



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

28
36

**"ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO
DE LA BAHIA DE TOBARI, SONORA."**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA

México, D. F.,

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pág.
CAPITULO I.	INTRODUCCION. 1
CAPITULO II.	DESCRIPCION DEL PROBLEMA. . . . 10
II.1.	Planteamiento del problema. . . 10
II.2.	Ubicación del sitio. 13
II.3.	Características de la Bahía de Tóbari. 14
II.4.	Aspectos socioeconómicos. . . . 18
II.5.	Origen y consecuencias del problema. 24
CAPITULO III.	METODOLOGIA DE ANALISIS. . . . 26
III.1.	Recopilación y generación de la información. 26
III.1.1.	Reporte fotográfico 27
III.1.2.	Mediciones de marea 28
III.1.3.	Levantamiento topográfico y batimétrico 31
III.1.4.	Sondeos preliminares. 31
III.1.5.	Medición de corrientes. 35
III.2.	Análisis de la información. . . 40
III.2.1.	Análisis de mareas. 40
III.2.2.	Direcciones de oleaje 43
III.2.3.	Análisis ciclónicos 55
III.3.	Cálculo de algunos parámetros de interés 58

III.3.1.	Refracción del oleaje.	58
III.3.2.	Transporte eólico.	70
III.3.3.	Transporte litoral.	77
III.3.4.	Arrastre de sólido en los drenes.	86
CAPITULO IV.	METODOS DE CALCULO. MODELO DE SIMULACION.	97
IV.1.	Modelo matemático para la simu- lación del funcionamiento hidrodinámico de la Bahía de Tóbari.	97
IV.1.1.	Generalidades.	97
IV.1.2.	Desarrollo del modelo y ecuacio- nes básicas.	98
IV.1.3.	Esquema de cálculo. Sistema de ecuaciones, en diferencias finitas	104
IV.1.3.1.	Términos de convección y efectos del fondo.	116
IV.1.4.	Programa de computadora y su aplicación al caso de la Bahía Tóbari.	122
CAPITULO V.	DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.	134
VI.1.	Principales consideraciones y resultados.	136
V.2.	Diagnóstico.	139
CAPITULO VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	142

CAPITULO I

INTRODUCCION

México cuenta con grandes y extensas zonas de lagunas litorales y de estuarios, de las que se obtiene una diversa y gran producción de especies marinas, aprovechadas por el sector de la población dedicado a la pesca para satisfacer sus propias necesidades y contribuir con su producto a complementar la alimentación nacional.

La pesca se puede clasificar en dos tipos; de altura y ribereña, siendo a esta última a la que se dedica el sector de la población antes mencionado referente a la Bahía de Tóbari, municipio de Etchojoa, Sonora, puesto que las condiciones de la Bahía y los escasos conocimientos técnicos de los pescadores no les permiten realizar la llamada pesca de altura.

Estos y otros aspectos han hecho posible la realización de un programa general de desarrollo, encaminado al mejor aprovechamiento de dichas áreas o zonas para la cría y reproducción de cierto tipo de especies, como son el camarón y la caguama, y a la explotación de otras, tales como la lisa, sierra, roncacho, jaiba, pargo, tiburón, curvina y almeja, en beneficio de los pescadores y consumidores.

Como todos los seres vivos, las especies marinas necesitan de un medio ambiente apropiado para su desarrollo, el que está compuesto por las condiciones climáticas, la calidad del agua con los nutrientes adecuados y en general por el cuadro ecológico propicio, el cual se encuentra en la mayoría de las lagunas litorales y estuarios. En ocasiones el funcionamiento hidráulico puede afectar definitivamente las posibilidades de crecimiento de las especies, es el hombre quien eventualmente requiere de construir obras que en mayor o menor grado afectan el funcionamiento natural de los estuarios. Muchas veces lo anterior se hace sin realizar previamente los estudios necesarios para definir si con dicho cambio habrá de alcanzar los beneficios perseguidos y si las alteraciones ecológicas causadas son justificables, pues de lo contrario se habrá cometido un error que contribuya a la degradación ecológica de ese sistema.

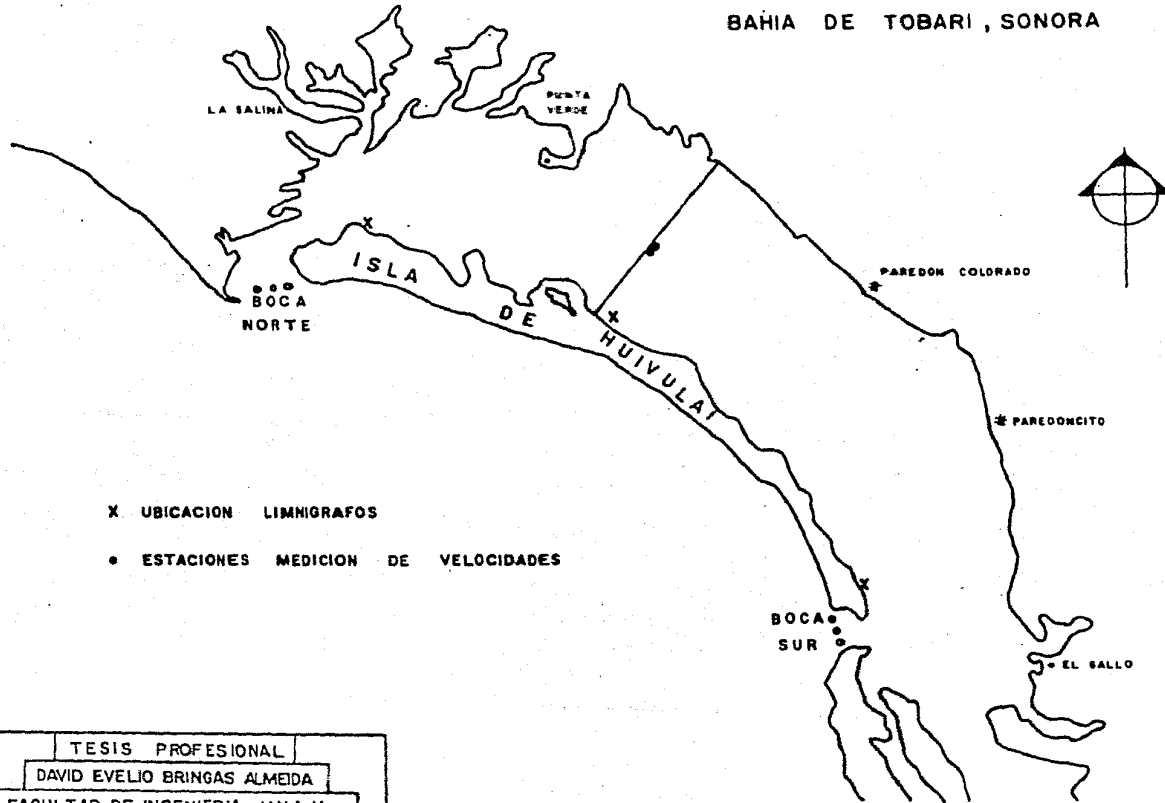
Un caso concreto de afectación a la naturaleza del funcionamiento hidráulico de una bahía, es Tóbari, la cual se encuentra localizada aproximadamente a 40 km. al sur de Cd. Obregón; esta bahía cuenta con una superficie aproximada de 70 Km^2 y se encuentra separada del mar de Cortés por una formación arenosa denominada isla Huivulai que cubre una área aproximada de 8 Km^2 .

La Bahía de Tóbari tiene una longitud aproximada de 20 kms. con un ancho medio de 3.5 Kms. y una profundidad media de 1.65 metros; su eje mayor se encuentra aproximadamente sobre la dirección Noroeste-Sureste; y su eje menor sobre la dirección Noreste-Suroeste; el volumen de agua en la Bahía, considerado hasta el nivel medio del mar es cercano a los 100 millones de metros cúbicos, ver figura I.1.1

La isla Huivulai tiene aproximadamente 13 kms. de largo, con anchos que varían entre 300 y 1500 metros, en sus extremos Norte y Sur permite la comunicación entre la Bahía y el mar a través de dos bocas con longitudes de 600 metros la Norte y 800 metros la Sur. Esta isla es básicamente una duna de arena muy poco estable debido a la escasa vegetación.

La única aportación de agua dulce que recibe el estuario la obtiene mediatne 14 descargas de canales que proceden del Distrito de Riego No. 41, de la S.A.R.H., pertenecientes a la cuenta del Río Yaqui. Estos canales de riego funcionan en realidad como drenes, mismos que tienen aproximadamente 30 años de descargar azolve a la Bahía así como pesticidas y nutrientes arrastrados de la región.

BAHIA DE TOBARI, SONORA



X UBICACION LIMNIGRAFOS

• ESTACIONES MEDICION DE VELOCIDADES

TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FIGURA I.1.1 NOVIEMBRE DE 1983

Las mareas semidiurnas, acutando a través de dos bocas, simultáneamente con la fuerza del viento preva-
leciente sobre la superficie del estuario fueron las
fuerzas principales que mezclaban y movían el agua en
la Bahía. Probablemente se trataba de un estuario muy
activo con un alto grado de mezcla e intercambio y tiem-
pos de permanencia pequeños; se sabe que sorportaban una
gran variedad de pesca, como también se sabe que la
contaminación proveniente del escurrimiento agrícola
parece no haber presentado ningún problema en particular
mientras que la sedimentación se presentó en áreas ais-
ladas y no fue difícil de controlar.

Todos estos son indicadores de un estuario eficiente
y saludable; sin embargo, aunque estos factores no han
dañado el estuario, existen otros que realmente han veni-
do a modificar su funcionamiento hidráulico, agravando la
problemática actual del mismo.

En el año de 1966 fue terminado un camino de comuni-
cación entre tierra firme y la isla de Huivulai, el cual
está formado por un terraplén de sección trapecial, con
longitud de 4 Km; ese bordo fue dañado por el oleaje
causado por un temporal; posteriormente fue reconstruido y
protegidos sus taludes con enrocamiento.

En el bordo fue dejado un puente intermedio con un claro de 20 metros que permite el paso de las lanchas. Este bordo ha traído como consecuencia que la Bahía de Tóbari presente fuertes problemas, especialmente notorios cuando baja la marea pues emergen grandes islotes en diferentes zonas. Además se puede observar una fuerte disminución del área hidráulica de la boca norte de comunicación al mar que tiende a cerrarse, debido a que por causa del bordo no se almacena la suficiente agua inducida por la marea, con lo cual las velocidades en esa boca han disminuido.

Para la realización de este trabajo y para estudiar el funcionamiento hidráulico de la Bahía se tuvo que recurrir a la simulación matemática del mismo, mediante un modelo que representara las diversas condiciones de la Bahía, ésto es, antes y después de la construcción del mencionado bordo que comunica el continente con la isla. Para poder implementar este modelo se tuvo que recopilar y generar la información necesaria para efectuar dicha simulación, la cual integra los diferentes aspectos de la Ingeniería Civil que intervienen en este trabajo, tales como; Hidráulica Marítima, Hidráulica Fluvial, Hidrología, Mecánica de suelos, Construcción y Costos.

En el segundo capítulo se describen las características de la Bahía, así como los orígenes del problema y las consecuencias que ésto ha traído.

La información recopilada y generada para el estudio del funcionamiento hidráulico de la Bahía es descrita en el capítulo tercero, así como el análisis general de la información, que entre otra, está compuesta por el análisis de las direcciones y refracción del oleaje, además del cálculo por diferentes métodos del arrastre de sólidos.

El capítulo cuarto está compuesto por los métodos de cálculo donde se plantean las ecuaciones que se utilizan para el análisis, así como el modelo de simulación, mismo que sirve para conocer el prisma de mareas, las velocidades de entrada y salida, y en general, obtener una idea del comportamiento de la Bahía antes y después de la construcción del bordo, para lo cual se recurrió a la utilización de un programa de computadora que genera los resultados necesarios para la concepción del problema.

En el capítulo quinto se amplían los aspectos que se refieren al diagnóstico del problema. Como un diagnóstico preliminar del problema se puede decir que el azolvamiento de la Bahía Tóbari es evidente, se aprecia por los bajos existentes en diferentes puntos de la misma, así como por los payones que se han formado a ambos lados del bordo en la proximidad del continente, aunque teóricamente, el estuario aceptará grandes volúmenes de azolve antes de presentar problemas más drásticos a consecuencia de lo

anteriormente mencionado. Asimismo de continuar el funcionamiento actual, con base a lo dicho anteriormente, se diagnostica el cierre plaulatino de la boca Norte, la que presenta acumulaciones de arena en el mar frente a ella, lo que trae como consecuencia el agravamiento en el deficiente intercambio de agua entre el mar y la Bahía.

En este capítulo se incluyen las alternativas de solución, como son la remoción o no del bordo, y en caso de que se optara por continuar con el mismo, se complementaría dicha alternativa con la variación del claro del puente ayudados por un modelo matemático para obtener el ancho que arrojará las mejores condiciones de funcionamiento hidráulico en la Bahía. Además de estas alternativas de solución se deberán de trazar los canales de penetración que resultan necesarios para que los pescadores lleguen con sus productos hasta los centros de recepción.

En el capítulo sexto se incluyen las conclusiones y recomendaciones acerca del presente trabajo, en el cual teniendo en cuenta que todas las obras de Ingeniería Civil deben de considerar los aspectos socioeconómicos, se hace énfasis en esta problemática con objeto de plantear el problema de manera integral. Además se detallan las ventajas y desventajas del funcionamiento del estuario. Asimismo las medidas que se deberán de tomar en cuanto a la remoción de los materiales que componen el bordo, en

caso de que se acepten las recomendaciones hechas, siendo éstos trasladados tanto al cuerpo de la isla Hiuvulai como a tierra firme, pues de nada serviría la destrucción del mismo en el sitio actual porque en vez de ayudar a solucionar el problema de azolvamiento vendría a incrementarlo de manera considerable.

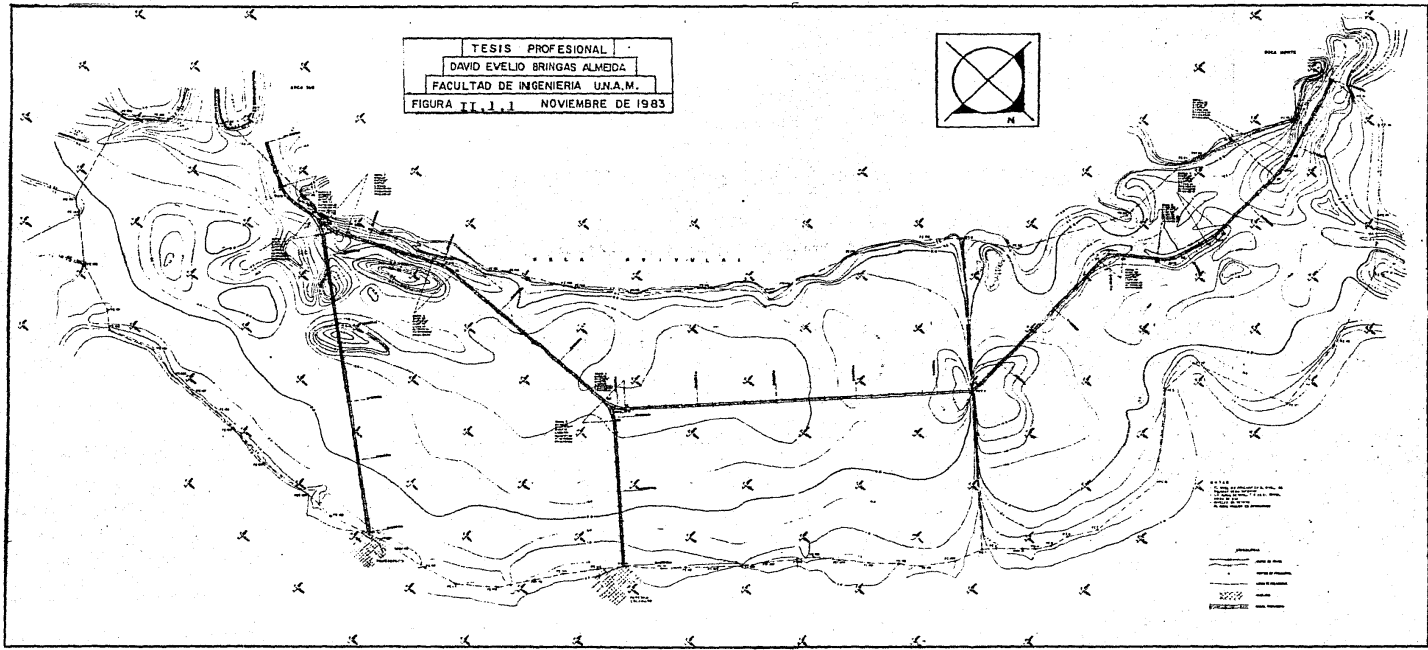
CAPITULO II

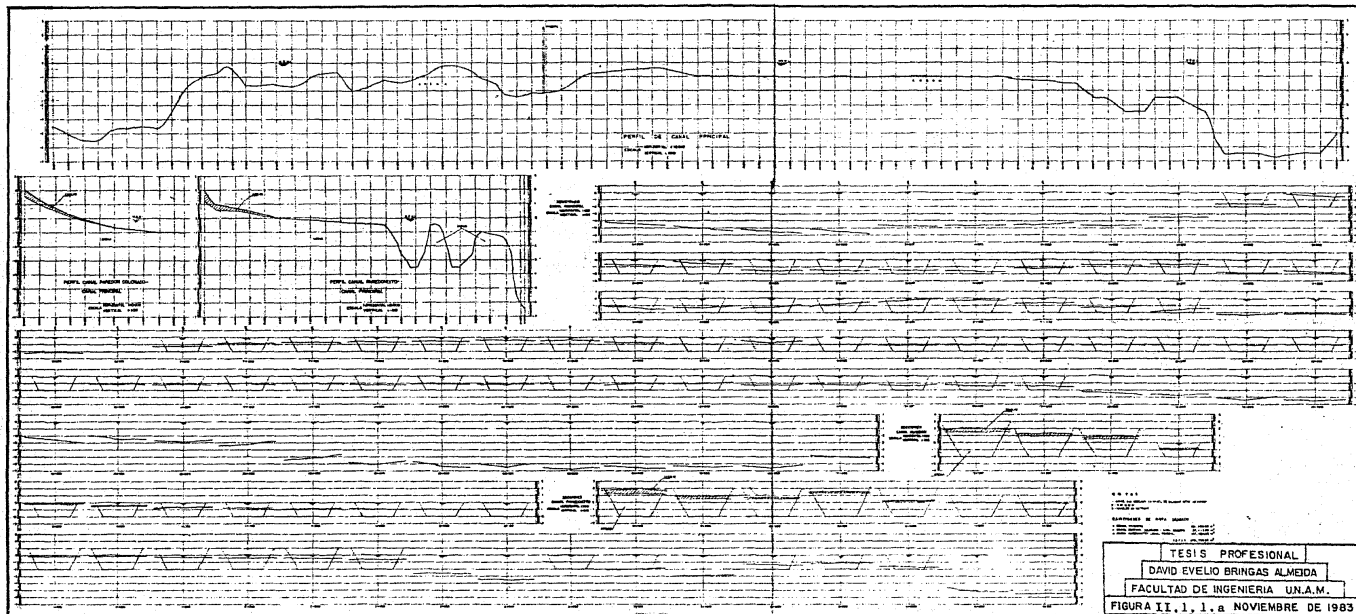
DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

II.1. Planteamiento del Problema.

El problema a tratar es referente al funcionamiento hidráulico de la Bahía de Tóbari, ya que hasta hace algunos años estaba funcionando satisfactoriamente y no presentaba complicaciones mayores. Pero como en la mayoría de los problemas de alteración ecológica está presente el hombre, a éste se le ocurrió desarrollar turísticamente a la isla, y como una facilidad de comunicación construir un bordo que ligara al continente con la isla, esta obra trajo como consecuencia la alteración del funcionamiento hidráulico de la Bahía, y dentro de esta alteración una serie de problemas tales como el azolvamiento de la misma.

El azolvamiento de la Bahía perjudica de manera importante a los pescadores, existiendo la dificultad para navegar debido a que la profundidad de algunas zonas es mínima, e incluso en otras ésta ni existe pues el azolve ha rebazado la superficie del agua, y en estas circunstancias no pueden llegar con sus embarcaciones hasta los centros de recepción que se localizan en las figuras II.1.1. Otro problema lo constituye el cierre paulatino de la boca Norte debido al arrastre litoral y a las bajas velocidades que el agua adquiere al entrar y salir del estuario.





La comunicación entre el continente y la isla se hizo con el fin de transformar a ésta en un centro turístico, aunque este propósito resultará excesivamente costoso pues la misma está constituida por un manto arenoso con características de alta inestabilidad debido a la acción del viento y otros fenómenos meteorológicos que hacen que las dunas cambien constantemente su morfología.

Ahora bien, con la construcción del bordo la afectación ya está hecha, por lo tanto se deberán buscar soluciones para de una u otra forma ayudar a resolver el problema.

Por los motivos anteriores se ha optado en realizar este trabajo con la finalidad de llegar aquí a una conclusión técnica, para lo cual se están aprovechando las mediciones de campo y algunos conceptos desarrollados en el Estudio y proyecto de Dragado en la Bahía de Tóbari, Municipio de Etchojoa, Sonora (Referencia 1), cuyo estudio fue realizado a solicitud de la Secretaria de Pesca.

II.2. Ubicación del sitio.

