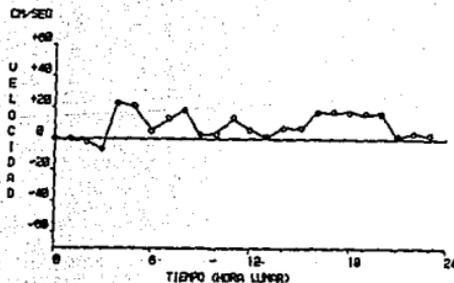


FIGURA No. 5.10 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA B, PARA LA PROFUNDIDAD DE -2.0 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea semidiurna es 7.0 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 7.57 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea con periodo de 8 horas lunares para la profundidad de 0.0 m. es 7.52 cm/seg. muy cercana a la componente correspondiente a la amplitud de la marea semidiurna y mucho menor para la profundidad -2.0 m. siendo esta de 1.01 cm/seg.

Las siguientes componentes de la corriente de marea son mucho menores tanto en la profundidad 0.0 m. como en la profundidad de -2.0 m.

Boya # 4.- (figuras 5.17 y 5.18). La velocidad de la corriente en la desembocadura del rio es de 22.13 cm/seg. para la profundidad de 0.0 m. y 8.71 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de la marea diurna es de 14.46 cm/seg. para la profundidad 0.0 m. y 7.05 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

La amplitud de la corriente correspondiente a la marea semidiurna es 10.25 cm/seg. para la profundidad 0.0 m. y 12.34 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m. siendo más pequeños los valores de la velocidad para las amplitudes con menor periodo.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 22.1375
 UK(1) = 14.46060
 UK(2) = 10.26290
 UK(3) = 4.74157
 UK(4) = 2.85572
 UK(5) = 1.59897
 UK(6) = 3.04099
 UK(7) = 2.13402
 UK(8) = 2.12148
 UK(9) = 1.76274
 UK(10) = 0.14203
 UK(11) = 0.90430
 UK(12) = 0.89166

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
 MK(1) = 2.15508
 MK(2) = 3.08456
 MK(3) = 1.98915
 MK(4) = 3.60534
 MK(5) = 3.43188
 MK(6) = 3.53536
 MK(7) = 3.12327
 MK(8) = 3.46352
 MK(9) = 2.85445
 MK(10) = 2.09003
 MK(11) = 3.75204
 MK(12) = 3.14160

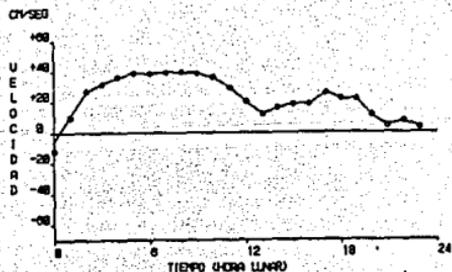


FIGURA No. 5.17 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 4, PARA LA PROFUNDIDAD 0.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 8.70833
UK(1) = 7.06039
UK(2) = 12.34280
UK(3) = 5.58867
UK(4) = 3.30086
UK(5) = 5.16812
UK(6) = 5.36707
UK(7) = 2.92238
UK(8) = 1.67282
UK(9) = 1.80131
UK(10) = 2.15936
UK(11) = 1.95924
UK(12) = 0.75000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
MK(1) = 3.16856
MK(2) = 3.23354
MK(3) = 5.32905
MK(4) = 5.06020
MK(5) = 3.53785
MK(6) = 5.16217
MK(7) = 6.23229
MK(8) = 2.00804
MK(9) = 2.53705
MK(10) = 3.47185
MK(11) = 4.79263
MK(12) = 6.28314

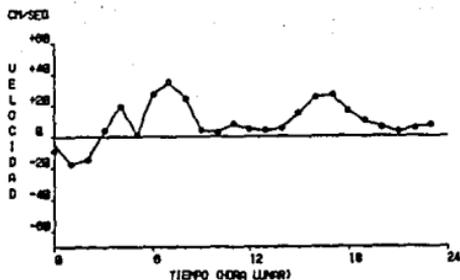


FIGURA No. 5.18 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 4, PARA LA PROFUNDIDAD DE -2.0 m.

Boya # 5.- (figuras 5.19 y 5.20). La velocidad de la corriente en la desembocadura del río para la profundidad 0.0 m. es de 23.54 cm/seg. y para la profundidad -2.0 m. es de 4.6 cm/seg.

La componente de la corriente correspondiente a la amplitud de marea diurna para la profundidad de 0.0 m. es de 15.16 cm/seg. y para la profundidad de -2.0 m. es de 5.5 cm/seg.

La amplitud de la corriente correspondiente a la marea semidiurna para la profundidad de 0.0 m. es de 7.74 cm/seg. y para la profundidad -2.0 m. es de 4.89 cm/seg.

La amplitud de la corriente correspondiente a la amplitud con periodo de 8 horas lunares para la profundidad 0.0 m. es 8.47 cm/seg. y para la profundidad -2.0 m. es de 0.71 cm/seg. como se puede observar esta amplitud es mayor que la semidiurna para la profundidad 0.0 m. y mucho mayor para la profundidad -2.0 m.