La Bahía de Tóbari se encuentra comprendida entre el Golfo de California y la Sierra Madre Occidental, y

los ríos Yaqui y Mayo, los cuales están separados aproximadamente 120 Km. descargando ambos al mar de Cortés. Su eje mayor se encuentra sobre la dirección NW-SE y su eje menor sobre la dirección NE-SW.

Por la costa de la Bahía de Tóbari, se localizan los poblados de Paredón Colorado y Paredoncito que son los centros de recepción para los productos de los pescadores (Figura I.1.1).

El acceso al sitio de estudio es, a partir de Cd. Obregón por la carretera federal No. 15 con dirección a Navojoa, 5 Km. hasta la desviación a Villa Juárez, se continúa en dirección sur por una de las carreteras pavimentadas del Distrito de Riego No. 41 en un tramo recto de aproximadamente 40 Km. hasta llegar a la calle 2400, en donde se sigue por ésta 4 Km. con dirección W para llegar a la población de Paredón Colorado, continuando por la costa de la Bahía en dirección SE se llega a la población de Paredoncito, ambos pertenecientes al municipio de Etchojoa.

II.3. Características de la Bahía de Tóbari.

La Bahía de Tóbari se encuentra limitada por la isla Huivulai, tierra firme del continente y lo que se ha llamado boca Sur y Boca Norte. En la actualidad

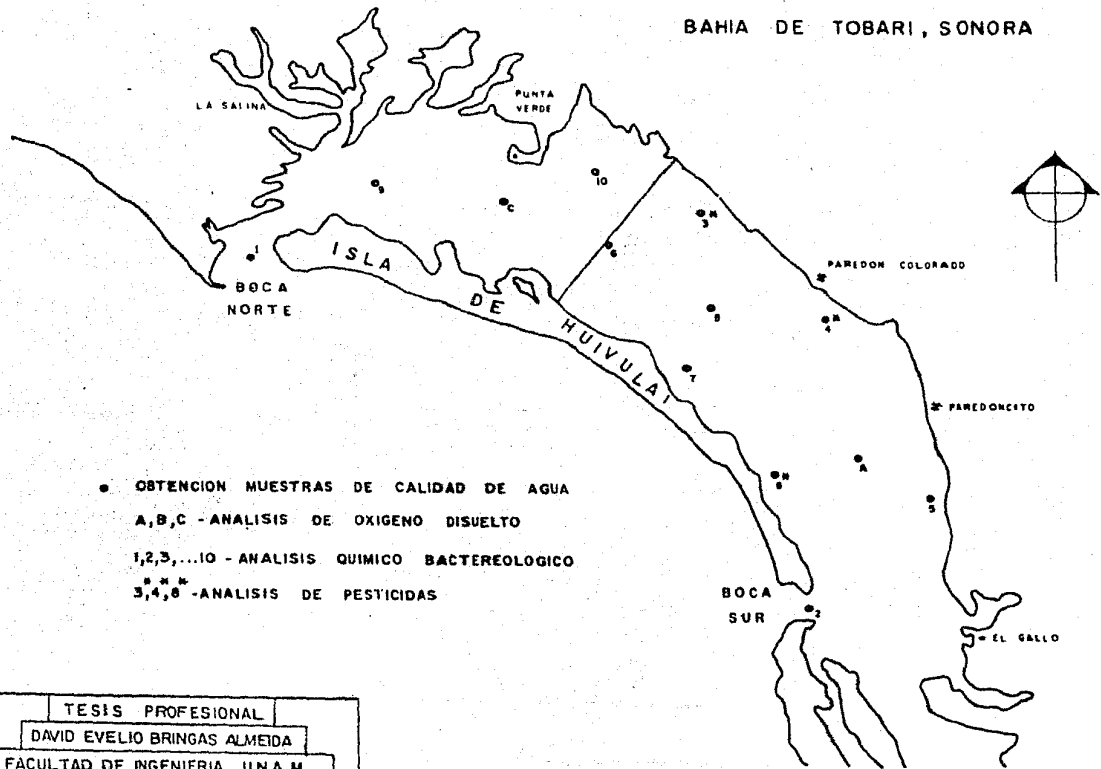
podemos referirnos a la Bahía como si en realidad se tratara de dos que fueran en ciertos aspectos diferentes, ésto es, debido a la construcción del bordo, la Bahía de Tóbari ha sido dividida en lo que se podría llamar Bahía Norte y Bahía Sur, aunque sigan conservando las características originales de funcionamiento.

Esta Bahía almacena un volumen de agua aproximado a los 100 millones de metros cúbicos pues cuenta con una superficie cercana a los 70 Km cuadrados, una longitud de 20 Km un ancho medio de 3.5 Km y una profundidad media del agua de 1.65 metros.

En cuanto a la calidad del agua se refiere, laboratorios locales realizaron análisis físico-químicos y bacteriológicos en 13 estaciones diferentes, mismas que que se incluyen en este trabajo dada su importancia en el desarrollo del estudio (ver figura II.3.1), de las cuales en 3 estaciones se muestrearon a nivel superficial y de fondo los parámetros; oxígeno disuelto, salinidad, temperatura y conductividad, cuyos resultados se muestran en la tabla II.3.1.

A solicitud de la Secretaría de Pesca fueron instalados varios limnógrafos en sitios estratégicos de la Bahía con objeto de obtener sus registros y compararlos con los calculados, los cuales resultaron prácticamente

BAHIA DE TOBARI, SONORA



TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FIGURA 11.3.1 NOVIEMBRE DE 1983

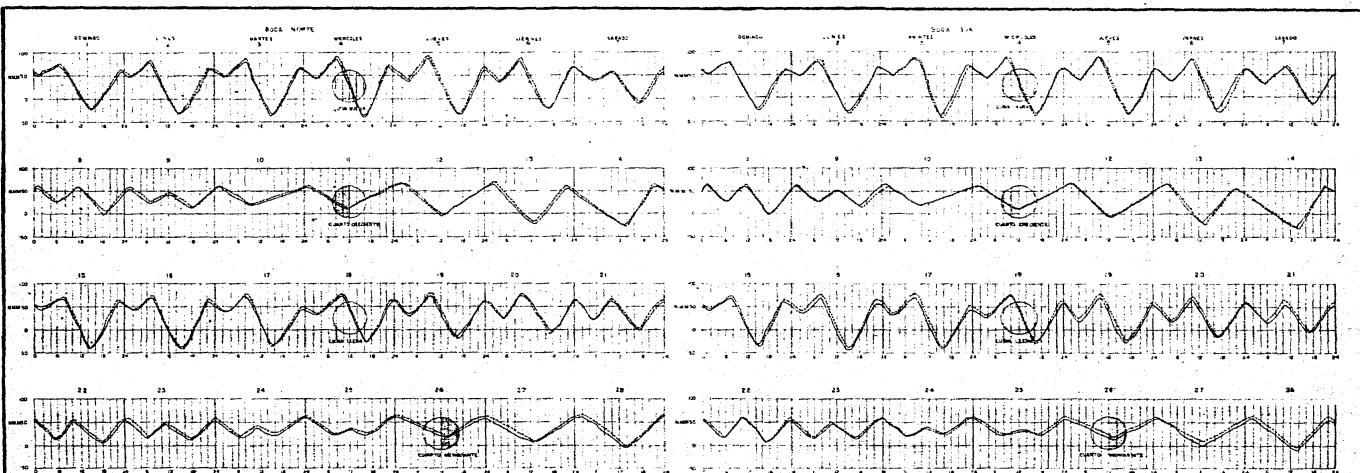
iguales en tiempo y amplitud, Figuras II.3.2. y II.3.3.

Aunque los fines de este trabajo no son los de conocer en detalle el comportamiento de la marea, es de gran interés para definir el funcionamiento del estuario, saber su tipo y amplitud durante diferentes condiciones de mareas, con las cuales al alimentar los modelos de simulación se pudiera conocer el comportamiento de las corrientes dentro de la Bahía bajo las condiciones de funcionamiento del estuario con y sin bordo.

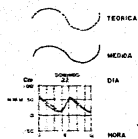
II.4. Aspecto Socioeconómico.

Los que aquí se expondrán no se consideran como aspectos directos de la Ingeniería Civil, aunque sí ayudan a definir las interrelaciones con los mismos, es por esta razón por la que se mencionan, con la seguridad de que los problemas socioeconómicos son verdaderamente importantes y a veces factores determinantes para la realización o no de una obra.

La Bahía de Tóbari se encuentra ubicada en la parte Sur del Distrito de Riego No. 41, considerado como el principal promotor del desarrollo económico de la región y como uno de los más importantes y productivos a nivel nacional, contando con una extensión aproximada de 3,700 Km. cuadrados donde se siembran principalmente; Trigo, Cártamo, Algodón, Soya, Maíz y Alfalfa.



CALENDARIO GRAFICO DE MAREAS, FEBRERO 1981.



NOTAS:

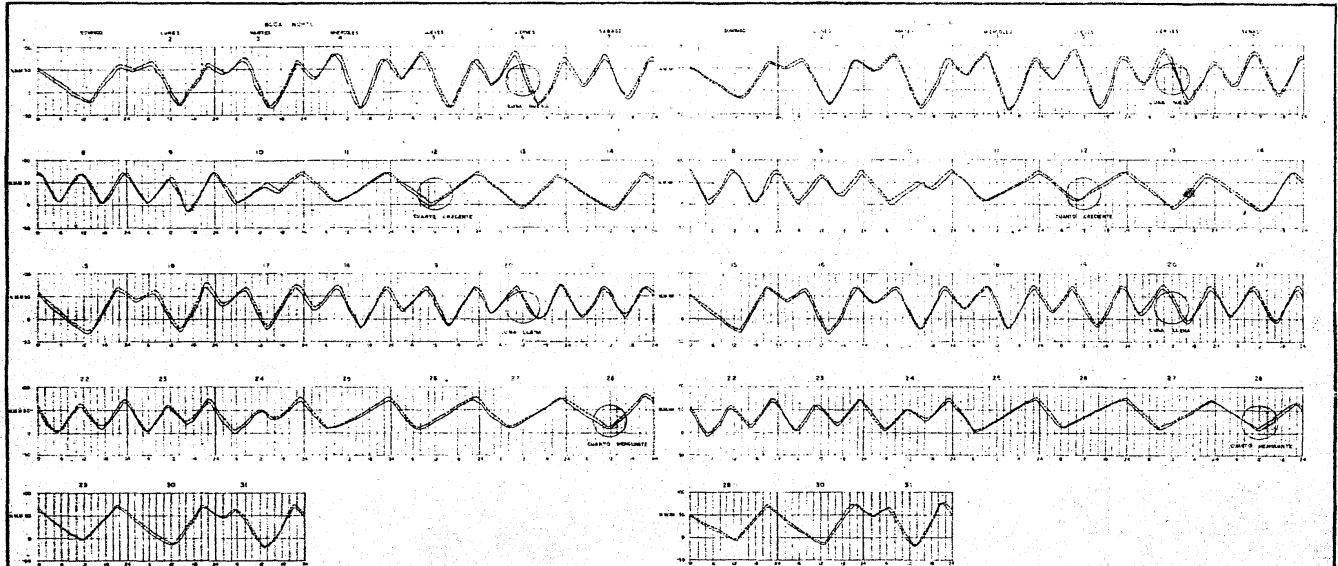
LA MAREA TEORICA FUE OBTENIDA DEL CALENDARIO DE MAREAS DE MAREAS DEL INSTITUTO DE MAREAS DE TULUM, Q.R.

LA MAREA REAL FUE OBTENIDA EN CAMPO

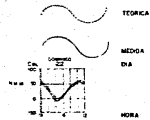
EL NIVEL CERO INDICADO, ES EL NIVEL DE BALANZA MAREO, INDIENAS

S.M.M. 030

TESIS PROFESIONAL
DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA
FACULTAD DE INGENIERIA UN.A.M.
FIGURA II.3-2 NOVIEMBRE DE 1983



CALENDARIO GRAFICO DE MAREAS, MARZO 1981.



NOTAS:
 LA MAREA TEORICA ES OBTENIDA DE CALIFICADOR
 DE MAREAS Y VIENTOS DEL INSTITUTO OCEANOGRAFICO
 DE LA UNAM.
 LA MAREA MEDIDA FUE OBTENIDA EN CAMPO
 EL NIVEL CERO INDICADO ES EL NIVEL DE SALAMANCA
 M.D. INFERRER
 M.M. C. 90

TESIS PROFESIONAL
DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
FIGURA II. 3. 3 NOVIEMBRE DE 1983

Formando parte del sistema hidráulico Angostura-Novillo-Oviachic, se encuentra la presa Alvaro Obregón (Oviachic) la que se encarga de proporcionar grandes volúmenes de aguas utilizadas para el riego de esta zona, constituyendo así uno de los aspectos más importantes para el buen desarrollo de la misma.

La presa Alvaro Obregón se encuentra aproximadamente a 40 Km. al Norte de Cd. Obregón y tiene una capacidad de 3,000 millones de metros cúbicos, además forma parte del sistema hidráulico del río Yaqui, el cual tiene una cuenca de drenaje con una superficie de 73,589 Km. cuadrados.

Alrededor de la agricultura se ha desarrollado a menor escala la ganadería y se cuenta con una gran actividad Comercial y Bancaria, propiciada de manera importante por un buen sistema de comunicaciones por Carretera y Ferrocarril.

La tenencia de la tierra dentro del Distrito de Riego está formada por pequeños propietarios y principalmente por ejidatarios agrupados en ejidos colectivos.

Como apoyo a la agricultura regional existen; una planta procesadora de fertilizantes, representaciones de grandes corporaciones transnacionales fabricantes de tractores e implementos agrícolas y empacadoras de algodón.

Dentro de este contexto económico - social, el sector más marginado es el dedicado a las actividades pesqueras.

En los centros de recepción de Paredón Colorado y Predoncito existen aproximadamente 1,500 habitantes, asimismo dos cooperativas integradas por los pescadores mismos.

La tasa anual de crecimiento de la población en estas comunidades entre 1960 y 1970 fue del orden de 0.75%, mientras que entre 1970 y 1981 aumentó 10 veces, alcanzando el 7.1% anual; lo anterior se debe en gran parte a que el número de habitantes varía en función de la organización de las cooperativas y de la forma como administran sus recursos. Un caso típico es lo sucedido en Paredón Colorado, en que durante el ciclo de 1979 - 1980 de captura de Camarón, cuadruplicaron su producción respecto al ciclo anterior, lo cual sucedió gracias a que en 1979 tomó posesión una nueva administración, mejor organizada y bien administrada; a raíz de este cambio el número de socios en la cooperativa aumentó de 74 a 150. Actualmente la cooperativa de Paredón Colorado cuenta con 158 socios y la de Parendoncito, denominada Cooperativa Pesquera Tóbari, tiene 150 socios. De las dos cooperativas la que tiene una mejor organización es Tóbari ya que ésta cuenta con nueve barcos pesqueros en Guaymas,

y lo más importante es que ésta realiza sus actividades en zonas no limitadas mientras que la cooperativa de Paredón Colorado, tiene asignada un área, dedicándose únicamente a la pesca ribereña.

México tiene graves problemas sociales en todos los sectores de la población, uno de ellos y bastante arraigado es el alcoholismo, que afecta a una gran parte de las cooperativas de Paredón Colorado y Paredoncito puesto que la mayor parte del tiempo se encuentran desocupados porque su jornada de trabajo dura como máximo 5 horas diarias, es decir en la temporada de la captura de Camarón, que es su principal fuente de ingresos, se concretan a trabajar 3 meses al año (del 10. de Septiembre al 30 de Noviembre), durante los cuales trabajan un promedio de 5 horas diarias, los meses restantes se dedican a la captura de las especies de escama, y como el tiempo que están desocupados en algo lo tienen que emplear, se dedican pues, a ingerir bebidas alcohólicas.

Por otra parte, la alimentación de estos pescadores es básicamente pescado, pastas y eventualmente huevos y leche, y en lo que a educación recibida se refiere, ésta no rebaza el tercer grado de primaria pese a que existen escuelas en las dos poblaciones con cupo para 300 alumnos.

Estos son, entre otros, los aspectos socioeconómicos más importantes que determinan la sociedad en la Bahía y sus poblados vecinos.

II.5. Origen y consecuencias del problema.

Como se menciona al principio de este capítulo, hasta 1966 (fecha en que se construyó el bordo) el funcionamiento hidráulico de la Bahía era satisfactorio y no presentaba complicaciones mayores, pero como todo fenómeno tiene su razón de ser y éste no podía ser la excepción, se dá origen al problema mediante la construcción del camino que comunica al continente con la isla.

Con la construcción del camino, mismo que ha sido descrito anteriormente en cuanto a su sección, tipo de materiales utilizados, longitud, y en general a características propias, se ha venido a modificar el funcionamiento hidráulico de la Bahía, pues el bordo cuenta tan solo con un puente con un claro de 20 metros el cual permite el paso de las embarcaciones entre ambos lados de ese cuerpo de agua y que los pescadores puedan realizar sus actividades, siendo dicho puente la única forma de comunicación que existe para el agua que entra y sale por las bocas y que por sus dimensiones no es suficiente para que se lleven a cabo los movimientos necesarios de las corrientes y puedan adquirir éstas una velocidad

tal que sean capaces de arrastrar los azolves o sedimentos existentes en el estuario.

Ahora bien, como a toda acción corresponde una reacción, la construcción del camino ha suscitado fuertes problemas de azolvamiento que impiden la libre navegación de las embarcaciones especialmente cuando baja la marea y emergen grandes islotes en diferentes zonas, problemas por los cuales se ha optado por el trazo de los canales de penetración necesarios para poder trasladarse a los centros de recepción.

Asímismo, otro problema causado por la construcción del bordo lo es la disminución en la eficiencia del funcionamiento hidráulico del estuario, que se refleja principalmente en la tendencia al cierre de la boca Norte por las bajas velocidades de entrada y salida del agua a la Bahía, y por ende no existe una eficiente remoción de agua, presentándose el problema de la contaminación debido a los diferentes plaguicidas e insecticidas arrastrados por el agua proveniente de las 14 descargas del Distrito de Riego No. 41.

CAPITULO III

METODOLOGIA DE ANALISIS

III.1. Recopilación y generación de la información

Debido a la importancia que representa para el desarrollo del estudio, se ha incluido la recopilación y generación de información realizada por parte de la Secretaria de Pesca, Detenal, el Distrito de Riego No. 41 y la Residencia de Acuacultura "Plan Yaqui", que con su información han hecho posible una mejor realización del mismo.

La Secretaria de Pesca proporcionó un plano escala 1:20,000 de un estudio topobatimétrico elaborado por la Residencia de Acuacultura "Plan Yaqui" en mayo de 1977. Este plano sirvió para llevar a cabo los primeros análisis y permitió comparar los cambios sufridos por la Bahía entre los años de 1977 y 1981, ya que en esta última fecha se contaba con los levantamientos topográficos y batimétricos que formaban parte del estudio.

Asimismo el Distrito de Riego No. 41 proporcionó datos de los aforos realizados en los canales de riego que descargan a la Bahía de Tóbari, mismos que fueron usados para cuantificar los volúmenes de agua dulce que

ingresan al estuario y especialmente para efectuar una cuantificación teórica de los volúmenes de material sólido que son arrastrados por los drenes y que resultaron ser mínimos en comparación con el volumen total de agua contenido en la Bahía.

Detenal efectuó una serie de vuelos fotogramétricos sobre la zona en estudio, mismos que fueron obtenidos en esa dependencia y que han servido para detectar algunas de las variaciones sufridas por la Bahía. En uno de los pares fotográficos se puede observar el bordo destruido parcialmente por el ciclón Pauline a principios de Octubre de 1968.

III.1.1. Reporte Fotográfico.

Se realizaron una serie de recorridos aéreos con la finalidad de obtener secuencia fotográfica que mostraron los detalles de las bocas, la isla y el bordo, de las cuales se han podido observar los aspectos siguientes:

- a) En la costa Este (E) de la Bahía de Tóbari se observa una gran concentración de material fino, especialmente frente a las descargas de los canales de drenaje provenientes del Distrito de Riego No. 41.

- b) En la parte inicial del bordo se han formado playones de material fino a ambos lados de esa estructura, causados por las bajas velocidades de la corriente en esas zonas.
- c) Se pueden apreciar en la Bahía grandes manchas de color café que corresponden a las zonas de bajos; frente a la boca Norte se observa la formación de un gran islote y la tendencia a cerrarse con el avance del transporte litoral proveniente del Norte. Además del islote existe una barra paralela a la boca que dificulta el intercambio de agua entre la Bahía y el Golfo de California.
- d) Frente a la boca Sur, del lado de la isla Huivulai, también se observa una zona de Bajos; sin embargo, se puede notar que la boca se mantiene prácticamente libre de obstáculos y con una buena profundidad.
- e) En las fotos se puede apreciar que la isla Huivulai es una formación arenosa con vegetación incipiente y dunas inestables.

III.1.2. Mediciones de Marea

Las mediciones de marea fueron realizadas con el fin de conocer lo mejor posible el comportamiento de los niveles del agua dentro de la Bahía, es decir, para encontrar una explicación al funcionamiento de la laguna con dos bocas, tal y como se ilustra en la Figura III.1.2.1, que representa las condiciones del sitio en cuestión.

Para la obtención de las mediciones de marea en la Bahía, se recurrió a las tablas de predicción de mareas del Instituto de Geofísica de la UNAM, y puesto que para dicha Bahía no existe ningún mareógrafo, se realizó una interpolación lineal entre las estaciones de Guaymas y Yavaros, elaborando los cálculos de los tiempos y elevaciones en ambas bocas a partir de los datos para los puntos de inflexión de las estaciones antes mencionadas.

Se recurrió también a la instalación de limnógrafos en los puntos que se indican en la Figura I.1.1. La instalación de los mismos se hizo con la finalidad de poder obtener más información acerca de las mediciones de marea mediante los registros proporcionados por estos aparatos en los meses de Febrero y Marzo de 1981, cuyos resultados se presentan en las Figuras II.3.2 y II.3.3.

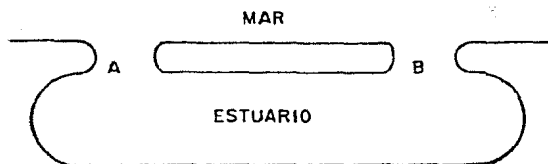


Figura III.1.2.1

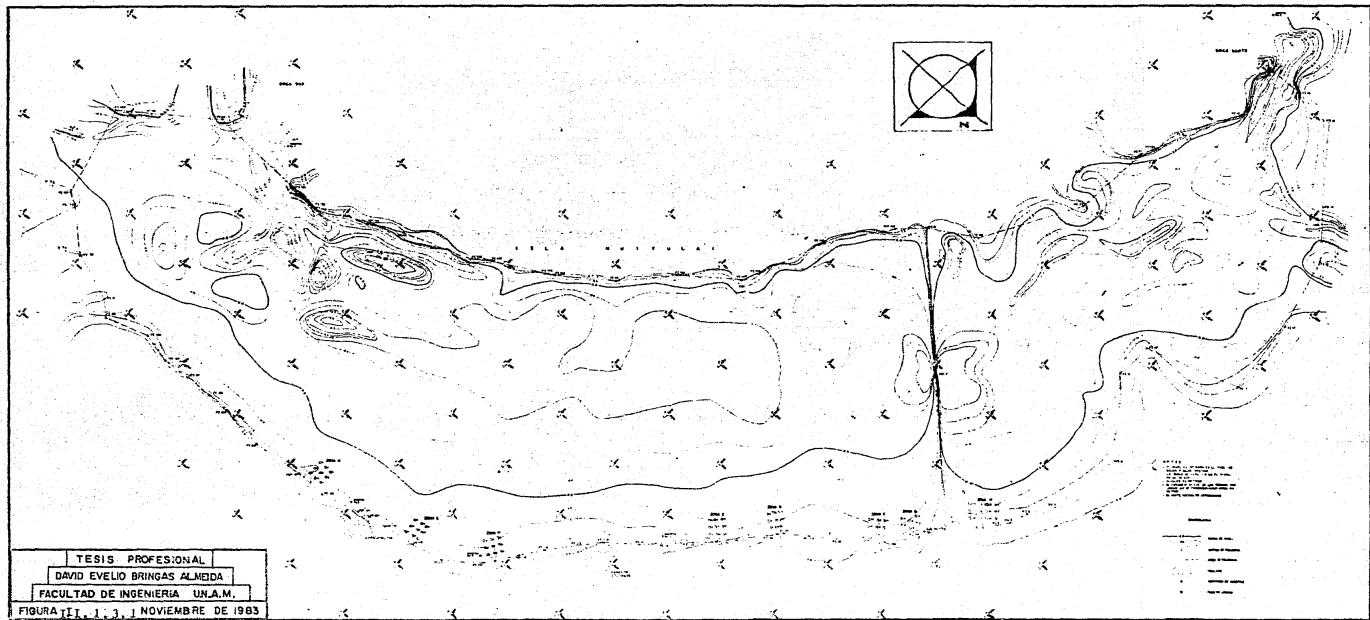
III.1.3. Levantamientos Topográficos y Batimétrico.

Para conocer el relieve de un terreno con todos los accidentes de la superficie del mismo es necesario realizar un levantamiento topográfico y representar gráficamente sobre un papel las principales características que lo definen. Dicho levantamiento fue realizado para la Bahía de Tóbari siguiendo el perímetro de la misma con el trazo de una poligonal cerrada que sirvió para apoyar el levantamiento batimétrico del estuario; el - cual consiste en obtener las medidas de la profundidad. Los datos fueron usados para efectuar la configuración topográfica y batimétrica que se muestra en la Figura III.1.3.1.

III.1.4. Sondados Preliminares

Para los estudiantes de la mecánica de suelos se tiene la necesidad de conocer el conjunto de datos y las características de cada uno de los estratos que componen un suelo, y tanto para la etapa de proyecto como durante la ejecución de la obra, saber los alcances y propiedades físicas con las que éste cuenta.

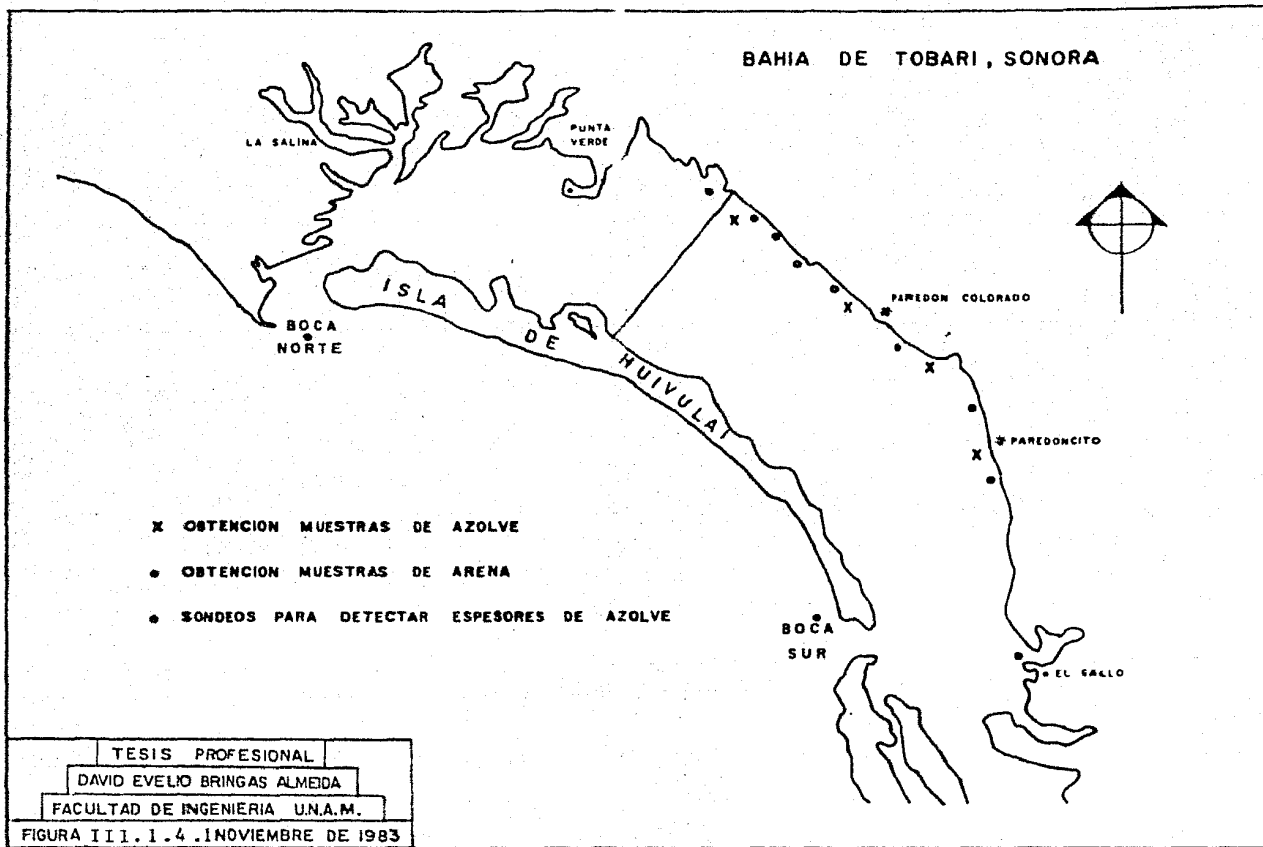
Para el caso específico de la Bahía de Tóbari, el conjunto de estos datos ha permitido adquirir una concepción razonable de las propiedades físicas del suelo que posteriormente son consideradas en el análisis.



Con la ayuda del laboratorio de Mecánica de Suelos se pudieron obtener los datos definitivos que el estudio requiere usar como parámetro de diseño. En general, para llegar en el laboratorio a resultados dignos de crédito, es preciso cubrir en forma adecuada una etapa previa e imprescindible; la obtención de las muestras de suelo apropiadas para la definición de sus parámetros.

Con objeto de determinar el espesor de las capas de azolve y sus principales características en la Bahía de Tóbari y tener posteriormente una idea del volumen de sólidos provenientes de los canales de riego que afectan a la misma, se han efectuado diferentes sondeos, tanto para las zonas cercanas a las descargas de los drenes donde se realizaron dichas excavaciones, como a lo largo de la costa, de donde se obtuvieron las secciones longitudinales paralelas al litoral continental que se muestran en la Figura III.1.4.1.

Además se realizaron otra serie de sondeos siguiendo el trazo preliminar de los canales de penetración, con objeto de definir los volúmenes de excavación de arena o de material limo-arcilloso del que resultaron estar compuestos los azolves.



III.1.5. Medición de Corrientes.

Las observaciones en un punto fijo tienen como finalidad obtener las propiedades generales de las corrientes de marea. El lugar para establecer dicho punto fijo se escogió en donde los datos son más útiles, considerando el objetivo de la investigación o de los proyectos y la situación general del área donde se efectuaron las observaciones.

Las corrientes oceánicas, las de marea y las producidas por el oleaje transportan los materiales que forman las costas o que transportan los ríos, depositándolos en las Bahías o en los recintos portuarios y contribuyen a configurar las playas, entendiéndose por playa, las acumulaciones de sedimentos no consolidados, como arena, grava, boleas, etc., que se extienden desde el nivel de marea media baja hasta algún accidente fisiográfico como son, por ejemplo; los acantilados y dunas o donde la vegetación es permanente.

Las playas son el mejor elemento para disipar la energía del oleaje, por lo tanto, la mejor protección que puede tenerse a lo largo del litoral es la formación de ellas o su conservación.

Ahora bien, las mediciones de corriente se realizan con el fin de conocer las velocidades promedio que se presentan en un lugar para diferentes condiciones de marea, y con este conocimiento adquirir una idea del comportamiento de dichas corrientes. También sirven para conocer los tiempos de entrada y salida que tarda el agua cuando se le permite un constante movimiento debido a las variaciones de los niveles causados por la marea.

En la Bahía de Tóbari se realizaron las mediciones de corrientes con objeto de cuantificar su estado actual, dando como resultado una marcada disminución de las velocidades, así como un incremento en los tiempos de entrada y salida del agua al cuerpo del estuario, y por lo tanto una gran deficiencia en el intercambio.

Las mediciones se concentraron principalmente en ambas bocas de la Bahía y en la alcantarilla del bordo, obteniendo siempre las velocidades a un tercio de la profundidad. Además, se obtuvieron diferentes mediciones para cada sección y al final se promediaron éstas con el objeto de definir una velocidad promedio de las medias en dicha sección cuyos resultados se indican gráficamente en las Figuras III.1.5 (1,2 y 3).

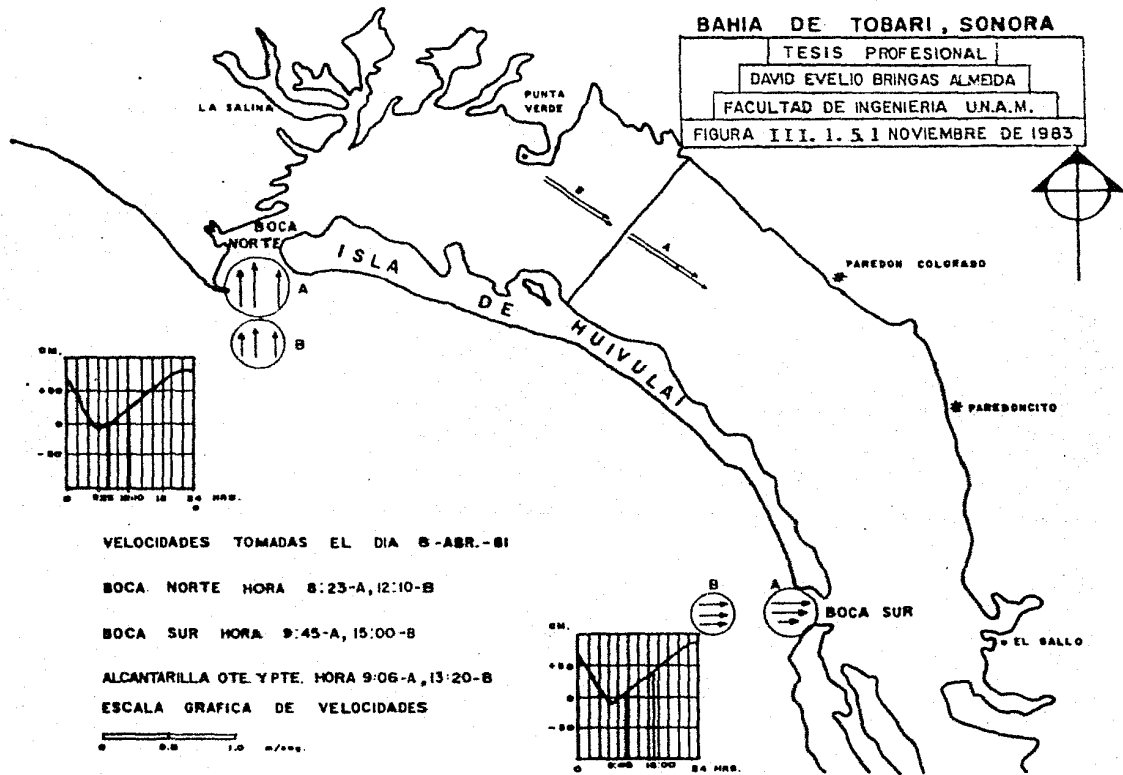
BAHIA DE TOBARI, SONORA

TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FIGURA III.1.5.1 NOVIEMBRE DE 1983



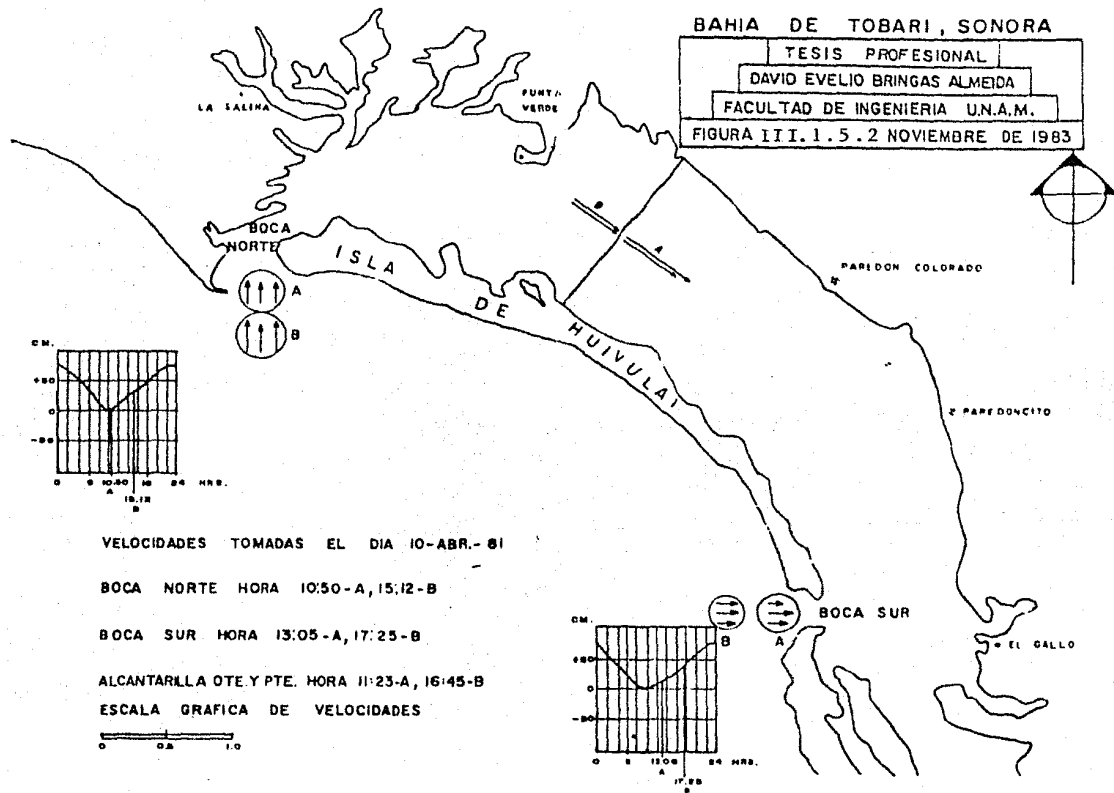
BAHIA DE TOBARI, SONORA

TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA

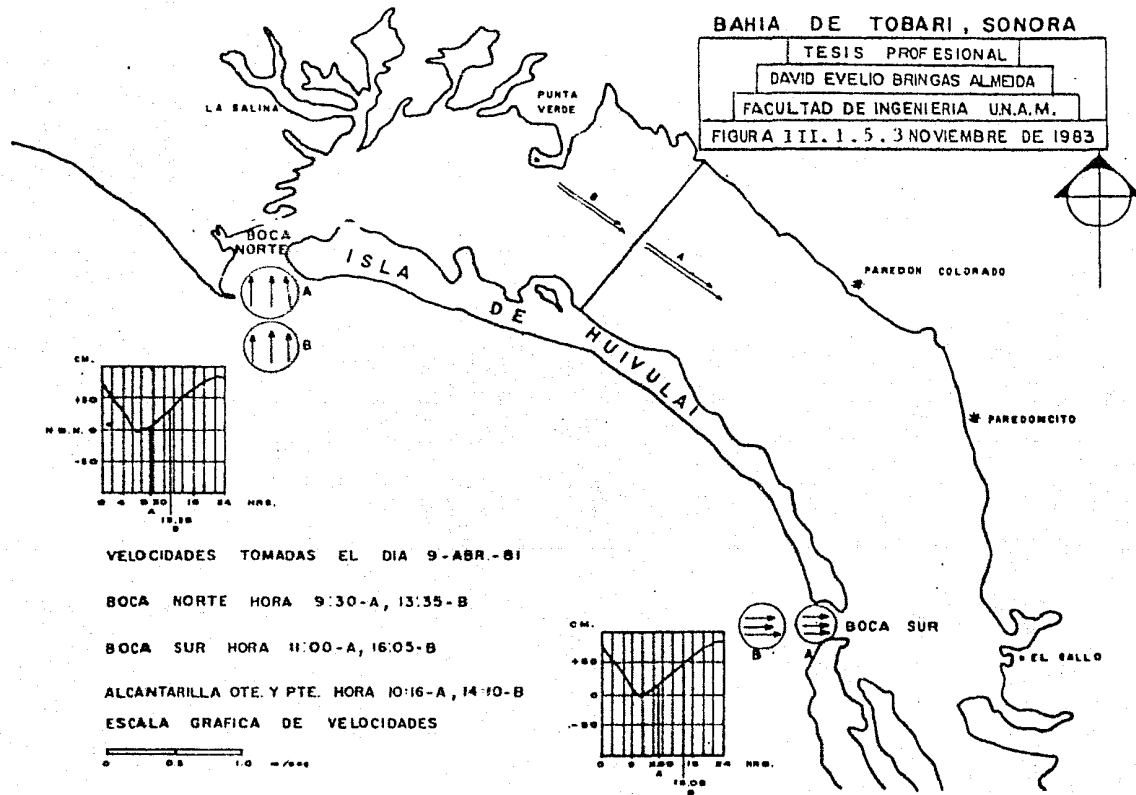
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FIGURA III.1.5.2 NOVIEMBRE DE 1983



BAHIA DE TOBARI, SONORA

TESIS PROFESIONAL
DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
FACULTAD DE INGENIERIA UN.A.M.
FIGURA 1 II. 1. 5. 3 NOVIEMBRE DE 1983



III.2. Análisis de la Información.

III.2.1. Análisis de Mareas.

Existen varios tipos de marea, de las cuales las características principales son su mayor nivel de ascenso (Pleamar máxima) y su mínimo nivel alcanzado (Bajamar mínima) con relación al nivel medio del mar, aunque en ocasiones puede intersar también la evolución de los niveles producidos por la marea en el transcurso del tiempo.

Los niveles de ascenso y descenso de la marea se presentan principalmente por las causas que los producen, pero tienen una influencia muy importante tanto la topografía del terreno como la batimetría de la zona en cuanto a las características propias del lugar.

Particularmente y tomando en cuenta la gran similitud existente entre los datos de mareas calculados para Tóbari a partir de las predicciones del Instituto de Geofísica para Guaymas y Yavaros y con los registros obtenidos de los limnógrafos instalados en el sitio, se procedió a determinar la elevación del nivel medio del mar.

Los aparatos se colocaron a elevaciones arbitrarias pero referidas a dos mojoneras fijas que forman

parte de la poligonal envolvente de la Bahía y cuyo desnivel relativo es conocido, con esa información y elaborando por separado dos gráficas para cada limnógrafo se procedió a dibujar a la misma escala y para las mismas horas y fechas las gráficas de marea calculadas, los resultados fueron dos gráficas paralelas separadas a lo largo de los registros unas distancias que deberían ser constantes, aunque por diversas perturbaciones estas distancias no resultaron paralelas.