Las siguientes componentes de la corriente correspondientes a las amplitudes de mareas, son menores que la amplitud semidiurna.

Boya # 6.- (figuras 5.21 y 5.22). La velocidad de la corriente en la desembocadura del río es de 21.6 cm/seg. para al profundidad de 0.0 m. y 1.25 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

La amplitud de la corriente correspondiente a la marea diurna es 11.83 cm/seg. para la profundidad 0.0 m. y 4.75 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 23.5417
 UK(1) = 15.15960
 UK(2) = 7.74896
 UK(3) = 8.46924
 UK(4) = 4.80283
 UK(5) = 2.25463
 UK(6) = 2.64121
 UK(7) = 3.57014
 UK(8) = 1.40748
 UK(9) = 2.07876
 UK(10) = 2.78918
 UK(11) = 2.18756
 UK(12) = 1.50000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
 MK(1) = 1.88937
 MK(2) = 3.02517
 MK(3) = 0.95373
 MK(4) = 4.40848
 MK(5) = 1.87991
 MK(6) = 4.60179
 MK(7) = 1.58009
 MK(8) = 4.72726
 MK(9) = 1.27845
 MK(10) = 5.32924
 MK(11) = 2.76340
 MK(12) = 4.68633

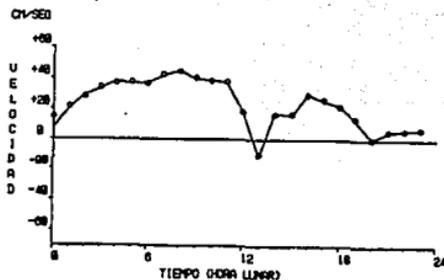


FIGURA No. 5.10 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 5, PARA LA PROFUNDIDAD 0.0 m

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 4.60417
UK(1) = 5.05827
UK(2) = 4.89103
UK(3) = 0.71440
UK(4) = 5.65969
UK(5) = 2.76344
UK(6) = 3.14272
UK(7) = 1.36927
UK(8) = 1.21693
UK(9) = 0.57746
UK(10) = 1.56391
UK(11) = 2.39918
UK(12) = 1.04167

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
MK(1) = 3.98588
MK(2) = 2.78018
MK(3) = 1.11117
MK(4) = 4.25900
MK(5) = 3.92580
MK(6) = 4.60616
MK(7) = 3.41961
MK(8) = 4.30773
MK(9) = 3.33333
MK(10) = 4.04622
MK(11) = 2.97714
MK(12) = 3.14166

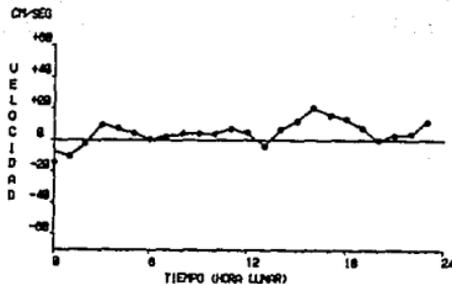


FIGURA No. 5.20 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 5, PARA LA PROFUNDIDAD DE -2.0 m.

AMPLITUD (cm/s)

UK(0) = 21.6667

UK(1) = 11.83520

UK(2) = 8.16024

UK(3) = 7.10563

UK(4) = 7.30064

UK(5) = 4.84780

UK(6) = 0.50685

UK(7) = 1.45597

UK(8) = 0.96106

UK(9) = 2.34300

UK(10) = 1.37951

UK(11) = 0.86146

UK(12) = 0.33333

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0

MK(1) = 1.85513

MK(2) = 1.69406

MK(3) = 1.45959

MK(4) = 5.18657

MK(5) = 1.68867

MK(6) = 3.30687

MK(7) = 0.66409

MK(8) = 0.07512

MK(9) = 0.94211

MK(10) = 6.24210

MK(11) = 5.44616

MK(12) = 6.28282

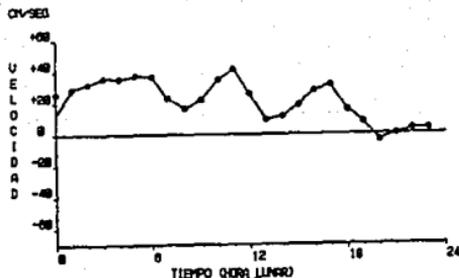


FIGURA No. 5. 21 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 6, PARA LA PROFUNDIDAD DE 0.0 m.