Se calcularon las cotas de las mojoneras respecto al nivel de baja mar medio inferior, que es respecto al cual aparecen los valores de las tablas de predicción de mareas; con los nuevos valores de las elevaciones en esas dos mojoneras se procedió a revisar que cumplieran con el desnivel obtenido de la nivelación diferencial de la poligonal, encontrando que existía un error de 3 cm. respecto a la definida con los limnógrafos, el cual se corrigió.

Con objeto de comprobar los cálculos de las elevaciones de las mojoneras, se procedió a llevar una nivelación diferencial desde un banco de nivel del Distrito de Riego No. 41, hasta la mojonera No. 25 de la poligonal envolvente que aparece en la Figura III.1.3.1, encontrando que a partir del banco del distrito de riego se llegaba a esa mojonera con la elevación 1.35, mientras que esta misma

a partir de las elevaciones calculadas con los limnigrafos resultaba con la cota 1.83, existiendo una diferencia de 48 cm., debido a que el distrito de riego está referido al nivel medio del mar y el levantamiento de Tóbari al nivel de baja mar media inferior.

Una de las principales características de la Bahía de Tóbari es el problema de azolvamiento que afronta, agravado en la actualidad especialmente por el hecho de haber trazado el bordo dentro de ella, provocando ésto, la notoria disminución de las velocidades del agua y la deficiencia de intercambio entre ésta y el mar. Este fenómeno también ha traído como consecuencia la disminución de los tiempos de entrada y salida del agua a la Bahía, puesto que lo hace tan lentamente que aún no ha concluído un ciclo de entrada y salida cuando el siguiente empieza a presentarse.

Además, siguiendo con la particularización respecto a Tóbari que, aunque los fines del estudio no son los de conocer en detalle el comportamiento de la marea, sí es de interés el definir el funcionamiento del estuario, saber su tipo y amplitud durante diferentes condiciones medias de marea, con las cuales, al alimentar los modelos de simulación (que más adelante se describen), se pueda conocer el comportamiento de las corrientes dentro de la Bahía, bajo las condiciones de funcionamiento con y sin bordo.

Un aspecto importante de señalar es el hecho de que teniendo las gráficas de mareas obtenidas en Tóbari con los aparatos que se instalaron, se pudo obtener una buena correlación con las tablas de predicción de mareas del Instituto de Geofísica de la UNAM, y se contó con información para cualquier tipo de condición tomando como base las mencionadas tablas y afectándolas de los coeficientes correspondientes por defasamiento y amplitud.

III.2.2. Direcciones de Oleaje

La estimación de la dirección de avance del oleaje es esencial para estimar la dirección del arrastre litoral (que para el presente trabajo resultó de interés), para calcular las presiones sobre las posibles estructuras y escolleras o conocer la penetración del oleaje en un recinto portuario.

La dirección del oleaje en mar abierto algunas veces es estimado toscamente por la dirección del viento, mientras que en la cercanía a la costa este factor resulta ser insuficiente debido a la refracción de oleaje por efecto de la configuración batimétrica.

Entre los métodos convencionales para estimar la dirección del oleaje se tiene la fotografía aérea, la

observación visual y el radar. Mediante la fotografía aérea, la dirección y distribución de la trayectoria del oleaje se observan claramente con este método, bajo condiciones apropiadas. La observación visual se utiliza con mayor frecuencia, y para ello se usa un tránsito; con éste se mide el ángulo horizontal entre una referencia fija y el de la visual a las crestas, cuando estas son paralelas al hilo horizontal de la retícula del tránsito.

El movimiento oscilatorio de la superficie del mar se puede presentar en tres tipos diferentes. El primero, mencionado anteriormente, es el debido a la atracción del sol y de la luna, llamado marea astronómica que se presenta con periodos aproximados de 12 y 24 horas. El segundo es generado por deslizamiento de tierras submarinas, debidas a movimientos terrestres, y reciben el nombre de tsunamis; aunque en aguas profundas pueden tener una altura pequeña, al acercarse a la costa y disminuir la celeridad primero en el frente de la onda se llega a formar una ola con una altura de varias decenas de metros, y el tercero, que el oleaje producido por el viento y que suele tener periodos que van de 1 a 30 segundos, considerándose éste como el más importante por ser el más común, razón por la cual se describe un poco más.

Por otra parte, se pueden distinguir dos tipos de oleaje; el primero está formado por las olas ORDINARIAS que son más o menos persistentes y que ocurren a lo largo del año, cambiando su altura y dirección. El segundo tipo está constituido por las olas EXTRAORDINARIAS, generalmente producidas por los ciclones, las cuales duran relativamente poco tiempo, pero tienen una energía muy superior a la de las olas ordinarias.

En cuanto a las direcciones de oleaje, y con base a los criterios antes mencionados, se procedió a la determinación de la evolución de los rayos de oleaje, cuyas direcciones se seleccionaron precisamente con base en los análisis de viento y de oleaje, sirviendo como fuente de información de los registros de viento el Servicio Meteorológico Nacional, el cual proporcionó los registros de vientos dominantes (dirección y velocidad media) durante un periodo de 19 años (1961 - 1979) correspondientes a Cd. Obregón, distante 40 Km. del punto de interés. Al calcular la refracción del oleaje fue posible conocer el coeficiente de refracción y el ángulo de incidencia del oleaje a lo largo de la costa de la Isla Huivulai, mismos que más adelante serían utilizados para la determinación del transporte litoral.

Al soplar el viento sobre la superficie del mar se genera un oleaje al cual se le llama real. Las olas formadas por el viento se conocen como ondas de viento (SEA), de tipo forzado o de tormenta. Cuando el oleaje está libre de la acción del viento o las olas se les designa como libres (SWELL).

El viento afecta una determinada zona del mar y se deben tomar en cuenta las dimensiones de esa zona (FETCH), el tiempo (DURACION) que actúa el viento y su VELOCIDAD ya que ellas afectan el crecimiento de las olas. La primera zona donde se genera el oleaje se llama "ZONA DE GENERACION" que, generalmente se presenta para la condición de aguas profundas. Al avanzar las olas estas se alejan de la zona donde fueron generadas y sus características son modificadas, ya que la acción del viento no influye sobre ellas. Esta etapa del oleaje se realiza en una segunda zona llamada de "DECAIMIENTO", en la cual las olas decrecen en altura ya que se separan por periodos. Por último, al acercarse a la costa, las olas dejan de estar en aguas profundas y pasan a una tercera zona donde sufren modificaciones por efecto del fondo, a lo cual se le llama "ZONA DE AGUAS INTERMEDIAS" y "SOMERAS" en donde se produce la "REFRACCION DEL OLEAJE", que depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda.

Esta información misma que se muestra en la Figura III.2.2.1 se procesó de la siguiente manera:

- a) Puesto que estos registros no proporcionan número de observaciones, sino que se trata de mediciones ya procesadas y que representan las medidas mensuales, se consideró que cada una de éstas --- representaba un periodo de observación, de esta manera se tenía 12 x 19 observaciones.

- b) Con base en la consideración anterior, se obtuvieron por cada dirección (12 en total) la frecuencia en porcentaje (%) y la velocidad media, mismas que se encuentran en las Figuras III.2.2.2 a la III.2.2.4.

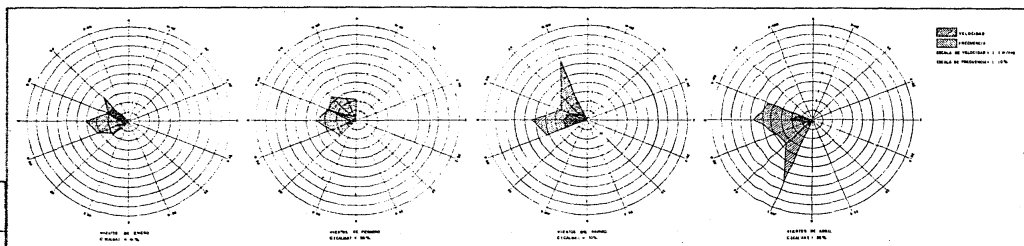
Asimismo, en la tabla III.2.2.1 se resume el comportamiento de los vientos durante los últimos 19 años.

Cabe destacar el hecho de que este análisis se extrapoló en realidad a Tóbari, puesto que los registros, como se mencionó anteriormente, corresponden a Cd. Obregón, distrante 40 Km. de la Bahía de Tóbari, sin embargo, al no existir zonas montañosas ni obstáculos que pudieran alterar considerablemente las velocidades y trayectorias del viento se consideró que bajo estas condiciones el error sería mínimo.

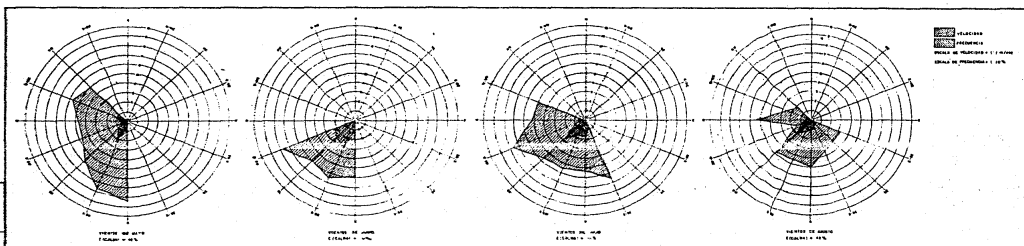
FIGURA 111.2.2.1 REGISTROS DE VIENTO DOMINANTE Y SU VELOCIDAD MEDIA

ARO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
1961	C	C	C	C	5.1 NW	7.2 WSW	INC.	C	C	C	C	C
1962		C	C	C	C	7.3 WSW	C	C	C	C	C	C
1963					C	9.0 WSW	5.2 W	C	C	C	INC.	C
1964	C	2.2 N	6.7 NNW	C	C	5.6 SW	6.2 SSW	C	INC.	C	C	C
1965	C	C	C	5.2 SE	C	C	6.6 SSE	C	C	C	C	C
1966	C	C	C	C	C	C	3.8 S	C	C	C	C	C
1967	C	C	C	INC.	8.4 S	5.5 S	5.1 S	3.4 S	C	C	C	C
1968	C	C	C	C	C	6.4 S	7.0 S	C	C	C	C	C
1969	C	C	5.5 W	C	C	7.6 SW	C	C	C	V	C	C
1970	1.7 WNW	2.1 WSW	3.7 WSW	4.2 W	C	6.1 SSW	5.8 SW	9.3 SW	2.5 S	2.7 WSW	0.9 WSW	W
1971	4.0 W	4.0 S	4.5 WSW	6.1 W	5.8 WNW	5.0 SW	0.6 WSW	1.9 NW	3.4 NW	3.7 NW	2.4 NW	2.4 NW
1972	4.5 NW	2.8 WNW	3.5 W	5.3 WNW	5.7 WNW	7.4 WSW	7.0 WSW	7.0 SW	3.1 WNW	4.5 WNW	3.1 NW	5.0 WNW
1973	3.4 WNW	2.9 WNW	3.4 W	5.5 W	4.4 SW	7.0 SSW	5.2 SW	3.7 SW	4.4 SSW	5.3 SW	3.6 SW	2.7 W
1974	1.8 SW	2.3 SW	3.7 WSW	3.8 NE	4.7 WSW	5.1 SSW	3.8 SSW	2.0 WSW	4.2 WSW	5.2 WSW	2.1 W	1.3 WNW
1975	3.2 WSW	3.3 WSW	4.7 WSW	3.9 WSW	7.8 SSW	6.6 SSW	5.9 SW	1.1 WSW	3.9 WSW	3.9 WSW	2.6 WSW	2.0 W
1976	1.4 WNW	2.3 WNW	1.8 WNW	7.1 SSW	7.2 SSW	6.3 SSW	6.6 SSW	5.4 W	4.2 SW	3.4 W	1.8 WNW	1.8 WNW
1977	2.2 WNW	2.3 WNW	3.5 WNW	3.9 WNW	7.3 SW	8.2 SSW	6.9 SW	5.6 SW	4.6 WNW	3.8 W	4.0 WNW	2.6 WNW
1978	2.6 NW	4.1 WNW	2.7 WNW	3.4 SW	5.8 SSW	5.7 SW	4.6 SW	6.4 S	6.0 SSW	6.3 W	4.5 NW	3.3 NW
1979	3.0 NW	3.5 NW	6.4 W	7.0 W	7.7 SSW	6.1 SW	5.0 WNW	3.2 ESE	6.3 SW	4.2 NW	2.9 N	2.7 N

TESIS PROFESIONAL
 DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
 FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
 FIGURA II.2.2. 2.2 NOVIEMBRE DE 1983



TESIS PROFESIONAL
 DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
 FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
 FIGURA III.2.2.3 NOVIEMBRE DE 1983



TESIS PROFESIONAL
 DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
 FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
 FIGURA III.2.2.4 NOVIEMBRE DE 1983

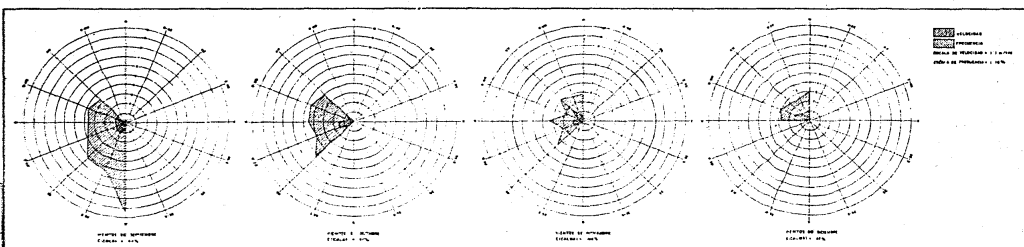


TABLA III.2.2.1. Velocidad y frecuencia del viento (1961-1979). Cd. Obregón, Sonora.

(1) Dirección	(2) Frecuencia (%)	(3) n	(4) Velocidad media (m/s)
N	1.83	4	2.28
S	4.11	9	6.14
W	9.13	20	4.40
NE	0.46	1	3.80
NW	6.39	14	3.31
SE	0.46	1	5.20
SW	10.50	23	4.93
NNW	0.46	1	6.70
WNW	10.96	24	3.20
WSW	10.96	24	4.14
SSW	7.30	16	6.53
ESE	0.46	1	3.20
CALMAS	36.53	80	0

- c) Con la tabla III.2.2.1 se construyó un diagrama graficando por separado la velocidad y la frecuencia del viento. Dicho diagrama se muestra en la Figura III.2.2.5.
- d) Se construyó finalmente un diagrama de LENZ, Figura III.2.2.6, el que se obtuvo multiplicando la frecuencia por la velocidad del viento para cada dirección, es decir, la multiplicación de la columnas (2) * (4) de la tabla III.2.2.1. dando como resultado la tabla III.2.2.2.

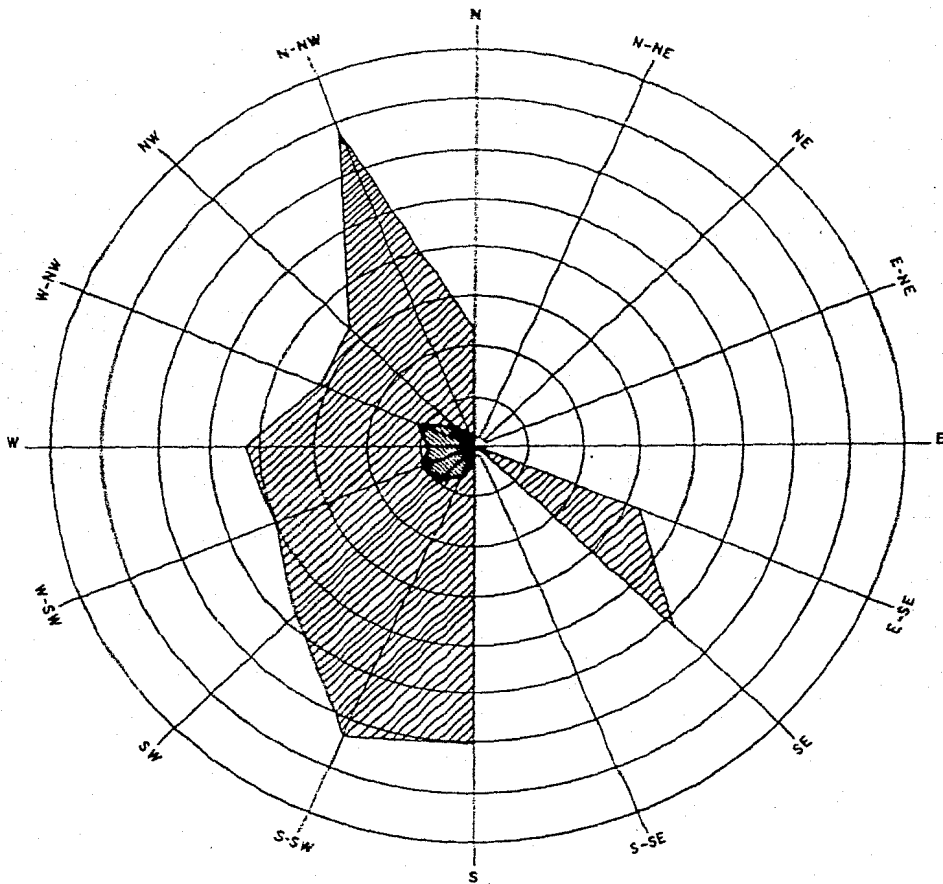
Del análisis de ambos diagramas se puede concluir que los vientos dominantes se presentan en las direcciones W, WSW, SW, SSW y WNW.

Para el análisis del oleaje en la Bahía de Tóbari, se tomó la información que aparece en las cartas del "SEA y SWELL" (generación y propagación de olas), a partir de los cuales se obtuvieron la altura de las olas así como la frecuencia de incidencia, clasificando la altura de las mismas según la tabla siguiente:

TIPO DE OLA	ALTURA DE LA OLA
BAJA	0.30 - 0.60 m
MEDIA	0.60 - 1.20 m
ALTA	> 1.50 m

VIENTOS: DOMINANTES Y SU VELOCIDAD MEDIA
CIUDAD OBREGON, SONORA



TESIS PROFESIONAL
DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
FIGURA I II.2.2.5 NOVIEMBRE DE 1983



ESCALAS

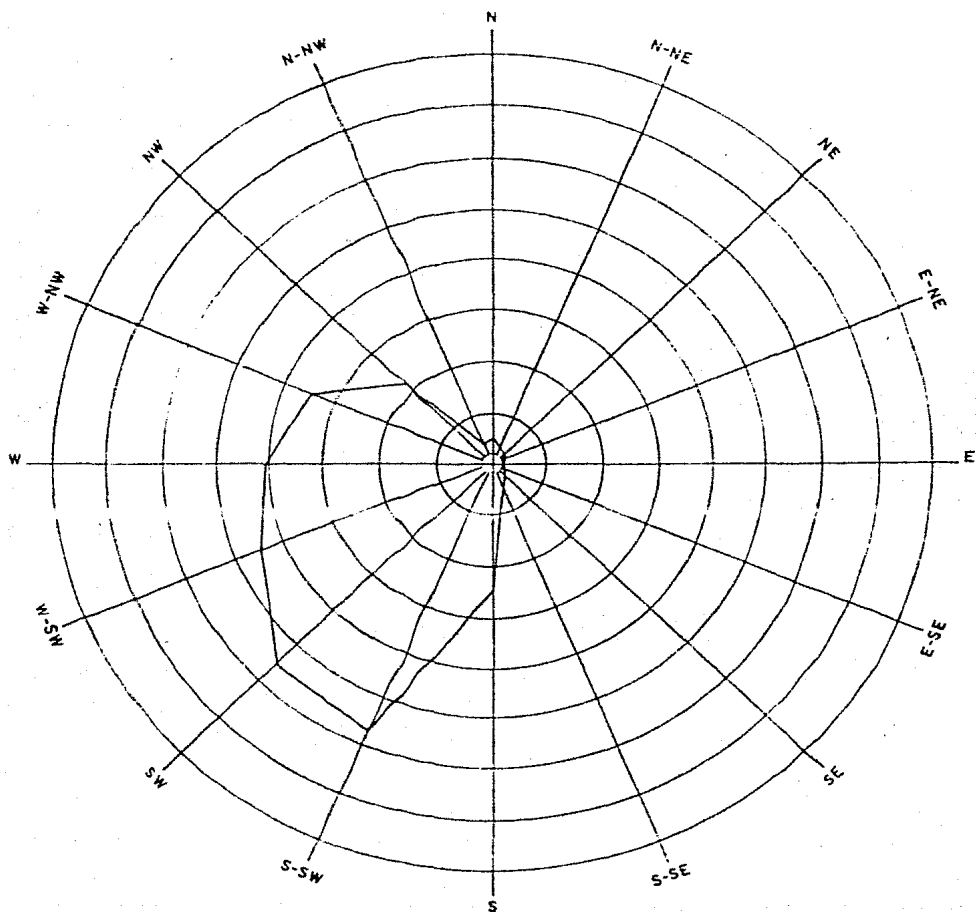
VELOCIDAD 1/1 m./seg.
FRECUENCIA 1/10%

SIMBOLOGIA

 VELOCIDAD
 FRECUENCIA

VIENTOS: DIAGRAMA DE LENZ
CIUDAD OBREGON. SONORA

TESIS PROFESIONAL
DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA
FACULTAD DE INGENIERIA UN.A.M.
FIGURA III. 2. 2. 6 NOVIEMBRE DE 1983



ESCALAS
LENZ 1:10%

TABLA III.2.2.2. Cálculo del % (fiVi) para la Construcción del Diagrama de Lenz.

DIRECCION	FRECUENCIA AL AÑO (%)	PORCENTAJE (LENZ)
N	1.83	4.17
S	4.11	25.24
W	9.13	40.17
NE	0.46	1.75
NW	6.39	21.15
SE	0.46	2.39
SW	10.5	51.77
NNW	0.46	3.08
WNW	10.96	35.07
WSW	10.96	45.37
SSW	7.30	47.67
ESE	0.46	1.47

Siguiendo este criterio y con la información proporcionada por las cartas "SEA y SWELL" se obtuvieron la frecuencia y magnitud del oleaje para cada dirección, resultados que se muestran en las Figuras III.2.2.7 y III.2.2.8, y que al igual que el análisis de vientos se concluye que las direcciones predominantes del oleaje son; NW, W, SW y S.

III.2.3. Análisis Ciclónicos.

En determinadas épocas del año, en distintos lugares de la tierra se forman zonas de presión notoriamente bajas y hacia ellas sopla el viento con gran intensidad, creando una especie de remolino gigantesco al fluir el aire hacia la región que circunda a la zona central, de presión muy baja. A este fenómeno se le llama "Ciclón", aunque recibe también otros nombres y se clasifica de distintas maneras.

Los ciclones se desplazan de manera más o menos casual, engendrando, muchas veces, los oleajes más grandes puesto que estos alcanzan velocidades del viento, por lo general superiores a los 100 Km/Hora, suficiente para ir destruyendo lo que encuentren a su paso, como sucedió con el bordo que comunica a la Isla Huivulai con el continente bajo la acción del ciclón "Pauline" (28 de Septiembre al 3 de Octubre de 1968) alcanzado vientos mayores a los 100 Km/Hora.

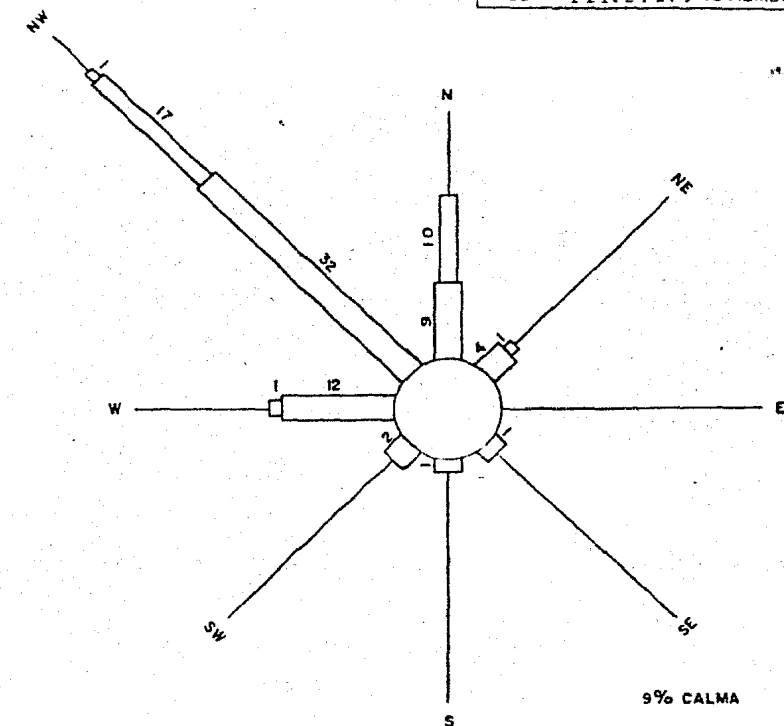
DIAGRAMA ANUAL DE INCIDENCIA DE OLAJE (SEA)
BAHIA DE TOBARI, SONORA

TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEDA

FACULTAD DE INGENIERIA UN.A.M.

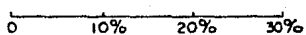
FIGURA III.2.2. 7 NOVIEMBRE DE 1983






9% CALMA

SIMBOLOGIA

ESCALA DE FRECUENCIA



FRECUENCIA { 12 % DE INCIDENCIA

ALTURAS DE OLA	PIES
	1-2 PIES
	3-4 PIES
	> 5 PIES

NOTA:

LOS % MENORES AL 1% NO SE GRAFICARON

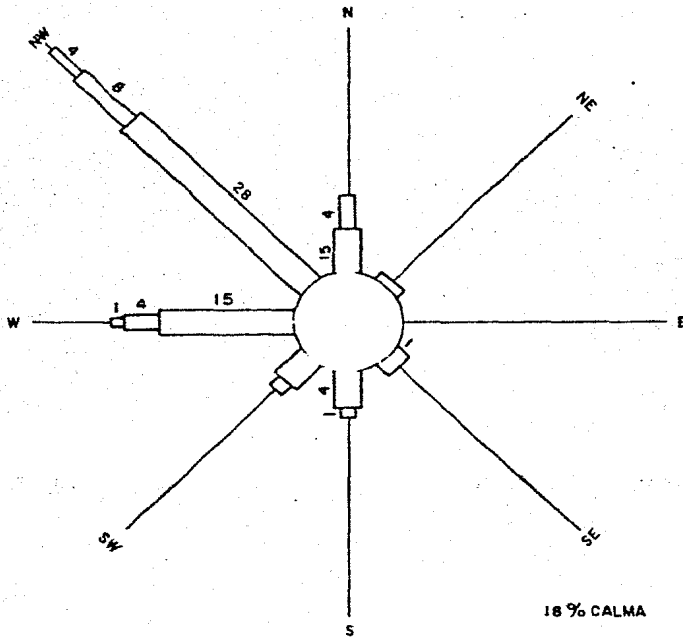
DIAGRAMA ANUAL DE INCIDENCIA DE OLEAJE (SWELL)
BAHIA DE TOBARI, SONORA

TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA

FACULTAD DE INGENIERIA UN.A.M.

FIGURA III. 2. 2. 8 NOVIEMBRE DE 1983



18 % CALMA

SIMBOLOGIA

ESCALA DE FRECUENCIA

0 10% 20% 30%

FRECUENCIA {

4

% DE INCIDENCIA

ALTURAS
DE OLA {



1-2 PIES



3-4 PIES



> 5 PIES

NOTA:

LOS % MENORES AL 1% NO SE GRAFICARON

Mar adentro, en las zonas donde estos fenómenos se crean, se pueden conocer las principales características que los definen, tales como su posición, la velocidad del viento que pueden alcanzar, la trayectoria seguida por el mismo y su radio de curvatura, etc. En la figura III.2.3.1 se muestra la trayectoria del ciclón "Puline" y la posición relativa de la Bahía de Tóbari.

III.3. Cálculo de Algunos Parámetros de Interés.

III.3.1 Refracción del Oleaje

Conforme el oleaje se traslada a aguas someras, el cambio de profundidad causa una disminución en la celeridad y como consecuencia su longitud disminuye y su altura aumenta y el frente de ese oleaje se reorienta conforme a los contornos del fondo, también llamadas líneas batimétricas. Ese efecto se llama refracción del oleaje, el cual depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda (d/L), ver figura III.3.1.1.

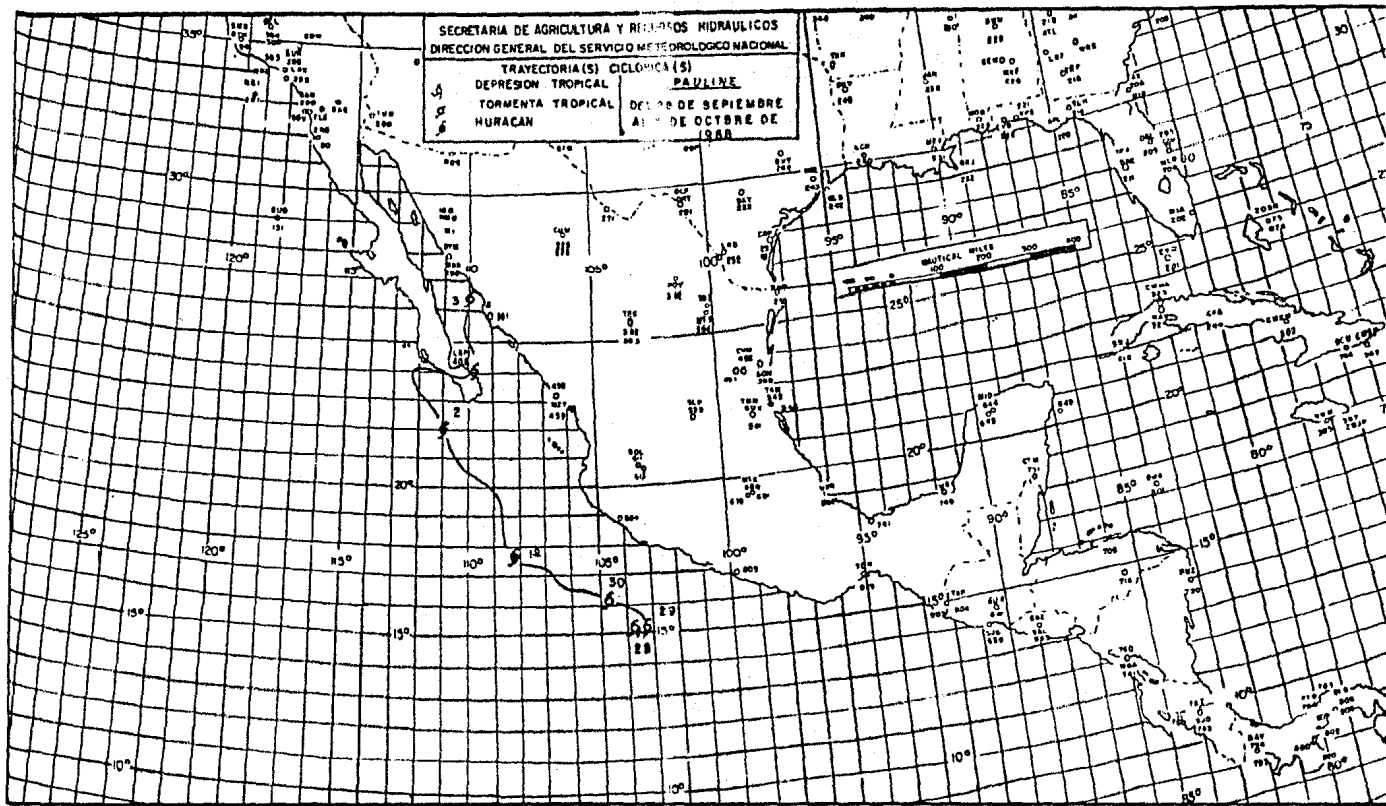


FIGURA 111.2.3.1 TRAYECTORIA DEL CICLON "PAULINE" 28 SEPT.-30 OCT. 1968

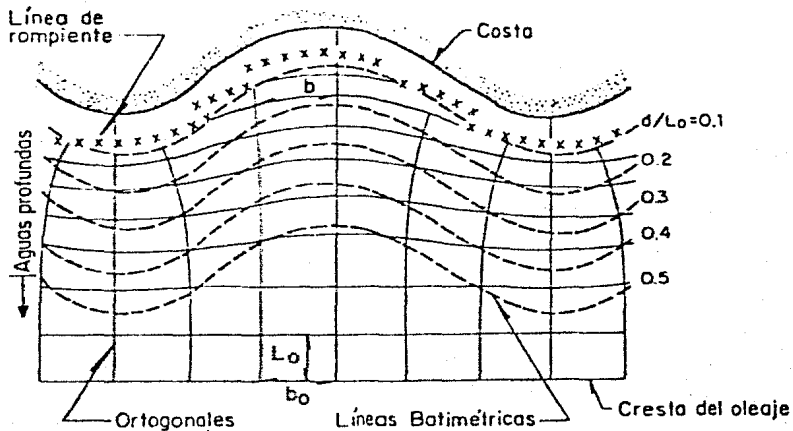


FIGURA IIL 3.1.1 Refracción del oleaje

FUENTE: Manual de diseño de obras civiles (Hidrotecnia)
 Comisión Federal de Electricidad.
 Instituto de Investigaciones Eléctricas.

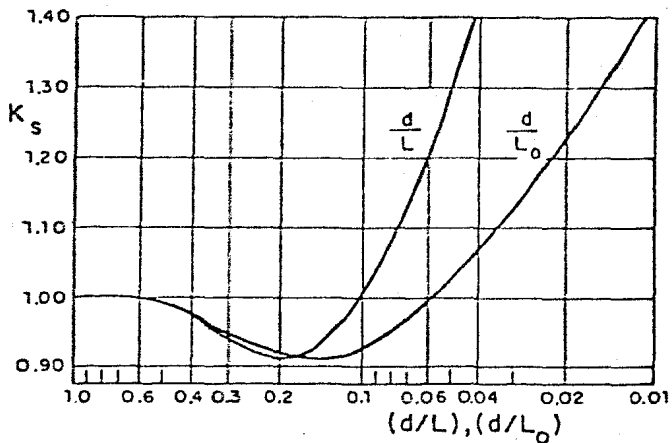


FIGURA IIL 3.1.2 Coeficiente de propagación K_s

En el estudio de la refracción se supone que cuando una onda avanza hacia la playa, no existe dispersión lateral de energía a lo largo de su frente, es decir, la energía transmitida permanece constante entre dos líneas ortogonales (trazadas perpendicularmente al frente de las ondas).

La potencia o flujo de energía del oleaje transmitido hacia adelante entre dos ortogonales adyacentes, en aguas profundas se expresa por:

$$P_o = \frac{1}{2} b_o E_o C_o = C_{go} B_o E_o \quad (A)$$

Donde:

b = Es la separación entre dos ortogonales adyacentes.

E = Es la energía del oleaje

C_g = Es la celeridad de grupo.

Nota: El sub-índice "o" se refiere a la condición de aguas profundas.

Este mismo flujo de energía transmitido hacia adelante entre las mismas dos ortogonales adyacentes, pero en aguas someras, está expresada por:

$$P = nbEC = C_g b E \quad (B)$$

Aceptando que la energía se conserva entre ortogonales, al igualarse las ecuaciones (A) y (B) y sustituyendo el valor de:

$E = (\gamma H^2)/8$ y $C = L/T$, se obtiene que:

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{L_0}{2nL} \frac{b_0}{b} \right)^{1/2} = K_s K_r \quad (C)$$

Donde: K_s = Es el coeficiente de propagación (en aguas someras)

K_r = Es el coeficiente de refracción.

Ambos coeficientes están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$K_s = \left(\frac{L_0}{2nL} \right)^{1/2} = \left(\frac{C_{g0}}{C_g} \right)^{1/2} \quad (D)$$

$$K_r = \left(\frac{b_0}{b} \right)^{1/2} \quad (E)$$

El valor de n está definido por:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(4\pi d) / L}{\text{Sen } h (4\pi d/L)} \right) \quad (F)$$

La ecuación (C) permite valuar la altura de la ola, tanto en aguas intermedias como en las someras a partir de las características del oleaje en aguas profundas, siempre y cuando se puedan determinar las sepa-

raciones entre ortogonales adyacentes; así mismo, en esta ecuación se puede observar que son dos los efectos que produce el cambio de profundidad en el oleaje. Si los frentes del oleaje son paralelos a las líneas batimétricas se cumple que $(b/b_0) = 1$, y por lo tanto solo se produce el primer efecto cuantificado por K_s ; el coeficiente K_s toma en cuenta la disminución de la longitud de onda producida por la disminución en profundidad y el cambio en su altura, ya que debe conservarse el flujo de energía a lo largo de áreas de ancho unitario y altura igual a la profundidad. El segundo efecto se produce cuando los frentes de onda forman un ángulo con las líneas batimétricas, debido a lo cual las ortogonales dejan de ser paralelas; esto es cuantificado por K_r . Este segundo efecto, generalmente, se produce acompañado del primero.

Con ayuda de la Figura III.3.1.2, es posible estimar el valor de coeficiente de propagación en aguas someras, K_s , en función de d/L ó d/L_0 . Como puede observarse, en aguas profundas $K_s = 1.0$. En cuanto a K_r , este depende solo del periodo de la ola, de la profundidad y la dirección inicial del oleaje. Generalmente, para calcular los valores de b_0 y b se contruye un plano o diagrama de refracción, además las ortogonales pueden tender a converger o diverger; para el primer caso se tiene un incremento de la energía por unidad de área y como consecuencia de ello un aumento de la altura de la

ola, por el contrario para el segundo caso se tiene una disminución de la energía por unidad de área y por tanto una reducción en la altura de la ola.

La altura, periodo y dirección del oleaje en aguas profundas podrá ser determinado ya sea en cartas sinópticas o por mediciones directas.

En la Bahía de Tóbari, y con el propósito de llevar a cabo un análisis de refracción de oleaje, se obtuvo información de las cartas de levantamiento de profundidades realizadas por la armada de E.U.A. para el Golfo de California y editadas por la Secretaría de Marina:

El procedimiento seguido para el análisis fue el siguiente:

- a) A partir de las cartas de profundidades para el Golfo de California se reprodujo una ampliación de escalas y luego se construyó una malla de 170 Km. en dirección paralela a la costa y de 80 Km. en dirección mar adentro. Esta malla es necesaria para reproducir la evolución del oleaje hasta su incidencia en la costa por medio de un programa para computadora digital, el cual proporciona el avance del rayo por medio de coordenadas. El eje Y corresponde a un eje aproximado paralelo a

la costa mientras que el eje X será perpendicular a dicho eje, en dirección positiva hacia mar adentro. El tamaño del cuadro utilizado fue de 5 Km x 5 Km (2.24 cm x 2.24 cm).

- b) Una vez que la malla estuvo lista, se alimentó al programa con la información general del problema, proporcionándosele como condición de partida, la posición y dirección iniciales para 12 rayos de oleaje, según los diagramas de magnitud y frecuencia de incidencia para oleaje distante y local (SEA y SWELL), teniéndose entonces las direcciones Oeste (W), Sur (S), Noroeste (NW) y Suroeste (SW) y considerándose además 3 diferentes periodos de oleaje según las alturas de ola que establecen las cartas de "SEA y SWELL", mismos que se obtuvieron con base a las siguientes expresiones:

$$T = 2.22 H^{1/2} \quad ; \quad T = 2.835 H^{0.4038}$$

arrojando resultados muy parecidos entre sí, tal como lo muestra la Tabla III.3.1.1.

Para la selección de los valores de los diferentes periodos a utilizar en el análisis se aproximaron los valores obtenidos a cifras enteras, por lo que quedaron 3,5 y 7 segundos como periodos significantes de las olas

bajas, medias y altas respectivamente, en la Figura III.3.1.3, se muestran los diagramas de refracción correspondientes.

Los coeficientes de refracción (K_r) y los ángulos de incidencia (α) obtenidos para los diferentes canales de energía en las diferentes direcciones analizadas, se muestran en las tablas siguientes:

Dirección Oeste (W)

CANAL	bo (m)	bl (m)	bo/bl	$K_r = \sqrt{bo/bl}$	α°
I	10711.4	12943.0	0.83	0.91	0°
II	"	11157.75	0.96	0.98	-
III	"	12273.53	0.87	0.93	42°
IV	"	11604.06	0.92	0.96	42°
V	"	11827.22	0.91	0.95	10°
VI	"	11157.75	0.96	0.98	33°
VII	"	8926.20	1.20	1.10	24°
VIII	"	10488.29	1.02	1.01	15°
IX	"	11827.22	0.91	0.95	12°

$$K_r = 0.97 \quad \alpha = 22^\circ$$

H (pies)	$T = 2.22H^{1/2}$ (seg)	$T = 2.835(h)^{0.4038}$ (seg)	T considerado (seg)
2.72 (bajas)	2.72	3.34	3.0
3.50 (Medias)	4.15	4.70	5.0
5.50 (altas)	5.21	5.64	7.0

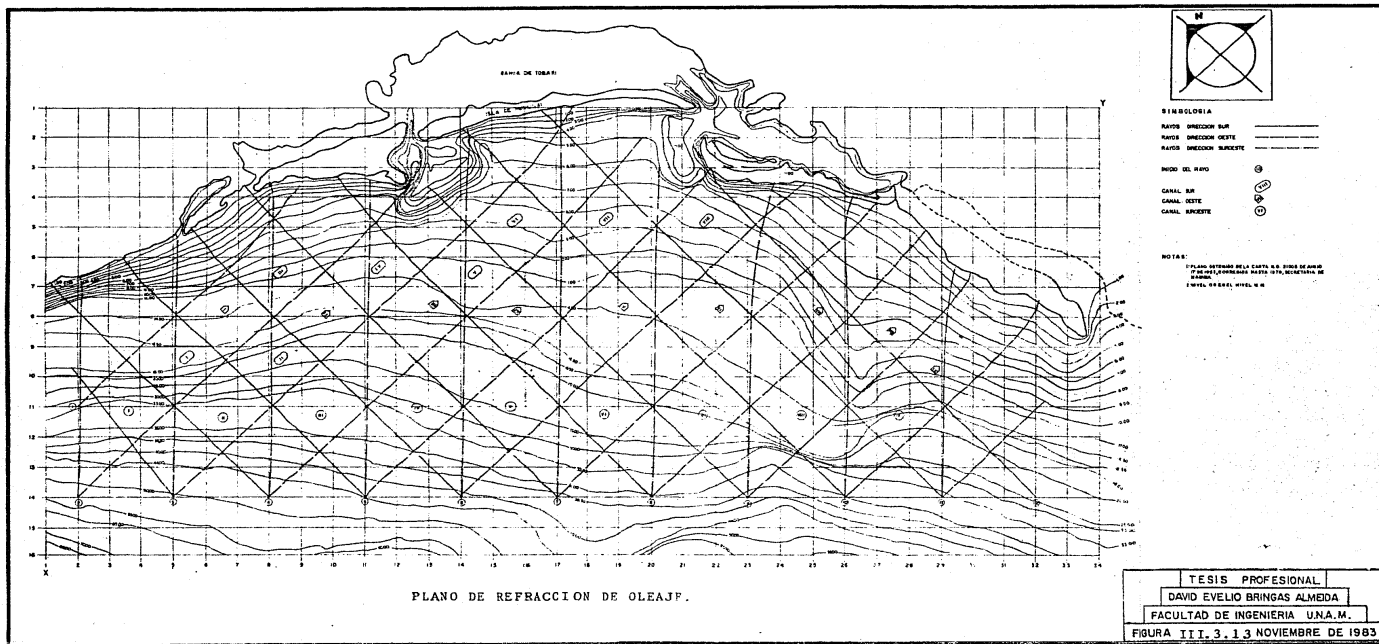
Tabla III.3.1.1.