AMPLITUD (Cm/s)

UK(0) = 1.25
 UK(1) = 4.75154
 UK(2) = 3.35961
 UK(3) = 1.00924
 UK(4) = 2.20202
 UK(5) = 2.61351
 UK(6) = 1.34631
 UK(7) = 0.82252
 UK(8) = 2.03237
 UK(9) = 2.09224
 UK(10) = 0.21562
 UK(11) = 0.38114
 UK(12) = 0.50000

FASE (RADIAN)

MK(0) = 0
 MK(1) = 3.43954
 MK(2) = 3.01023
 MK(3) = 1.04436
 MK(4) = 4.30377
 MK(5) = 2.26027
 MK(6) = 3.52210
 MK(7) = 2.73381
 MK(8) = 2.96314
 MK(9) = 1.20794
 MK(10) = 5.97722
 MK(11) = 1.67695
 MK(12) = 4.00985

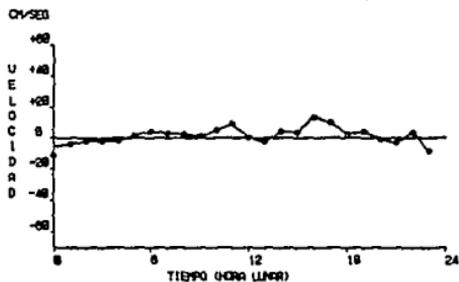


FIGURA NO. 5.22 RESULTADO DEL ANALISIS DE FOURIER DE LOS DATOS DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN LA BOYA 4, PARA LA PROFUNDIDAD DE -2.0 m.

La amplitud de la corriente correspondiente a la marea semidiurna es de 8.16 cm/seg. para la profundidad 0.0 m. y 3.36 cm/seg. para la profundidad de -2.0 m.

En la tabla 5.1, se muestran los valores de la corriente propia del río y las amplitudes de las componentes de la corriente de marea diurna y semidiurna, que se explicaron anteriormente.

NUMERO DE BOYA	PROF. (m)	CORRIENTE PROPIA DEL RIO (cm/seg.)	AMPLITUD DE LA MAREA CORRESPONDIENTE A LA MAREA DIURNA (cm/seg)	AMPLITUD DE LA MAREA CORRESPONDIENTE A LA MAREA SEMIDIURNA (cm/seg)
1	0.0	19.0625	10.9486	5.7045
	-2.0	3.8333	4.5252	3.2165
2	0.0	21.6667	12.5334	8.5741
	-2.0	8.5000	2.9473	7.5742
3	0.0	23.9417	12.5995	7.0033
	-2.0	8.5000	2.9473	7.5742
4	0.0	22.1375	14.4606	10.2629
	-2.0	8.7083	7.0603	12.3428
5	0.0	23.5417	15.1596	7.7489
	-2.0	4.6041	5.0582	4.8910
6	0.0	21.6667	11.8352	8.1602
	-2.0	1.2500	4.7515	3.3596

TABLA 5.1

5.3 Cálculo del prisma de marea.

El prisma de marea se define como el volumen de agua de mar introducido en el río por su boca durante el tiempo que transcurre de un bajamar al siguiente bajamar de la marea tipo. El prisma de marea se calcula como el producto de la altura de marea y el área influida por la marea, con respecto al nivel medio de marea. Para el caso en estudio el prisma de marea no pudo determinarse siguiendo este procedimiento. Calculándose como el volumen de agua de mar que pasa por la sección transversal de la boca del río.

Para el caso en estudio, como se puede ver en la figura 5.2 el tipo de marea es diurno, definido este como aquel en el que se presenta un bajamar y un pleamar por ciclo de marea. Por lo tanto, el prisma de marea se calculó por la componente de la corriente diurna determinada anteriormente.

La corriente diurna está expresada por medio de la siguiente ecuación:

$$V = U_i \cos \left(\frac{2}{T} t - \mu_i \right) \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

- U_i Amplitud (cm)
- μ_i Fase (radian)
- t tiempo (hora lunar)
- T período de marea (24 hora lunar)

El cálculo del prisma de marea se realizó siguiendo los pasos que a continuación se enumeran:

1.- La sección transversal del río obtenida en la campaña de mediciones, se dividió a lo ancho en seis franjas, correspondiendo cada una de estas a los puntos en los que se localizaron las boyas para la medición de la corriente.

2.- Cada franja de la sección transversal del río, se dividió en dos partes: Una de la superficie a la profundidad -2.00 m y la otra de la profundidad -2.00 m a la profundidad -4.00 m como se indica en la figura 5.23.

3.- Para cada parte de las seis franjas, se calculó el gasto usando la siguiente ecuación:

$$Q = V A \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde:

Q: Gasto correspondiente a cada parte de la franja en estudio en m^3/s .

V: Velocidad correspondiente a cada parte de la en estudio en m/s, calculada con la ecuación 5.1.

A: Area correspondiente a cada parte de la franja en estudio en m^2 .

Es importante mencionar, que para cada una de las franjas analizadas, al valor del área calculada para la parte superficial, se le sumó una área tributaria resultante de la variación de la marea medida durante la campaña. En el cálculo de las áreas, velocidades y gastos de cada una de las partes de las franjas, se usó la notación que a continuación se define:

A_{10} , A_{20} , A_{30} , - - - A_{60} representan las áreas de

la parte superior de cada una de las franjas, donde los subíndices indican el número de franja y la parte superior correspondiente.

4.- Los gastos para cada hora lunar que pasan por cada parte de las franjas, se calculan usando las ecuaciones 5.1 y 5.2. por ejemplo para el gasto durante las 1:30 y las 2:30 hs. correspondiente a la parte superior de la franja 1 se calculó como sigue:

$$Q_{10} = A_{10} V_{10}$$

$$Q_{10} = A_{10} U_1 \cos \left(\frac{2}{T} t - \mu_1 \right)$$

Para la profundidad 0.00 m en la boya 1 se tiene:

$$U_1 = 10.94 \text{ cm/s. (obtenida de la figura 5.11)}$$

$$\mu_1 = 2.23 \text{ radian (obtenida de la figura 5.11)}$$

$$\text{Variación de marea} = 40.27 \text{ cm.}$$

$$T = 24 \text{ hora lunar.}$$

$$A_{10} = 805 \text{ 000 cm}^2$$

$$Q_{10} = 881 \text{ 442.8 cm}^3/\text{seg.}$$

5.- Los gastos que pasan por la sección de control durante cada hora, se calculan como la suma de los gastos

de cada parte durante una hora, tal y como se señaló arriba.

Los resultados de los gastos de la sección de control, se indican para cada hora en la parte superior de la tabla No. 5.2, donde la primera columna indica el tiempo, la segunda columna la variación de marea, la tercera columna los gastos de la sección y la cuarta columna el volumen de agua de mar que pasa por la sección durante cada hora lunar.

Los volúmenes para cada tiempo se graficaron en la figura No. 5.24, donde el signo menos indica el volumen de agua que sale por la boca del río y el signo más indica el volumen de agua que entra por la boca de río.

6.- El prisma de marea se calculó como la suma de los volúmenes con signo más. Por lo que en el presente trabajo el prisma de marea tiene un valor de $1230,326 \times 10^{-9} \text{ m}^3$.

El valor calculado del prisma de marea es aproximado, debido a que la corriente de marea observada está compuesta de otras componentes diferentes a las de la componente diurna, pudiendo considerarse que las componentes diferentes a la componente diurna incluyen muchos errores de medición. Por lo anterior en este trabajo el valor aproximado del prisma se calculó usando solo la componente diurna, pues como se mencionó anteriormente, la componente predominante de marea es del tipo diurno.

TIEMPO HORA LUNAR	VARIACION DE LA MAREA cm.	GASTO $\frac{M^3}{SEG}$	VOLUMEN $M^3 (10^3)$
0	25.00	-30.5562	-110.002
1	32.80	-24.3434	-87.636
2	40.27	-15.3610	-55.299
3	46.25	-4.3417	-15.630
4	52.40	7.8547	28.277
5	52.00	18.9547	68.237
6	53.80	29.2738	105.386
7	53.26	37.0762	133.474
8	51.08	41.8604	150.386
9	49.36	43.9238	158.126
10	48.78	43.3451	156.042
11	48.59	39.9348	143.765
12	48.86	33.8877	121.996
13	46.62	25.3186	91.147
14	42.70	15.3525	55.268
15	38.07	4.9755	17.911
16	28.19	-4.3211	-15.556
17	19.06	-12.2346	-44.044
18	12.02	-18.9032	-68.051
19	7.00	-24.3366	-87.611
20	3.50	-28.3599	-102.096
21	3.94	-31.5194	-113.470
22	7.48	-33.2615	-119.742
23	13.16	-32.8974	-118.431
24	19.88	-29.8466	-107.448

TABLA No. 5.2 VARIACION DEL PRISMA DE MAREA EN EL TIEMPO

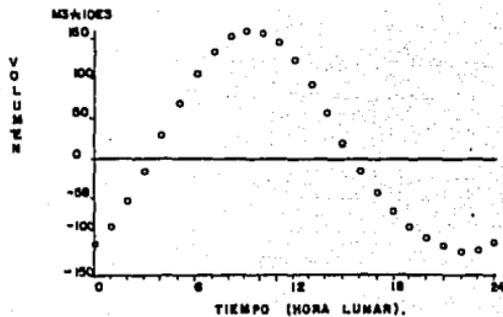


FIGURA No. 5.24 GRAFICA DE LOS VOLUMENES DE AGUA QUE ENTRAN Y SALEN POR LA BOCA DEL RIO.

5.4 Cálculo de la sobreelevación por tormenta.

Para obtener la sobreelevación de tormenta en el sitio de estudio, se utilizó el método del nomograma de Jalesniansky.

El procedimiento para la aplicación del método consiste en lo siguiente:

- a).- Con el nomograma de la figura 4.4 se obtiene una sobreelevación inicial " S_1 ", que esta en función de la diferencia de presiones (entre la presión en el ojo del huracán y la presión atmosférica normal), y el radio de los máximos vientos.
- b).- Con la figura 4.5 se obtiene el factor de fondo " F_s ", el cual toma en cuenta los efectos batimétricos a lo largo de la costa, para el sitio de estudio en todas las tormentas este factor es el mismo por tratarse siempre del mismo lugar y es igual a 0.65.
- c).- Mediante la figura 4.6 se obtiene el factor " F_m ", entrando con la velocidad de desplazamiento del huracán (V_r) y tomando en cuenta el ángulo definido por la línea de costa y la trayectoria del huracán (ψ), este factor es diferente para cada tormenta.

d).- La sobreelevación inicial es afectada por los coeficientes "Fm" y "Fs" para obtener la sobreelevación total. El máximo pico de la sobreelevación provocado por la tormenta esta dado como sigue:

$$S_p = S_i \cdot F_s \cdot F_m$$

Para aplicar el procedimiento descrito anteriormente, se consideraron los datos de las tormentas ocurridas en los últimos años en el Puerto de Tecolutia, Ver. (ref. 5.2).