Dirección Sur (S)

CANAL	bo (m)	bi (m)	bo/b1	$K_r = \sqrt{\frac{b_o}{b_1}}$	α °
I	10934.60	11715.64	0.93	0.97	10°
II	"	11827.22	0.92	0.96	10°
III	"	10934.60	1.00	1.00	10°
IV	"	12161.95	0.90	0.95	5°
V	"	10376.71	1.05	1.03	25°
VI	"	10934.60	1.0	1.0	35°
VII	"	10488.20	1.04	1.02	30°
VIII	"	12719.84	0.86	0.93	30°
				$\bar{K}_r = 0.98$	$\bar{\alpha} = 19^\circ$

Dirección Suroeste (SW)

I	15000	-	-	1.0	0°
II	"	-	-	1.0	0°
III	"	-	-	1.0	0°
IV	"	15174.54	0.99	0.99	0°
V	"	-	-	1.0	10°
VI	"	15844.01	0.95	0.97	-
VII	"	17852.40	0.84	0.92	15°
VIII	"	12496.68	1.2	1.10	10°
IX	"	17406.09	0.86	0.93	15°



Para este caso se consideraron 2 zonas representativas: La Boca Norte (canal V) y la Boca Sur (canales VII a IX). El coeficiente de refracción y el ángulo de incidencia obtenidos para cada caso fueron:

BOCA	K_r	α°
Norte	0.99	10°
Sur	0.98	13°

III.3.2 Transporte Eólico.

Es verdaderamente importante que, para el oleaje más frecuente, de altura de olas de tamaño intermedio, no obstante las variaciones del nivel medio del mar, se establecen, tierra adentro, dos zonas más o menos bien marcadas. La primera llamada BERMA, está situada por encima del nivel medio del mar, cuando éste alcanza su valor más alto. La segunda, llamada DUNA, se forma por el acarreo eólico que se produce cuando la arena es transportada por el viento que ocurre de mar a tierra, Figura III.3.2.1.

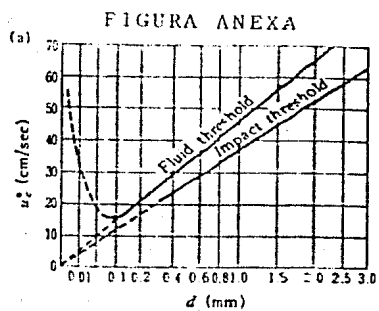
Al producirse este transporte eólico, puede suceder que se formen las dunas o que ocasionalmente se obstruyan bocas o accesos de cuerpos costeros de agua; de aquí que la determinación de su magnitud sea un aspecto importante en la ingeniería de costas. A este respecto, y para fines del presente trabajo, se puede evaluar el transporte de arena por viento en función de la fórmula propuesta por BAGNOLD, la cual evalúa el gasto de arena transportada por unidades de ancho y tiempo:

$$Q = c \frac{d}{D} \frac{\rho}{g} (u^*)^3$$

donde: d = Es el diámetro del grano, medido en mm.

ρ = Es la densidad del aire.

g = Es la aceleración de la gravedad



Movimiento incipiente del sedimento

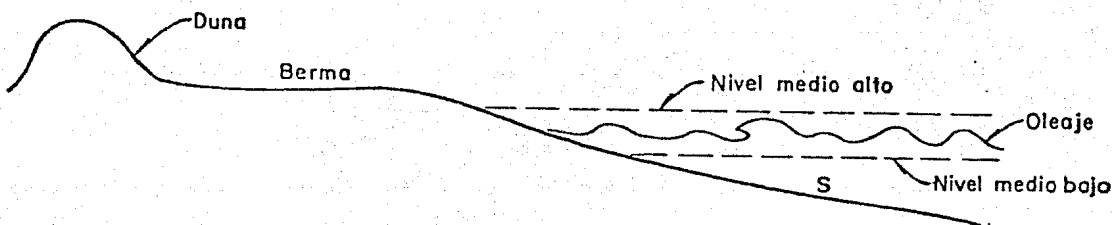


Figura III.3.2.1.

D = Es el diámetro estandar utilizado por BAGNOLD en sus experimentos, D= 0.25 mm.

c = Es un coeficiente empírico que varía en función de la uniformidad de la distribución de los granos de arena según la tabla III.3.2.1.

TABLA III.3.2.1.

C	Distribución de los granos de arena
1.5	Casi uniforme
1.8	Arena natural
2.8	Arena ampliamente distribuida

u^* = Es la velocidad "tractiva", y se obtiene a partir de la ecuación;

$$U = 5.75 u^* \log_{10} \frac{Z}{Z'} + u'$$

donde: Z' y u' son constantes experimentales obtenidas

como sigue: $Z' = 10d$, en mm

$u' = 8.94d$, en m/seg.

u = Es la velocidad del viento a una elevación Z sobre la superficie de la arena.

De esta manera, si aplicamos las expresiones anteriores al caso específico de Tóbari se tendría:

Cálculo de la velocidad del viento a una elevación Z sobre la superficie de la arena.

Puesto que en este caso se consideraron, según se dijo anteriormente, los datos de vientos para Cd. Obregón, a 40 Km. de Tóbari, se pudo comprobar con base en los registros proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (período 1961 - 1979), que la velocidad media de los vientos máximos durante dicho período era de 19.5 m/seg.

Si consideramos por otro lado que estos datos provienen del puerto aéreo de esa Ciudad y que además el anemómetro se encuentra localizado sobre la torre de control de aproximadamente 12 metros de altura, entonces con base en estos datos se puede sugerir un valor para la velocidad tractiva;

En estas condiciones y aplicando la ecuación:

$$U = 5.75 u^* \log_{10} \frac{Z}{Z'} + u'$$

con los datos:

$$U = 19.5 \text{ m/seg}$$

$$Z = 12 \text{ m} = 12\,000 \text{ mm}$$

$$Z' = 10 \text{ d y con } d=0.4 \text{ mm entonces } Z' = 10(0.4 \text{ mm}) = 4.0 \text{ mm}$$

$$u' = 8.94 \text{ d y con } d=0.4 \text{ mm; } u' = 8.94 (0.4 \text{ mm}) = 3.58 \text{ m/seg.}$$

entonces;

$$19.5 \text{ m/seg} = 5.75 u^* \log_{10} \frac{12\,000 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} + 3.58 \text{ m/seg.}$$

$$\therefore 19.50 = 20 u^* + 3.58$$

$$y u^* = 0.8 \text{ m/seg} = 80 \text{ cm/seg.}$$

Utilizando ahora este valor en la expresión de Bagnold, se tiene:

$$Q = c \frac{d}{D} \frac{\rho}{g} (u^*)^3$$

Datos:

$$c = \text{arena ampliamente distribuida} = 2.8$$

$$d = 0.4 \text{ mm} \quad + \quad Q = 2.8 \left(\frac{0.4}{0.25} \right) \left(\frac{0.001293}{981} \right) (80)^3$$

$$D = 0.25 \text{ mm}$$

$$\rho = 0.001293 \text{ g/cm}^3 \quad \therefore Q = 2.4 \text{ gramos / cm - seg.}$$

$$g = 981 \text{ cm/seg}^2$$

$$u^* = 80 \text{ cm/seg.}$$

Con objeto de tener otro criterio de comparación se calculará ahora el transporte de arena por viento mediante otro método alternativo de cálculo propuesto por Kawamura, quien considerando resultados experimentales propuso la siguiente expresión:

$$q = K \frac{\rho}{g} (u - u_c^*) (u^* + u_c^*)^2$$

donde u_c^* corresponde al valor crítico de la velocidad del viento; es decir, cuando el movimiento de los granos es incipiente. u_c^* se obtiene de la gráfica (figura anexa).

Figura localizada en la página 71 .

K es una constante experimental cuyo valor corresponde a 2.78. El resto de los variables involucrados tienen el mismo significado que en la expresión de Bagnold.

En estas condiciones y para el caso de Tóbari que puede ser calculado de la siguiente manera:

Cálculo de la velocidad crítica:

Puesto que se conoce el diámetro del grano del material playero, el cual se ha dicho es $d=0.4$ mm, de tal forma que considerando este valor, de la figura se obtiene $u_c^* = 30$ cm/seg. y el transporte de arena puede ser calculado como:

$$q = 2.78 \frac{0.001293}{981} (80 - 30) (80 + 30)^2$$

$$\therefore q = 2.22 \text{ gramos/cm} \cdot \text{seg.}$$

Como puede verse, la discrepancia entre ambos métodos no resulta significativa, lo cual se ha visto, sucede generalmente cuando los vientos adquieren fuertes velocidades, como en este caso.

Ahora bien, con objeto de tener una idea del volumen de arena que sería transportado en caso de vientos de características ciclónicas, se procederá a repetir el procedimiento de cálculo para una velocidad de 100 Km./hora = 27.8 m/seg., que corresponde a la velocidad máxima en Tóbari durante el paso del ciclón "Pauline" en Octubre de 1968.

En estas condiciones:

$$27.8 = 5.75 u^* \log_{10} \frac{12\ 000}{4} + 3.58$$

de donde $u^* = 1.21$ m/seg. = 121 cm/seg.

y:

$q = 8.24$ gramos /cm - seg. (Por Bagnold)

$q = 7.60$ gramos /cm - seg. (Por Kawamura)

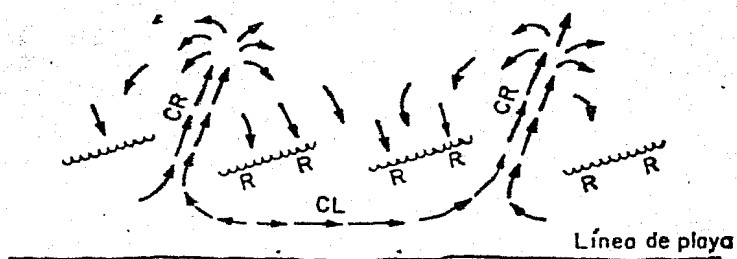
Es decir, que en promedio se puede esperar que un viento huracanado de 100 Km/hora de una duración de 6 horas, transporte $6.65 \text{ m}^3/\text{m}$ (suponiendo $\rho = 2.6 \text{ ton}/\text{m}^3$). Esto por supuesto si la dirección y magnitud del viento fueran sostenidas, lo cual es ciertamente improbable; además el grado de humedad del material playero tiene también cierta influencia sobre el transporte, sobre todo si la velocidad del viento es grande; no obstante, este efecto se considera pequeño y su evaluación en cambio resulta difícil, por lo que se consideró despreciable en los cálculos anteriores.

III.3.3 Transporte Litoral

El movimiento de rotación de la tierra, las diferencias de temperatura y salinidad dan lugar al movimiento de grandes masas del mar que se llaman corrientes oceánicas. Además las mareas ocasionan también corrientes de agua considerables que, evidentemente, se designan como corrientes de marea.

Por otra parte, el oleaje crea, en la zona de aguas poco profundas, un complejo conjunto de corrientes que se designan como sistema de corrientes próximo a la playa.

Como se indica en la Figura III.3.3.1, este sistema está constituido principalmente por dos tipos de corrientes. Una de ellas, aproximadamente paralela a la playa y dirigida en el sentido del oleaje, se llama litoral. La otra, hacia mar afuera y más o menos normal a la playa, se llama corriente de resaca. Esta última avanza hasta una zona mar adentro en donde se disipa. De esta manera se produce una circulación como la presentada por las flechas en la figura mencionada. Es interesante observar que aún cuando la corriente litoral tiene pequeños componentes en sentido contrario, presenta una clara tendencia principal. Por lo demás, si aumenta la inclinación del oleaje y la altura de la ola, las corrientes de resaca tienden a desaparecer, aunque persiste aproximadamente el mismo sistema



CR, corriente de resaca
CL, corriente litoral
RR, rompientes

Figura III.3.3.1.

general de circulación. Por lo demás, para oleajes moderados, que inciden normalmente a la playa, la corriente litoral fluye simétricamente hacia las dos corrientes de resaca contiguas y la tendencia principal desaparece.

Entre otros factores, las corrientes y el oleaje mueven continuamente el material de las playas, formando y modificando bajos, tómbolos y bahías. Por ello resulta de interés el conocimiento de los volúmenes de material transportado; la mejor forma de llegar a este conocimiento es la medición directa en el campo, pero por la urgencia de la construcción de algunas obras no siempre es posible hacerla.

Por otra parte, se puede decir que son dos las características del material que forma las playas, constituidas normalmente por arena. La primera es la densidad relativa, (ρ_s) sin unidades, y la otra es la granulometría. Esta última se expresa en términos de "diámetros" característicos, siendo el más usado el D_{50} .

El arrastre de material costero producido entre la batimétrica cero y la rompiente así como el material que un oleaje produce dentro de la zona de resaca y fuera de ella, recibe el nombre de arrastre litoral, siendo usualmente estimado en m^3/seg .

Además, el fenómeno del transporte litoral se produce cuando las olas rompen oblicuamente sobre la playa, formando en cierto ángulo α con la costa, arrastrando el material hacia la playa y en esa dirección.

Para su evaluación se acepta que es función de las características del oleaje y del material playero, de esta manera, existen actualmente diversos criterios que consideren de una u otra forma tanto las características de las olas como las del material que conforma la playa.

Para los fines del presente trabajo se evaluó el gasto sólido transportado según los tres criterios que se muestran a continuación:

CRITERIOS UTILIZADOS PARA LA EVALUACION DEL GASTO SOLIDO

Nombre del Método	Expresión para el gasto sólido	Unidades
Larras	$Q_s = K'g Hr^2 T \text{ sen } \left(\frac{7}{4} \alpha\right)$	(m^3/seg)
Cerc	$Q_s = 3456 Ho^2 T Kr^2 \text{ sen } \alpha \text{ cos } \alpha$	$(m^3/\text{día})$
Springall	$Q_s = 1.1 \times 10^6 D Hr \frac{7}{4} \frac{\text{sen } 2\alpha}{m T}$	$(m^3/\text{día})$

donde:

Q_s = Gasto sólido (unidades según el método adoptado).

K' = Constante de Larras ($K' = 1.18 \times 10^{-6} D^{-\frac{1}{2}} \frac{L_o}{H_o}$)

Hr = Altura de la ola en la zona de rompiente (m)
 $(Hr = HoKr * 0.562T^{0.44})^{0.82}$

T = Periodo de la ola (seg.)

- α = Angulo de incidencia del oleaje (grados)
- D = Diámetro representativo del material playero (D_{50});
para la expresión de Larras es en mm y para la
expresión de Springal en m.
- m = Pendiente media de la playa (%).
- Lo = Longitud de la ola en aguas profundas (m)
- Kr = Coeficiente de refracción según la dirección analizada.

El tamaño medio del grano del material playero utilizado corresponde a un valor de 0.4 mm, el cual se obtuvo del análisis granulométrico correspondiente.

La pendiente adoptada para la playa se obtuvo de mediciones realizadas en el lugar.

Para la evaluación de los volúmenes transportados anualmente se utilizó la tabla que resume la frecuencia anual del oleaje local distante y según cada dirección.

Para las direcciones seleccionadas, se obtuvieron según se puede apreciar en dicha tabla las siguientes frecuencias de incidencia en días/año.

OLEAJE LOCAL (SWELL)			OLEAJE DISTANTE (SEA)		
DIRECCION OESTE (W)					
Bajas	Medias	Altas	Bajas	Medias	Altas
45	4	0	54	14	5
DIRECCION SUR (S)					
2	0	0	14	4	2

OLEAJE LOCAL (SWELL)

OLEAJE DISTANTE (SEA) -

DIRECCION SUROESTE (SW)

Bajas	Medias	Altas	Bajas	Medias	Altas
7	1	0	17	2	0

A continuación se muestran los resultados obtenidos según cada uno de los criterios seleccionados y para cada dirección y período de oleaje.

Seguidamente se presenta un resumen de estos resultados así como el volumen neto anual según cada caso.

A continuación se muestran los resultados obtenidos según cada uno de los criterios seleccionados y para cada dirección y período de oleaje.

Seguidamente se presenta un resumen de estos resultados así como el volumen neto anual según cada caso.

GASTO SOLIDO TOBARI DIR 6 T=3

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QS(M3/DIA)	VOL(M3)
0.44	0.48	18.21	291.41

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QS(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	645.92	10334.66

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QS(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	56.45	906.43

GASTO SOLIDO TOBARI DIR 6 T=5

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QS(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	206.07	832.30

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QS(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	5824.74	23298.97

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QS(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	224.21	904.86

FUENTE: ESTUDIO Y PROYECTO DE DRAGADO EN LA BAHIA DE TOBARI,
MUNICIPIO DE ETCHOJOA, SONORA. 1981

REFERENCIA 1

GASTO SOLIDO TOBARI DIR SW (B. NTE.) T=3

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.49	10.48	251.54

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.49	348.65	8847.43

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.49	32.34	774.25

GASTO SOLIDO TOBARI DIR SW (B. SUR) T=3

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	12.91	309.77

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	462.03	11088.60

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	40.52	972.54

GASTO SOLIDO TOBARI DIR SW (B. NTE.) T=5

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.17	118.94	356.82

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.17	3324.42	9973.27

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.17	128.72	386.15

GASTO SOLIDO TOBARI DIR SW (B. SUR) T=3

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	147.46	442.37

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	4166.45	12479.35

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	161.81	485.44

GASTO SOLIDO TOPARI DIR S T=7

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.68	1.88	971.83	1943.69

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.68	1.88	20102.76	40205.53

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.68	1.88	517.74	1035.47

GASTO SOLIDO TOPARI DIR W T=3

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	20.12	1792.23

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	695.94	68897.70

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
0.46	0.48	62.30	6148.12

GASTO SOLIDO TOPARI DIR W T=5

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	229.90	4138.20

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	6275.02	112944.67

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.07	1.15	248.78	4478.11

GASTO SOLIDO TOPARI DIR W T=7

CALCULO DEL GASTO SOLIDO POR EL CRITERIO DE LARRAS

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.68	1.88	1073.78	5368.92

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DEL CERC

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.68	1.88	21639.54	108297.69

CALCULO DEL GASTO SOLIDO. CRITERIO DE SPRINGALL

HO(M)	HR(M)	QB(M3/DIA)	VOL(M3)
1.68	1.88	569.39	2846.94

RESUMEN DE VOLÚMENES TRANSPORTADOS ANUALMENTE PARA CADA DIRECCION
Y PERIODO DE OLEAJE

Arrastre litoral Volúmenes anuales (m3/año) T = 3 seg.

CRITERIO/DIR	W	S	SW (B-NTE)	SW (B-SUR)	NETO
Larras	+ 1992.23	- 291.41	+ 251.56	- 309.77	+ 1642.61
C.E.R.C.	+ 68897.70	- 10334.66	+ 8847.63	- 11088.60	+ 56322.07
Springall	+ 6168.12	- 906.43	+ 776.25	- 972.56	+ 5065.38

Arrastre litoral Volúmenes anuales (m3/año) T = 5 seg

CRITERIO/DIR	W	S	SW (B-NTE)	(SW (B SUR)	NETO
Larras	+ 4138.20	- 832.30	+ 356.82	- 442.37	+ 3220.35
C.E.R.C.	+112964.67	- 23298.97	+ 9973.27	- 12499.35	+ 87139.62
Springall	+ 4478.11	- 904.86	+ 386.15	- 485.44	+ 3473.96

Arrastre litoral Volúmenes anuales (m3/año) T = 7 seg.

CRITERIO/DIR	W	S	SW (B-NTE)	SW (B SUR)	NETO
Larras	+ 5368.92	- 1943.69	--	-	+ 3425.23
C.E.R.C.	+108297.69	- 40205.53	--	--	+ 68092.16
Springall	+ 2846.96	- 1035.47	--	--	+ 1811.49

Convención de signos:

- + El material se mueve en dirección NW a SE (B. Nte. B. Sur)
- El material se mueve en dirección SE a NW (B. Sur a B. Nte)

El volumen anual neto promedio según cada período se presenta en la siguiente tabla:

T (seg)	Volumen anual Neto (m ³)
3	+ 21 010
5	+ 31 278
7	+ 24 443

Con base en los resultados se puede entonces sugerir que el transporte anual neto esperado será entre 20 y 30 mil m³/año, aproximadamente.

III.3.4 Arrastre de Sólido en los Drenes

Con base en los datos disponibles para la Bahía de Tóbari, se realizó una evaluación aproximada con el objeto de tener una idea del volumen de material sólido arrastrado por los drenes que descargan al estuario, los que contribuyen al azolvamiento del mismo.

La evaluación fue hecha siguiendo el criterio de Duboys y Straub, quienes proponen evaluar el gasto sólido de fondo en una corriente natural con base en la siguiente expresión:

$$Q_{sb} = \psi \tau_0 (\tau_0 - \tau_c)$$

donde:

Q_{sb} = Es el gasto sólido de fondo (Kg/seg/m).

τ_0 = Es el esfuerzo cortante producido por la corriente
($\tau_0 = \gamma R S$) en Kg/m^2 .

τ_c = Es el esfuerzo cortante resistente y es función del
diámetro del grano del sedimento, en Kg/m^2 .

ψ' = Es el parámetro de Duboys, función del ϕ del grano.

Para fines prácticos τ_c y ψ' se estiman a partir de la Figura III.3.4.1 entrando en la misma con el diámetro representativo del material que constituye los sedimentos y que generalmente se considera el D_{50} en la curva granulométrica, o bien, si el material se encuentra ampliamente distribuido, se acostumbra calcular D_m como;

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n D_i P_i}{100}$$

Donde:

D_m = es el diámetro medio del material

P_i = es el % de material acumulado en peso para un diámetro D_i en la curva granulométrica.

Cálculo del arrastre del fondo:

Datos y expresiones generales.

para un: $D_{50} = 0.075 \text{ mm}$

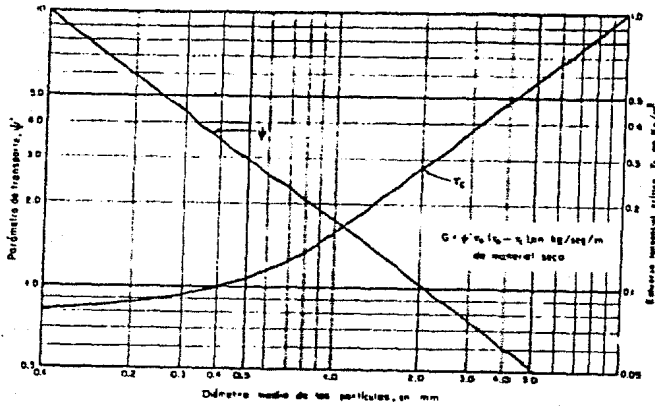
$D_{95} = 1.80 \text{ mm}$

$\tau_c = 0.08 \text{ Kg/m}^2$

$\psi' = 10$

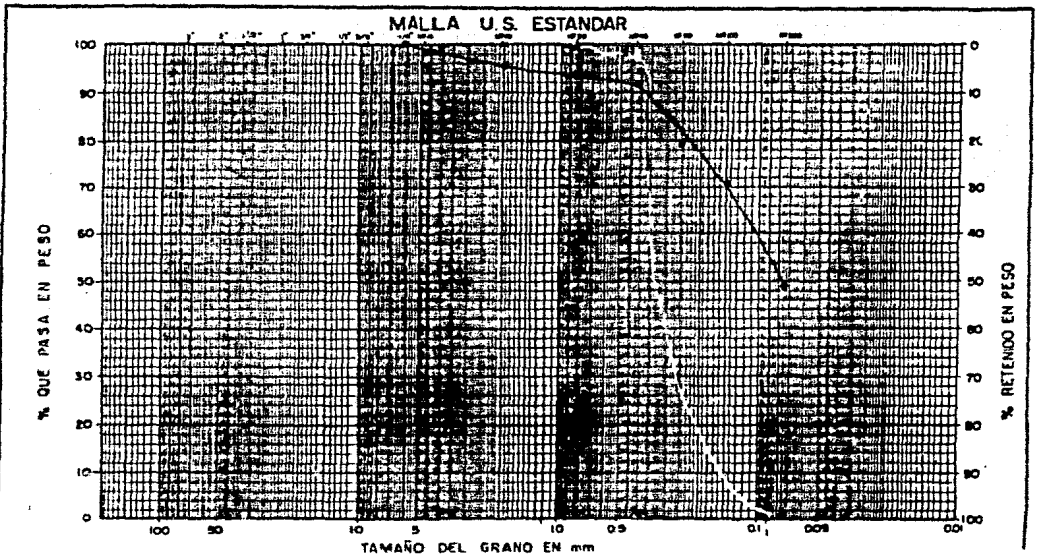
$\tau_0 = \gamma R S$

$$n = \frac{(D_{95})^{1/6}}{27} = 0.04$$



Parámetro de transporte y esfuerzo tangencial crítico para la ecuación de transporte de De Boys, según Straub

FIGURA. III.3.4.1



CURVA GRANULOMETRICA REPRESENTATIVA DEL SEDIMENTO EN EL ESTUARIO

DREN	Area	Pm	Rh	V	S	Y	Q	?	qb Kg/m/seg
Arroyo 16	8.25	10.00	0.83	0.32	0.0002	1.10	2.61	0.1660	0.1428
Cocoraque márgen derecha	9.00	9.00	1.00	0.07	7.8×10^{-6}	1.50	0.632	0.0078	Q*
Cocoraque márgen izquierda	5.40	7.00	0.77	0.19	0.0001	1.10	1.05	0.0770	0*
Cocoraquito	9.62	16.30	0.59	0.05	8.0×10^{-6}	0.70	0.495	0.0047	0*
Primario Tóbari	2.70	6.00	0.45	0.08	2.9×10^{-5}	1.20	0.210	0.0131	0*
Calle 2 600	9.80	14.00	0.70	0.05	6.4×10^{-6}	0.80	0.537	0.0045	0*

* No existe arrastre ya que $\tau_c > \tau_o$

Donde : Area (m^2)

V (m/seg)

Y (m)

τ_o (Kg/ m^2)

Q (m^3 /seg)

Los resultados anteriores parecen sugerir que bajo condiciones normales, la corriente en los drenes no es suficiente para arrastrar el material de fondo, por tanto el volumen de sedimentos aportados por los drenes es nulo o insignificante. Esto es comprensible debido a las pendientes extremadamente bajas de los drenes, de tal maera que éstos solo aportarían sedimentos al estuario en época de lluvias, cuando la velocidad de la corriente es capaz de vencer el esfuerzo resistente del material constitutivo de los sedimentos. Sin embargo, es un hecho que la Bahía sufre de un azolve progresivo, el cual proviene seguramente de la cuenca misma, ya que se trata de terrenos de cultivo y el suelo por tanto se encuentra desprotegido ante la erosividad de la lluvia.

En estas condiciones, resulta útil evaluar, aunque fuera de manera gruesa, el volumen anual de socavación esperado en la cuenca, lo cual depende fundamentalmente de los tipos de material y vegetación predominantes así como de la pendiente y de la intensidad de la lluvia, su estimación se obtiene a partir de la ecuación universal de pérdida de suelo. Esta ecuación de carácter empírico y predictivo permite calcular la masa del suelo perdido por unidad de área y tiene la forma:

$$A = R K S L C P$$

Donde:

A = Suelo perdido por unidad de área

R = Índice de erosión por lluvia para un período de retorno dado.

K = Factor de erodabilidad del suelo.

LS = Factor de longitud y pendiente.

C = Factor de uso del suelo,

P = Factor de control de erosión,

Para el caso específico de la cuenca de Tõbari, estos valores se obtuvieron de la siguiente manera:

Factor R:

Según Wischmeier y Smith este índice se define como:

$$R_i = \frac{EI}{100}$$

Donde:

E = Es la energía total para una tormenta dada

I = Es la intensidad máxima de lluvia para una duración de 30 minutos.

Este procedimiento tiene la desventaja de que para su aplicación es necesario contar con suficientes y apropiados registros de lluvia; así que investigaciones posteriores basadas en este método original llevaron a fórmulas simplificadas que permiten calcular este factor para cualquier duración de lluvia, tal es el caso de la

expresión siguiente:

$$R_i = \frac{15 P^{2.2}}{Hr^{0.6065}}$$

Donde:

P = altura de lluvia para una tormenta dada, en pulgadas

Hr = Duración de la lluvia, en horas.

Para duraciones de lluvia igual a 24 horas es posible evaluar R_i según:

$$R_i = 2.176 (P_{24 \text{ hr}})^{2.2}$$

En donde:

$P_{24 \text{ hr}}$ = Altura de lluvia, en pulgadas para una duración de 24 horas.

Para los fines de este trabajo y puesto que no se dispone de otra información, se consideró la altura de lluvia máxima en 24 horas, para Cd. Obregón, distante 40 Km. de Tóbari. Según los registros proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, durante 1961 - 1971 la máxima altura de lluvia se registró del 12 de Agosto de 1966 y corresponde a un valor de 60 mm = 2.36 pulgadas de altura de lluvia en 24 horas.

Por lo tanto; $R_i = 2.176 (2.36)^{2.2}$

$$R_i = 14.39$$

o bien utilizando la otra expresión;

$$R_i = \frac{15 (2.36)^{2.2}}{(24)^{0.6065}}$$

$$R_i = 14.43$$

que es aproximadamente igual al valor obtenido previamente.

FACTOR K

Puesto que se trata de un terreno de cultivo, cuya composición es areno-arcillosa según lo demuestra la curva granulométrica anexa; entonces un valor representativo para K resulta ser igual a 0.30.

OBTENCION DE L.

Para determinar L se consideró una franja rectangular de la cuenca que drena hacia el estuario de Tóbari de longitud igual a la del dren Cocoraque (margen derecha). se seleccionó este dren por ser de los más importantes y por su posición relativa con respecto al estuario. Por tanto L puede calcularse como sigue:

$$L = \frac{0.5 DA}{LCH}$$

Donde:

DA = Arena drenada por la cuenca.

LCH = La suma de las longitudes de todos los canales de la cuenca.

En este caso se considerará solamente el área y los canales que drenan hacia el estuario.

Según datos proporcionados por S.A.R.H. esta área resulta ser de $4.6 \times 10^8 \text{ m}^2$, mientras que la suma de longitudes de los canales se estimó en aproximadamente 87 200 metros, por lo que en la ecuación;

$$L = \frac{0.5 \text{ DA}}{\text{LCH}} = \frac{0.5 (4.6 \times 10^8)}{87\ 200}$$

$$\therefore L = 2\ 638 \text{ m} = 8\ 635 \text{ pies}$$

Obtención de S:

En este caso se podría pensar en una pendiente ponderada entre el total de canales; sin embargo, se ha considerado que la pendiente del dren Cocoraque, dada su longitud y posición relativa con respecto al estuario, sería de igual forma representativa de la pendiente media de la cuenca, por lo que la pendiente es $S = 0.00078\%$.

De esta manera LS puede ser estimado como sigue:

$$LS = 8.52 \left(\frac{L}{72.6} \right)^{0.5} (0.0076 + 0.0053 S + 0.00076 S^2)$$

$$LS = 93.02 (0.0076 + 0.0053 (0.00078 + 0.00076 (0.00078)^2))$$

$$\therefore LS = 0.71$$

FACTOR C

Puesto que se trata de una cuenca predominantemente agrícola, $C = 0.9$.

FACTOR P

La ecuación para calcular el valor de P en una cuenca es;

$$P = (1.0 \times SR) + (0.30 \times SRWW) + (Pt \times T)$$

Donde:

SR = Porción de la cuenca con surcos derechos de cultivo.

SRWW = Porción de la cuenca con surcos derechos y canales cubiertos de pasto.

Pt = Factor de control de erosión por terrazamientos.

T = Parte de la cuenca con terrazamientos.

Para este caso, puesto que se carece de datos confiables a este respecto se tomará un valor de 0.9, puesto que se trata de terrenos de cultivo donde la protección al suelo es escasa o nula.

En estas condiciones, es posible estimar la masa de suelo perdido anualmente mediante la ecuación universal de pérdida de suelo, que en unidades métricas queda:

$$A = 2.242 \times 10^5 R K L S C P \quad [\text{Kg/Km}^2]$$

$$A = 2.242 \times 10^5 (14.39) (0.35) (0.71) (0.9) (0.9)$$

$$A = 649\,363 \text{ Kg/Km}^2 = 0.65 \text{ Kg/m}^2.$$

Si se considera para el azolve una densidad $\gamma = 2000 \text{ kg/m}^3$ la lámina de suelo perdida anualmente será:

$$A = \frac{0.65}{2000} = 0.00033 \text{ m}$$

Es decir que para toda el área se tendría un volumen de suelo perdido de:

$$V = 4.6 \times 10^8 (0.00033) = 151\,800 \text{ m}^3/\text{año}$$

Esta cifra resulta del orden, si se le compara con el azolve registrado en el estuario durante los últimos 30 años, estimado en aproximadamente $5.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, es decir, en promedio se tendría un volumen anual de azolve de más o menos $170,000 \text{ m}^3/\text{año}$, no obstante ambas cantidades son del mismo orden según puede apreciarse.

CAPITULO IV

METODOS DE CALCULO. MODELO DE SIMULACION

IV.1. Modelo matemático para la simulación del funcionamiento Hidrodinámico de Bahía de Tóbari.

IV.1.1. Generalidades

Con el fin de analizar el comportamiento de la Bahía de Tóbari, antes y después de la construcción del bordo, se utilizó un modelo que simula el comportamiento hidrodinámico del cuerpo de agua sujeto a dos condiciones de marea extremas; marea viva y marea muerta. Con esto fue posible determinar las tendencias de erosión o azolve de la Bahía, así como los cambios de velocidad ocurridos con la construcción del bordo.

Existen diferentes modelos para estudiar el comportamiento hidrodinámico en tiempo real de un cuerpo de agua. El enfoque más común es suponer que el flujo puede ser representado por ecuaciones diferenciales en dos dimensiones, cuyas características son determinadas aproximadamente por las condiciones promedio en el sentido vertical. Lo anterior es generalmente válido para regiones cuyas dimensiones sobre un plano horizontal son varias órdenes de magnitud a las dimensiones en el sentido vertical, lo cual

es particularmente cierto en el caso de la Bahía de Tóbari, ya que sus dimensiones en el sentido horizontal son de cuatro por veinte Km., mientras que en el sentido vertical se tiene una profundidad promedio de dos metros.

IV.1.2. Desarrollo del Modelo y Ecuaciones Básicas.

Las ecuaciones que rigen el movimiento de un flujo transitorio son las dinámicas y la de continuidad. Para un volumen de control dado, en un sistema coordenado fijo, donde X e Y forman un plano horizontal y el eje Z es vertical y positivo hacia arriba; las ecuaciones dinámicas para un fluido incomprensible no viscoso se describen como sigue:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = X \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = Y \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = Z \quad (3)$$

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

donde:

$u, v, w,$ = Velocidades en las direcciones $x, y, z,$ respectivamente.

$x, y, z,$ = direcciones de los ejes coordenados.

t = Tiempo

ρ = Densidad del agua

P = Presión

X, Y, Z = Fuerzas de masas en las direcciones $x, y, z,$ respectivamente.

En la teoría clásica de ondas de marea, se desprecian las aceleraciones verticales ya que son pequeñas comparadas con la aceleración del campo gravitacional, también pueden despreciarse las velocidades en la dirección del eje Z por que los términos que contienen w en las ecuaciones (1), (2) y (3) pueden omitirse.

Si h representa la distancia entre un plano horizontal de referencia y el fondo, y ξ la distancia entre ese plano de referencia y la superficie libre del agua, las velocidades U y V promedios pueden calcularse como:

$$U = \frac{1}{(h + \xi)} \int_{-h}^{\xi} u dz \text{ - - - - - (5)}$$

$$V = \frac{1}{(h + \xi)} \int_{-h}^{\xi} v dz \text{ - - - - - (6)}$$

La distribución de las componentes de la velocidad U y V sobre una vertical en una sección se puede representar como una función de las velocidades promedio:

$$u(z) = U \{ 1 + u'(z) \} \text{ - - - - - (7)}$$

$$v(z) = V \{ 1 + v'(z) \} \text{ - - - - - (8)}$$

$u'(z)$ y $v'(z)$, son coeficientes de distribución para los cuales son válidas las siguientes relaciones:

$$\int_{-h}^{\xi} u'(z) dz = 0 \text{ - - - - - (9)}$$

$$\int_{-h}^{\xi} v'(z) dz = 0 \text{ - - - - - (10)}$$

Por otra parte las fuerzas de masa producidas por efectos de la rotación de la tierra y por la marea pueden expresarse como:

$$X = fv + K^{(x)} \text{ - - - - - (11)}$$

$$Y = -fu + K^{(y)} \text{ - - - - - (12)}$$

Como las aceleraciones y velocidades verticales se consideran despreciables, la ecuación (3) queda:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = Z \text{ - - - - - (13)}$$

Las fuerzas Z están compuestas por la fuerza de gravedad, la componente de las fuerzas inducidas por la rotación de la tierra y por la marea. Estas dos últimas, son pequeñas comparadas con la fuerza de gravedad y se pueden despreciar. Si además se supone una distribución de presiones lineal, función de la profundidad, tal y como se muestra a continuación:

$$P(z) = \rho g (\xi - z) + P_0 \text{ - - - - - (14)}$$

Entonces, al derivar la expresión (13) en las direcciones X e Y :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial P_0}{\partial x} \text{ - - - - - (15)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \rho g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial P_0}{\partial y} \text{ - - - - - (16)}$$

Al integrar las ecuaciones (1) y (2) sobre la región $z = -h(x, y)$ a $z = \xi(x, y)$ y al introducir las ecuaciones (5) a (12) y las ecuaciones (15) y (16).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} + A(x) \text{ (17)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} + A(y) \text{ (18)}$$

Los términos $A(x)$ y $A(y)$ contienen los efectos de las fuerzas generadores de marea y las derivadas intro-

ducidas al hacer la integración vertical. Con base en consideraciones prácticas y en algunos resultados experimentales, dichos términos son eliminados en lo que sigue de este análisis. Hasta este momento se ha considerado al fluido como no viscoso. Al tomar en cuenta la viscosidad aparecen términos de esfuerzos cortantes que, en la ecuación de movimiento, representan efectos del viento en la superficie y fricción en el fondo.

El esfuerzo en el fondo τ es proporcional al cuadrado de la velocidad y afecta considerablemente al comportamiento de las ondas. La relación para flujo unidireccional se expresa como;

$$\tau_b = \rho g C^{-2} V/V'$$

donde: ρ = densidad del fluido

V = Velocidad

Ch = Coeficiente de Chezy

Si se introduce esta relación para un sistema bidimensional, las ecuaciones (17) y (18) se transforman en:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \frac{U(U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2(h + \xi)} = F(x) \quad (19)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + g \frac{V(U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2(h + \xi)} = F(y) \quad (20)$$

donde $F^{(x)}$ y $F^{(y)}$ son funciones de esfuerzos de viento y presiones barométricas en las direcciones X e Y respectivamente.

En forma análoga se puede hacer la integración sobre la vertical de la ecuación de continuidad, para lo cual se tienen las siguientes condiciones de frontera:

En la superficie libre;

$$W(\xi) = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad \text{--- (21)}$$

En el fondo;

$$W(-h) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad \text{--- (22)}$$

con estas condiciones de frontera, la integración vertical de la ecuación (4) queda:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \{(h+\xi)U\}}{\partial x} + \frac{\partial \{(h+\xi)V\}}{\partial y} = 0 \quad \text{--- (23)}$$

esta ecuación, junto con las ecuaciones (19) y (20) representan matemáticamente el problema por resolver sujeto a las hipótesis simplificatorias mencionadas a lo largo del desarrollo.

IV.1.3. Esquema de cálculo. Sistema de ecuaciones en diferencias finitas.

El modelo usado para calcular la propagación de la onda en dos dimensiones se basa en la solución de las ecuaciones dinámicas y de continuidad en términos de diferencias finitas.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \frac{U(U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2(h + \xi)} = F(x) \quad (19)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + g \frac{V(U^2 + V^2)^{1/2}}{C^2(h + \xi)} = F(y) \quad (20)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \{(h + \xi)U\}}{\partial x} + \frac{\partial \{(h + \xi)V\}}{\partial y} = 0 \quad (23)$$

donde:

U, V, W = Velocidades medias en las direcciones x, y, z, respectivamente.

t = Tiempo

x, y, z = Direcciones de los ejes coordenados.

f = Parámetro de coriolis

g = Aceleración de la gravedad.

c = Celeridad de la onda.

h = Distancia entre un plano horizontal de referencia y el fondo.

ξ = Distancia entre el plano horizontal de referencia y la superficie libre del agua.

$F^{(x)}$ y $F^{(y)}$ = Funciones de esfuerzos de viento y presiones barométricas en las direcciones x e y , respectivamente.

La malla como la que se muestra en la figura IV.1.3.1 se usa para representar las velocidades, niveles de agua y profundidad. El nivel de agua ξ se define para valores enteros de J y K ; la velocidad U para valores enteros más un medio de J y valores enteros de K , la velocidad V para valores enteros de J y valores enteros más un medio de K ; finalmente, la profundidad h se localiza en valores enteros más un medio de J y de K , lo que puede apreciarse claramente en las ecuaciones referidas a los promedios y diferencias de las variables U , V y ξ .