La información de las tormentas consideradas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.3 donde se puede apreciar que las sobreelevaciones originadas por las tormentas analizadas fueron en promedio de 2.27 m, obteniéndose una sobreelevación máxima de 5.00 m y una sobreelevación mínima de 0.38 m.

CALCULO DE LA SOBREELEVACION POR TORMENTA

CICLON	Po mb	Vr Km/h	R Km	ΔP mb	Vr mi/h	R mi	ψ	Fm	Sp m
CAMILLE	910	30.0	48.25	103.3	18.64	29.98	94	1.06	5.00
ALICIA	966	7.4	42.99	47.3	4.59	26.71	53	0.66	1.37
EDUARD	998	5.0	62.46	15.3	3.10	38.82	124	0.64	0.38
DELIA	990	20.0	75.93	23.3	12.43	47.19	78	0.92	0.91
ALLEN	910	22.0	49.97	103.0	13.67	31.05	65	0.93	4.42
EILIA	960	18.0	52.95	53.0	11.18	32.91	91	0.88	2.00
INEZ	930	16.0	53.39	83.0	9.94	33.18	73	0.85	3.03
ALBERTO	974	18.5	53.24	39.0	11.49	33.08	112	0.82	1.38
HENRI	990	16.0	63.01	23.0	9.94	39.16	129	0.72	0.71
AGNES	985	20.0	51.01	28.0	12.43	31.70	101	0.87	1.03
ANITA	60	15.0	49.61	53.0	9.32	30.83	56	0.80	1.90
FERM	900	16.0	41.60	113.0	9.94	25.85	59	0.82	3.98
HILDA	960	15.0	50.77	53.0	9.32	31.55	98	0.82	1.78
CARLA	925	12.0	42.52	88.0	7.45	26.42	56	0.76	2.94
DEBBIE	985	15.0	54.02	28.0	9.32	33.57	91	0.83	0.98
CARMEN	950	25.0	47.34	63.0	15.53	29.42	84	1.02	2.72
CAROLINE	950	19.0	53.37	63.0	11.80	33.19	61	0.90	2.37
BEAULAH	900	15.0	49.11	113.0	9.32	30.52	47	0.80	3.96

TARLA 5.3

5.5 Cálculo de las velocidades de la corriente de marea

5.5.1 Cálculo de la velocidad media de la corriente de marea.

En virtud de que no se cuenta con datos para calcular la velocidad media en el sitio de estudio, en este inciso se presenta a manera de ejemplo, el cálculo de la velocidad media de la corriente de marea en una bahía con una superficie libre de agua de 10 km^2 que se conecta al mar con un canal de 5 m de profundidad, 100 m de ancho y 500 m de longitud. El ejemplo se desarrollará utilizando los datos indicados en la figura 5.25 los cuales corresponden con los mareagramas del interior de la bahía y de la zona exterior de esta (en el mar), para los días 11 y 12 de diciembre de 1984.

(1) Cálculo del coeficiente de velocidad.

Datos:

$$\begin{aligned} f_a &= 0.5 \\ t_o &= 1.0 \\ n &= 0.03 \\ l &= 500 \text{ m} \\ g &= 9.81 \text{ m/seg}^2 \\ R &= R/P_m = 4.54 \text{ m} \end{aligned}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación 4.21 se obtiene lo siguiente:

$$C_v = \frac{1}{\left[1 + 0.5 + 2(9.81)(0.03)^2 / (4.54)^{1/3} (500/4.54) \right]^{1/2}}$$

$$C_v = 0.67 \text{ m/seg}$$

(2) Cálculo de la velocidad media.

Datos:

$$C_v = 0.67 \text{ m/seg}$$

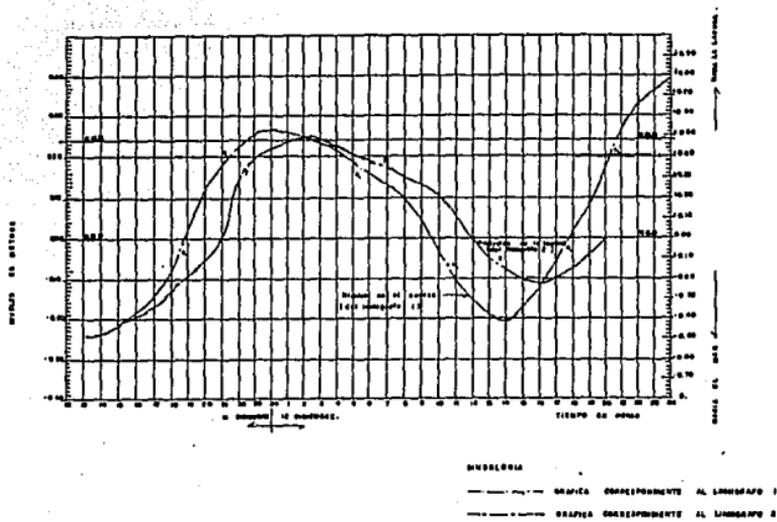


FIGURA 5.25

$$\eta = -0.08 \text{ m (obtenida en la figura 5.25)}$$

$$Y = -0.13 \text{ m (obtenida en la figura 5.25)}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación 4.28 se obtiene lo siguiente:

$$V = \pm C_v [2g |\eta - y|]^{1/2}$$

$$V = \pm 0.67 [2(9.81) |-0.08 - (-0.13)|]^{1/2}$$

$\eta < y$ por lo tanto la velocidad es negativa

$$V = -0.663 \text{ m/seg.}$$

Al aplicar la ecuación 4.28 para diferentes horas de los mareogramas indicados en la figura 5.25, se obtiene lo siguiente:

FECHA	HORA	η (m)	Y (m)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)
11-DIC-1984	14:00	-0.24	-0.24	0.000
	18:00	-0.08	-0.13	-0.663
	24:00	0.27	0.22	+0.663
12-DIC-1984	2:00	0.25	0.25	0.000
	8:00	0.10	0.16	-0.726
	14:00	-0.21	-0.09	+1.028
	16:00	-0.12	-0.12	0.000

TABLA 5.4 VELOCIDAD MEDIA DE LA CORRIENTE DE MAREA

5.5.2 Cálculo de la velocidad máxima de la corriente de marea.

La velocidad máxima "V_{máx}" de la corriente de marea, se calcula con la ecuación 4.32 conforme a la siguiente metodología

- (1) Del mareograma de la figura 5.25 se obtiene el valor de "λ" (amplitud de la marea interior) y "T" (período),
- (2) Con los datos que se presentan y la ecuación 4.32 se calcula V_{máx}. de la siguiente manera.

Datos:

$$S = 10^7$$

$$A = 500 \text{ m}^2$$

$$\lambda = 0.37 \text{ (obtenido de la figura 5.25 entre las 14:00 y las 18:00)}$$

$$T = 4:00 \text{ (obtenido de la figura 5.25)}$$

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación 4.32 se obtiene:

$$V_{\text{máx}} = \frac{S}{A} \lambda \frac{2\pi}{T}$$

$$V_{\text{máx}} = \frac{10^7}{500} (0.10) \frac{2(3.141592)}{(4.0)(60)(60)}$$

$$V_{\text{máx}} = 0.87 \text{ m/seg}$$

Al aplicar la metodología anterior para diferentes horas de los días 11 y 12 de diciembre de 1984, se obtiene la siguiente tabla (5.5):

FECHA	HORA INICIAL	HORA FINAL	T (hrs.)	λ M	Vmáx. m/s
11-DIC.-84	14:00	18:00	4	0.10	0.87
	18:00	24:00	6	0.35	2.04
12-DIC.-84	0:00	2:00	2	0.03	0.52
	2:00	8:00	6	0.09	0.52
	8:00	14:00	6	0.24	1.40
	14:00	18:00	4	0.01	0.09

TABLA 5.5

6. DISCUSIONES DE RESULTADOS

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos al aplicar los métodos de cálculo discutidos en capítulos anteriores, destacando lo siguiente:

6.1 Del análisis armónico de los datos de la velocidad de la corriente, se tiene:

- 1.- A la profundidad de 0.0 m. la corriente propia del río es mayor que los valores correspondientes a las amplitudes de marea en todos los puntos observados a la profundidad -2.00 m. Los valores de la corriente propia del río que corresponden a la profundidad 0.00 m. casi no presentan diferencias.
- 2.- La amplitud de marea diurna para la profundidad 0.00 m. es mayor que para la profundidad -2.00 m. en todos los puntos, pero la amplitud de marea semidiurna no siempre es mayor en la profundidad 0.00 m.
- 3.- Los resultados obtenidos indican que la componente de marea diurna predomina, lo anterior debido a la variación de mareas indicadas en la figura 5.2 en donde se observa que la marea diurna es predominante.

Por lo anteriormente explicado se puede concluir, que la corriente del río y la corriente de marea son mayores cuando están cerca de la superficie del agua. Además de que la

marea diurna predomina en las componentes de marea y el valor de la corriente propia del río es casi igual a la suma de amplitudes diurna y semidiurna.

El análisis armónico realizado, muestra que la aplicación del método de series de Fourier a los datos de la corriente en la desembocadura del río, satisfacen la definición de una función periódica, es decir, que la velocidad de la corriente de marea se considera como la suma de varias componentes sinusoidales que tienen diferente amplitud y período.

Como las mediciones se realizaron para dos días únicamente es posible que el análisis de la marea pudiera tener algunos efectos secundarios (marea de tormenta, oleaje o errores mecánicos en los instrumentos de medición).

Por lo tanto, el método aplicado de las series de Fourier es el más conveniente y usado en la actualidad para conocer las componentes armónicas de la corriente de marea.

6.2 Del cálculo del prisma de marea se destaca lo siguiente:

El gasto que pasa por la sección de control es mayor para la profundidad de 0.0 m a -2.0 m que para la profundidad de -2.0 m a -4.0 m debido a que el área y la velocidad de la corriente de marea de la parte superior es mayor que en la parte inferior.

El mayor gasto que pasa por la sección de control, se

presenta más o menos al mismo tiempo en que se presenta la pleamar de la marea, para el caso de estudio la marea es del tipo diurno.

El prisma de marea se calcula como la suma de los volúmenes con signo más, debido a que es cuando el agua del mar empieza a fluir por la sección de control hacia el río. En ese momento comienza a aumentar el volumen de agua en el río gradualmente de acuerdo con el ascenso de la marea.

Al descender la marea el agua comienza a salir por la misma sección de control. En ese momento ya no hay flujo de agua hacia el río, y es cuando la suma de los volúmenes con signo más acumulados alcanza el valor del prisma de marea.

El procedimiento utilizado para calcular el prisma de marea permite determinar un valor con bastante aproximación de dicho prisma. Ya que para obtener un valor más exacto del prisma de marea, se requeriría calcular el producto de la altura de marea por la superficie influida por la marea, y cada vez que este último método no es aplicable al río Tecolutla por no conocer la superficie influida por la marea, se puede considerar que el método aplicado satisface totalmente los requerimientos para conocer el prisma de marea, ya que el valor del prisma de marea nos da una idea de cuanto volumen de agua se mueve del mar hacia el río o viceversa en un ciclo de marea, que es lo que finalmente se desea conocer.

6.3 Del cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta.

Las sobreelevaciones causadas por las tormentas analizadas fueron en promedio 2.27 m obteniéndose una sobreelevación máxima de 5.0 m y una sobreelevación mínima de 0.38 m. Podemos observar que mientras la diferencia de presiones (Δp), entre el ojo del huracán (P_c) y la del lugar (P_n), es grande la sobreelevación por tormenta (S_r) será grande.

Para el sitio de estudio $P_n = 1013.3$ mb porque siempre se trata del mismo lugar, lo que cambia son las características de cada una de las tormentas ocurridas.

Otro aspecto que influye para que la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta sea elevada, es el ángulo con que esta intercepta a la costa. Si está interceptación se realiza en forma casi perpendicular a la línea de costa la sobreelevación por tormenta será mayor.

El método del nomograma de Jalesniansky permite obtener en primera aproximación el valor de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta sin necesidad de realizar muchos cálculos laboriosos. Si se desea tener una mayor exactitud en el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta se recomienda usar cualquiera de los procedimientos descritos anteriormente.

6.4 Del cálculo de las velocidades de la corriente de marea.

Existen velocidades desde 0.0 m/s debido a que en ese instante los niveles dentro de la bahía y en el mar abierto son iguales y por lo tanto, no existe flujo (ni reflujos).

Las velocidades negativas se presentan cuando $\eta > Y$ o sea que el nivel de la marea dentro de la bahía es mayor que el nivel del mar abierto.

Las velocidades positivas se dan cuando el nivel del mar es mayor que el nivel dentro de la bahía $\eta > Y$ y se presenta un flujo de agua con dirección hacia la bahía.

Podemos observar que las velocidades máximas de la corriente de marea se presentan cuando la amplitud de la marea es grande, en nuestro ejemplo se calcularon velocidades máximas para diferentes periodos y diferentes amplitudes de marea. Podemos ver en la tabla 5.5 que la velocidad máxima de la corriente de marea calculada para un mismo periodo pero diferente amplitud de marea es diferente. Las velocidades máximas se presentan en flujo y en reflujó, es decir, cuando la corriente de marea es positiva (hacia aguas arriba del río) y negativa (hacia el mar), respectivamente.

La velocidad máxima de la corriente de marea entre las 18:00 h y las 24:00 h del 11-dic-1984 con periodo $T=6h$ y amplitud de marea interior $\lambda=0.35m$ es mayor que la velocidad máxima de la corriente de marea entre las 8:00h y las 14:00 del 12-dic-1984 con periodo $T=6h$ y amplitud de marea interior $\lambda=0.24m$, observandose que el periodo "T" es el mismo en ambos casos, solo varía la amplitud de la marea interna " λ ". La velocidad máxima será mayor cuanto mayor sea la amplitud de la marea interna.

El procedimiento aplicado en el cálculo de las velocidades de la corriente de marea, es muy adecuado y práctico, debido a que toma en cuenta; factores de pérdida a la entrada y

salida de la bahía o estrecho, configuración Topográfica (rugosidad) y superficies (de la boca o sección transversal y la superficie libre del agua) y permite obtener mediante su aplicación, en forma rápida y sencilla, los valores de las velocidades medias y máximas de las corrientes de mareas.

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos en el curso del presente trabajo se pueden extraerse las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1.- Las metodologías aquí presentadas para realizar estudios de la marea astronómica y de tormenta, así como para determinar las velocidades media y máxima de la corriente de marea, tienen la ventaja de tener una secuencia lógica, que permite su fácil aplicación en problemas de Ingeniería Portuaria y Costera.

2.- Los métodos para la medición de las corrientes de marea en el campo y para el análisis de datos presentados en este trabajo, pueden servir de base para otros estudios tales como:

- a) Hidrodinámica Marina (estudio de los niveles y corrientes de marea en un aprovechamiento costero).
- b) Transporte de contaminantes en zonas lagunareas y estuarinas.
- c) Ecología Marina (migraciones).
- d) Alteraciones de las condiciones fisicoquímicas (DQO, DBO, etc.).
- e) Estabilidad de accesos de estuarios y lagunas litorales.

D) Transporte de sedimentos.

E) Erosión del fondo en lagunas costeras.

3. Durante la aplicación de los métodos utilizados para evaluar los efectos de la marea astronómica y de tormenta, se estableció plenamente la necesidad de contar con información de campo amplia y suficiente para la evaluación de dichos efectos.

4.- Los métodos para evaluar los efectos de la marea (niveles del mar por marea astronómica y de tormenta y velocidades de la corriente de marea) al aplicarse en problemas reales, deberán considerarse con reserva, ya que los resultados obtenidos de su aplicación, proporcionarán valores estimativos que servirán de base únicamente para la formulación de ante proyectos y estudios preliminares.

5.- El estudio detallado de los efectos de las mareas astronómica y de tormenta, se deberá realizar con metodologías semejantes a las presentadas en este trabajo, complementadolas con la aplicación de modelos numéricos capaces de simular los principales factores que influyen en dichos fenómenos, pudiendose utilizar también los modelos hidráulicos para el estudio de algunos de los fenómenos de la marea astronómica (corrientes de marea principalmente) o de algunos fenómenos asociados con esta (difusión marina, estabilidad de accesos costeros, etc.).

En el estudio realizado para el Puerto de Tecolutla Ver. se utilizó el método de las series de Fourier para el análisis de la corriente de marea.

La sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta se determinó con el método del nomograma de Jalesniansky, el resultado obtenido es correcto y confiable debido a que se tiene un gran número de datos de tormentas ocurridas en los últimos años en el Puerto de Tecolutla.

El ejemplo presentado para calcular las velocidades media y máxima permitió mostrar que el método utilizado, es de fácil aplicación y bastante práctico.

En el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por marea de tormenta se recomienda, contar cuando menos con los datos de las tormentas más severas ocurridas en la zona de estudio.

BIBLIOGRAFIA

ARMANDO FRIAS. GONZALO MORENO. "INGENIERIA DE COSTAS".
EDIT. LIMUSA. 1988.

ING. JUAN FRANCISCO GRIVEL. "CORRIENTES OBSERVADAS DE
MAREA Y RESIDUAL EN EL GOLFO DE CALIFORNIA".
EDIT. CICESE. 1991.

Dr. SHOJI SATO. "CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS ONDAS
PROGRESIVAS REGULARES". JICA VOL. 1. 1985.

Dr. SHOJI SATO. ING. ROLANDO MADRID MONTES DE OCA.
"ANALISIS DE DATOS DE CAMPO". JICA, 1993.

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES ELECTRICAS. "MANUAL DE DISEÑO DE
OBRAS CIVILES". HIDROTECNIA. A. 2.13. HIDRAULICA
MARITIMA.

U. S. ARMY. COASTAL ENGINEERING. DEPARTMENT OF THE
ARMY. CORPS OFF ENGINEERS. "SHORE PROTECTION
MANUAL". VOL. II. 1977.

CONSULTORIA TECNICA. S.C.. "ESTUDIOS FISICOS
EXPERIMENTALES DE LA DESEMBOCADURA DEL RIO
TECOLUTLA. VERACRUZ". OCTUBRE DE 1984.

ING. JOSE MIGUEL MONTOYA RODRIGUEZ. ING. MA. DEL ROCIO
GARCIA SANCHEZ. "MEDICION DE LAS CARACTERISTICAS
HIDRAULICAS EN EL PUERTO DE TECOLUTLA VERACRUZ".
CORRIENTES DE MAREA EN LA BOCA DEL RIO. SEGUNDO
REPORTE. OCTUBRE DE 1987.

R E F E R E N C I A S

- 4.1 ARMANDO FRIAS. GONZALO MORENO. "INGENIERIA DE
COSTAS" EDIT. LIMUSA. 1988.
- 5.1 ING. JOSE MIGUEL MONTOYA RODRIGUEZ. ING. MA. DEL
ROCIO GARCIA SANCHEZ. "MEDICION DE LAS
CARACTERISTICAS HIDRAULICAS EN EL PUERTO DE
TECOLUTLA VERACRUZ. CORRIENTES DE MAREA EN LA BOCA
DEL RIO. SEGUNDO REPORTE. OCTUBRE DE 1987.
- 5.2 CONSULTORIA TECNICA S.C. "ESTUDIOS FISICOS
EXPERIMENTALES DE LA DESEMBOCADURA DEL RIO
TECOLUTLA VERACRUZ". OCTUBRE DE 1984.