La siguiente notación se usará en la sustitución de las ecuaciones diferenciales por el sistema de ecuaciones en diferencias finitas:

$$u^{(n)}_{j,k} = U(J\Delta x, K\Delta y, n\Delta t); \text{ para lo cual } \Delta x = \Delta y = \Delta S$$

$$\text{donde: } (x, y) = (J\Delta x, K\Delta y)$$

y además J, K , y n forman los siguientes incrementos;

$$J = 0, +\frac{1}{2}, +1, +\frac{3}{2}, \dots$$

$$K = 0, +\frac{1}{2}, +1, +\frac{3}{2}, \dots$$

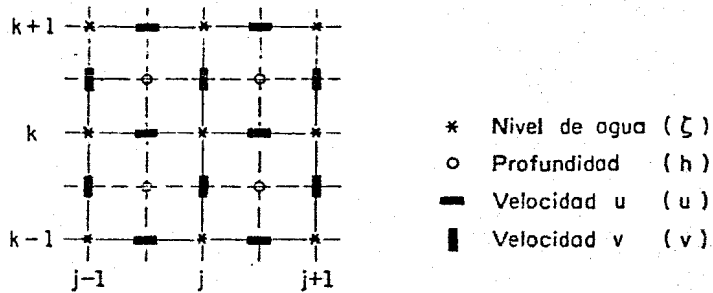
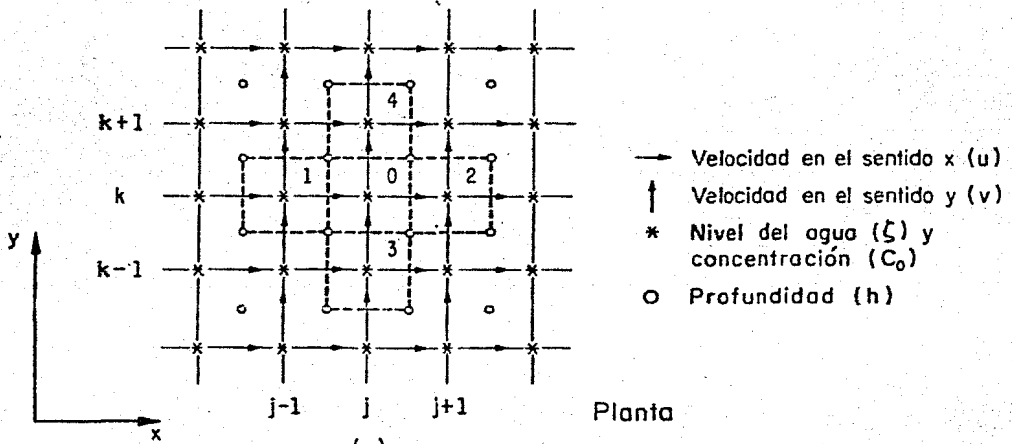
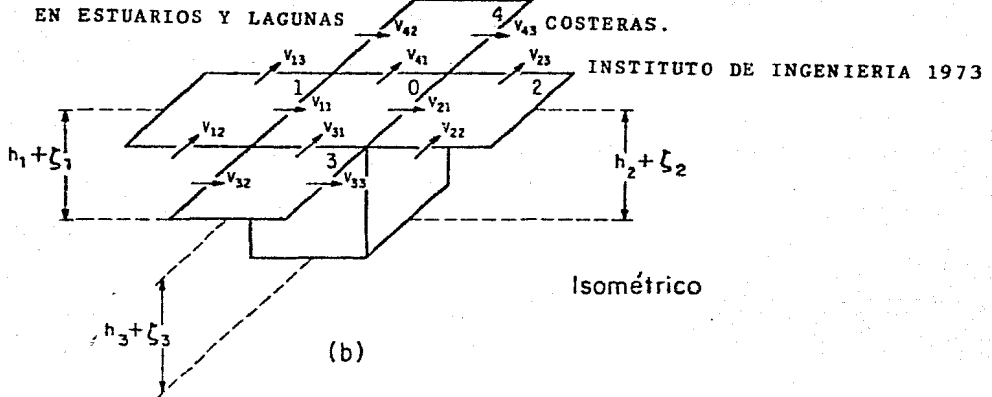


FIGURA IV.1.3.1 Esquema utilizado para el modelo numérico que obtiene las características hidrodinámicas del flujo en dos dimensiones



(a) FIGURA IV.1.3.1

FUENTE: MODELO MATEMATICO PARA EL ESTUDIO DE LA HIDRODINAMICA Y DIFUSION EN ESTUARIOS Y LAGUNAS COSTERAS.



Esquema utilizado en el modelo de difusión

$$n = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2$$

Además para promedios y diferencias de las variables U, V y ξ se usará la siguiente notación (se escribe solo para ξ , pero es igual para las variables U y V).

$$\bar{\xi}_{J,K}^x = \frac{1}{2} (\xi_{J+1/2, K} + \xi_{J-1/2, K})$$

$$\bar{\xi}_{J,K}^y = \frac{1}{2} (\xi_{J, K+1/2} + \xi_{J, K-1/2})$$

los que definen los promedios de las variables U, V y ξ , y

$$\xi_x = (\xi_{J+1/2, K} - \xi_{J-1/2, K})$$

$$\xi_y = (\xi_{J, K+1/2} - \xi_{J, K-1/2})$$

que a su vez definen las diferencias de las mismas variables.

En un esquema implícito de solución se utiliza un intervalo de tiempo doble en la operación, de tal manera que los términos que contienen derivadas en el espacio y los correspondientes a la fuerza de Coriolis se toman alternadamente hacia adelante y hacia atrás. Esto es, en un intervalo de tiempo considerado se realizan dos operaciones sucesivas y estos términos son centrados en el tiempo o son promedios en el tiempo sobre el intervalo. De esta manera se generan expresiones recursivas donde

parte de las variables que son incógnitas en el intervalo de tiempo anterior, resultan datos conocidos en el siguiente intervalo y viceversa.

Así, cada una de las operaciones tiene dos niveles en el tiempo; la primera operación se realiza del tiempo n al tiempo $n + 1/2$ y la segunda operación del tiempo $n + 1/2$ al tiempo $n + 1$. Los valores de los campos ξ ($n + 1/2$), U ($n + 1/2$) y V ($n + 1/2$) se calcula de los campos $\xi^{(n)}$, $U^{(n)}$ y $V^{(n)}$, mediante una operación que contiene a ξ y U en forma implícita y a V en forma explícita; al siguiente paso los campos $\xi^{(n+1)}$, $U^{(n+1)}$ y $V^{(n+1)}$ se obtienen de los campos $\xi^{(n+1/2)}$, $U^{(n+1/2)}$ y $V^{(n+1/2)}$ con una operación donde ξ y V son implícitas y U explícita. Si se expresan las ecuaciones (19), (20) y (23) en términos de diferencias finitas bajo las consideraciones anotadas, se tiene:

$$u^{(n+1/2)} = u^{(n)} + 1/2\Delta t f v^{(n)} - 1/2\Delta t u^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^{(n)} - 1/2\Delta t v^{(n)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_x^{(n+1/2)} - R(x)^{(n)} - F(x)^{(n+1/2)}$$

en $J_{+1/2}$, K - - - - - (24)

$$\xi^{(n+1/2)} = \xi^{(n)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (\bar{h}^y + \bar{\xi}^x) * u \}_x^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (\bar{h}^x + \bar{\xi}^y) v \}_y^{(n)}$$

- - - - - (25)

$$u^{(n+1/2)} = u^{(n)} - 1/2\Delta t f u^{(n+1/2)} - 1/2\Delta t u^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^{(n)} - 1/2\Delta t v^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^{(n)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_y^{(n)} - R(y)^{(n+1/2)} - F(y)^{(n)}$$

en J, K+1/2 - - - - - (26)

$$u^{(n+1)} = u^{(n+1/2)} + 1/2 \Delta t f_v^{(n+1)} - 1/2 \Delta t u^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)} -$$

$$- 1/2 \Delta t v^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_x^{(n+1/2)} - R_{(x)}^{*(n+1)} - F_{(x)}^{(n+1/2)}$$

en J+1/2, K - - - - - (27)

$$\xi^{(n+1)} = \xi^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (\bar{h}^y + \bar{\xi}^x) u_x^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (\bar{h}^x + \bar{\xi}^y) \}^*$$

$$*v_y^{(n+1)}$$

en J, K - - - - - (28)

$$v^{(n+1)} = v^{(n+1/2)} - 1/2 \Delta t f_u^{(n+1/2)} - 1/2 \Delta t u^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)}$$

$$- 1/2 \Delta t v^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_y^{(n+1)} - R_{(y)}^{(n+1/2)}$$

$$- F_{(y)}^{(n+1)}$$

en J, K + 1/2 - - - - - (29)

Los gradientes de la velocidad en los términos convectivos se han mantenido en forma diferencial y encerrados en paréntesis angulares ya que para su cálculo se debe de emplear una técnica especial que se verá posteriormente, asimismo sucede con los términos no lineales marcados con un asterisco. Los efectos de rugosidad en el fondo se indican mediante la función R y la influencia del viento y presión atmosférica mediante la función F. Por el momento,

para desarrollar el sistema de cálculo, se omitirán las funciones R y P, así como todos los términos convectivos que están en forma diferencial.

En cada una de las ecuaciones (24) y (25) hay tres valores en el nivel de tiempo $(n+1/2)$, todos ellos localizados en el renglón K. Al escribir primero la ecuación de continuidad y omitir el subíndice K, las ecuaciones (24) y (25) se pueden escribir de la siguiente manera:

$$-1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (\bar{h}^y + \xi^{-x}) * u \}_{J-1/2}^{(n+1/2)} + \xi_J^{(n+1/2)} + 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (\bar{h}^y + \xi^x) * u \}_{J+1/2}^{(n+1/2)} \\ = A_J^{(n)} \quad \text{--- (30)}$$

$$-1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_J^{(n+1/2)} + u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_{J+1}^{(n+1/2)} = B_{J+1/2}^{(n)} \quad \text{--- (31)}$$

donde:

$$A_J^{(n)} = \xi^{(n)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ (h^{-x} + \xi^{-y}) v \}_y^{(n)} ; \text{ en } J \quad \text{--- (32)}$$

$$B_{J+1/2}^{(n)} = u^{(n)} + 1/2 \Delta t f v^{(n)} ; \text{ en } J + 1/2 \quad \text{--- (33)}$$

Entonces se tiene una ecuación con tres incógnitas para cada punto del campo de velocidades $(J+1/2)$ y para cada punto del campo de niveles de agua (ξ_J) en el renglón K, pues como se define anteriormente, ξ representa el nivel de agua mientras que U y V representan las velocidades en el plano horizontal.

Si se considera un renglón con N puntos de niveles de agua, entonces se tienen N-1 velocidades y por lo tanto, en el tiempo $(n+1/2)$ se deben resolver $2N-1$ ecuaciones, lo cual resulta lógico pues entre dos puntos de niveles de agua existe solamente una velocidad.

Si se introduce la siguiente notación;

$$r_{J-1/2} = 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} (\bar{h}^y + \bar{\xi}^x)_{J-1/2}^* ;$$

$$r_{J+1/2} = 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} (\bar{h}^y + \bar{\xi}^x)_{J+1/2}^* ; \text{ - - - - - (34)}$$

$$r_J = 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \quad ; \quad r_{J+1} = 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g ; \text{ - - - - - (35)}$$

con el hecho de poder escribir las ecuaciones (30) y (31) en forma matricial para el renglón K, es decir, los términos igualados a $r_{J-1/2}$, $r_{J+1/2}$, r_J y r_{J+1} se hacen con el fin de poder representar las ecuaciones mencionadas, en forma matricial, al suponer que $U_{J-1/2}^{(n+1/2)}$ es una velocidad conocida en la frontera izquierda y $U_I^{(n+1/2)}$ es una velocidad conocida en la frontera derecha:

$$\begin{bmatrix}
 1 & r_{J+1/2} & 0 & 0 & \cdot & 0 \\
 -r_J & 1 & r_{J+1} & 0 & \cdot & 0 \\
 0 & -r_{J+1/2} & -1 & r_{J+3/2} & \cdot & 0 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & 0 & 0 & \cdot & -r_{I-1/2} & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \xi_J \\
 U_{J+1/2} \\
 \xi_{J+1} \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \xi_I
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 (n+1/2) \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{matrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 A_J \\
 B_{J+1/2} \\
 A_{J+1} \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 A_I
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 (n) \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{matrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 r_{J-1/2} u_{J-1/2} \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 r_{I+1/2} u_{I+1/2}
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 (n+1/2) \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{matrix}$$

Los valores del vector $(\xi_J, u_{J+1/2}, \xi_{J+1}, \dots, \xi_I)$ en el nivel de tiempo $(n + 1/2)$ se resuelven con un número limitado de operaciones mediante un proceso de eliminación de incógnitas. Si se empieza con la primera ecuación, que se obtiene de resolver la matriz, el nivel de agua $\xi_J^{n+1/2}$ se expresa como una función de la incógnita $u_{J+1/2}$, así la primera ecuación es:

$$\xi_J^{(n+1/2)} + r_{J+1/2} u_{J+1/2}^{(n+1/2)} = A_J^n + r_{J-1/2} u_{J-1/2}^{(n+1/2)}$$

donde:

$$P_J = r_{J+1/2}$$

$$Q_J = A_J + r_{J-1/2} u_{J-1/2}^{(n+1/2)}$$

Por lo tanto:

$$\xi_J^{(n+1/2)} = -P_J u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + Q_J \text{ --- (36)}$$

La segunda ecuación de la matriz es:

$$-r_J \xi_J^{(n+1/2)} + u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + r_{J+1} \xi_{J+1}^{(n+1/2)} = B_{J+1/2}^{(n)}$$

En la que al sustituir la ecuación (36) y realizando operaciones queda;

$$-r_J (-P_J u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + Q_J) + u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + r_{J+1} \xi_{J+1}^{(n+1/2)} = B_{J+1/2}^{(n)}$$

$$\Rightarrow u_{J+1/2}^{(n+1/2)} = -r_J P_J u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + r_J Q_J - r_{J+1} \xi_{J+1}^{(n+1/2)} + B_{J+1/2}^{(n)}$$

$$u_{J+1/2}^{(n+1/2)} (1+r_J P_J) = B_{J+1/2}^{(n)} + r_J Q_J - r_{J+1} \xi_{J+1}^{(n+1/2)}$$

$$\therefore u_{J+1/2}^{(n+1/2)} = \frac{B_{J+1/2}^{(n)} + r_J Q_J}{1 + r_J P_J} - \frac{r_J + 1}{1 + r_J P_J} \xi_{J+1}^{(n+1/2)}$$

y considerando que:

$$R_J = \frac{r_J + 1}{1 + r_J P_J}$$

$$S_J = \frac{B_{J+1/2}^{(n)} + r_J Q_J}{1 + r_J P_J}$$

entonces la ecuación queda;

$$u_{J+1/2}^{(n+1/2)} = -R_J \xi_{J+1}^{(n+1/2)} + S_J \text{ ----- (37)}$$

Así el nivel del agua puede expresarse como función de la siguiente velocidad, es decir, de la ecuación (36) se genera la siguiente velocidad;

$$\xi_{J+1} = -P_{J+1} u_{J+3/2}^{n+1/2} + Q_{J+1} \text{ ----- (38)}$$

donde:

$$P_{J+1} = \frac{r_{J+3/2}}{1+r_{J+1/2} R_J}$$

$$Q_{J+1} = \frac{A_{J+1}^{(n)} + r_{J+1/2} S_J}{1 + r_{J+1/2} R_J}$$

En general, se pueden escribir las siguientes fórmulas recursivas;

$$\xi_J^{(n+1/2)} = -P_J u_{J+1/2}^{(n+1/2)} + Q_J \text{-----} \quad (39)$$

$$u_{J-1/2}^{(n+1/2)} = -R_{J-1} \xi_J^{(n+1/2)} + S_{J-1} \text{-----} \quad (40)$$

donde:

$$P_J = \frac{r_{J+1/2}}{1 + r_{J-1/2} R_{J-1}}$$

$$Q_J = \frac{A_J^{(n)} + r_{J-1/2} S_{J-1}}{1 + r_{J-1/2} R_{J-1}}$$

$$R_J = \frac{r_{J+1}}{1 + r_J P_J}$$

$$S_J = \frac{B_{J+1/2}^{(n)} + r_J Q_J}{1 + r_J P_J}$$

Los factores recursivos P, Q, R y S se calculan sucesivamente hasta que se alcanza la otra frontera; desde la izquierda hasta la derecha que se supusieron conocidas para el caso de la matriz. Si $u^{(n+1/2)}$ es una velocidad conocida, los dos últimos factores se calculan con P_J , Q_J y como la ecuación (39) expresa ξ_I como función de la velocidad conocida $u_{I+1/2}^{(n+1/2)}$, entonces ξ_I puede calcularse y todos los puntos de niveles de agua y de velocidades se calculan en orden descendente con las ecuaciones (39) y (40).

La velocidad en la otra dirección en el nivel de tiempo $(n+1/2)$ se calcula en forma explícita con la ecuación (26) dado que la velocidad $u^{(n+1/2)}$ en el término de Coriolis ya ha sido calculada.

En el segundo paso operativo, es decir para pasar del nivel $(n+1/2)$ al nivel $(n+1)$ (que es el siguiente nivel hacia adelante), se resuelven las ecuaciones (28) y (29) implícitamente de manera análoga o como se resolvieron las ecuaciones (24) y (25). Finalmente, la velocidad en la dirección x se calcula explícitamente mediante la ecuación (26).

Los términos no lineales, marcados con un asterisco en la ecuación de continuidad (30), se calculan en cada paso mediante un procedimiento iterativo. La primera estimación de $\xi^{(n+1/2)}$ se hace en forma implícita tomando los términos no lineales del nivel n (que es el inmediatamente anterior); el valor así calculado se usa en la ecuación (25) para el cálculo en el nivel $(n+1)$, que es el siguiente nivel. El proceso se repite hasta alcanzar el tiempo final deseado.

IV.1.3.1 Términos de convección y efectos del fondo.

Las operaciones que se hacen en los términos convectivos son dependientes de las localizaciones en el espacio de las variables u , v , y ξ ; por lo tanto, las deriva-

das de estos términos se expresan en función de dicha localización, es decir, en función del punto que se esté refiriendo, ya sea $(J+1/2, K)$, $(J, K+1/2)$, ...

Las derivadas espaciales se pueden expresar como sigue:

$$\left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle_{J+1/2, K} = \frac{1}{2\Delta_s} (u_{J+3/2, K} - u_{J-1/2, K})$$

$$\left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle_{J+1/2, K} = \frac{1}{2\Delta_s} (u_{J+1/2, K+1} - u_{J+1/2, K-1})$$

$$\left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle_{J, K+1/2} = \frac{1}{2\Delta_s} (v_{J+1, K+1/2} - v_{J-1/2, K+1/2})$$

$$\left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle_{J, K+1/2} = \frac{1}{2\Delta_s} (v_{J, K+3/2} - v_{J, K-1/2})$$

Los términos de inercia no se toman centrados en el tiempo, lo cual sería conveniente para efectos de precisión, ya que al tenerlos centrados en el tiempo, las matrices contienen más de tres términos en las diagonales y se requiere gran esfuerzo de cálculo para su solución. En la siguiente tabla se indican los niveles de tiempo convenientes y los niveles usados. Las derivadas espaciales se toman en el nivel de tiempo inferior y las velocidades en el siguiente nivel.

Eq.	Convenientes	Usados
3.24	$u^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)} + v^{(n)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n)}$	$u^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^{(n)} + v^{(n)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n)}$
3.26	$\bar{u}^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)} + v^{(n)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^{(n)}$	$\bar{u}^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle^{(n)} + v^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^{(n)}$
3.27	$u^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n+1/2)} + \bar{v}^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n+1)}$	$u^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)} + \bar{v}^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^{(n+1/2)}$
3.29	$\bar{u}^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)} + v^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^{(n+1)}$	$\bar{u}^{(n+1/2)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle^{(n+1/2)} + v^{(n+1)} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^{(n+1/2)}$

Como la magnitud de los términos de convección es pequeña comparado con la magnitud de los términos de inercia para ondas en aguas costeras, un orden de aproximación menor se justifica en favor de un tiempo de cálculo mucho menor. En las ecuaciones de movimiento, ecuaciones (24) a (28), los efectos de la rugosidad del fondo se estiman por los términos cuadráticos usando coeficientes de Chezy cuyos valores se asignan en la malla a las localizaciones de los niveles de agua. Estos términos son:

$$R_{(K)}^{(n)} = 1/2 \Delta t g u^{(n)} \frac{\sqrt{(u^{(n)})^2 + (v^{(n)})^2}}{(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x)^{n+1} (\bar{c}^x)^2} ; \text{ en } J+1/2, K$$

$$R_{(y)}^{*(n+1/2)} = 1/2 \Delta t g v^{(n+1)} \frac{\sqrt{(u^{(n+1/2)})^2 + (v^{(n)})^2}}{(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y)^{n+1/2} (\bar{c}^y)^2} ;$$

en J, K+1/2

$$R_{(x)}^{*(n+1)} = 1/2 \Delta t g u^{(n+1)} \frac{\sqrt{(u^{(n+1/2)})^2 + (v^{(n+1)})^2}}{(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x)^{n+1} (\bar{c}^x)^2} ;$$

en J+1/2, K

$$R_{(y)}^{(n+1/2)} = 1/2 \Delta t g v^{(n+1/2)} \frac{\sqrt{(u^{(n+1/2)})^2 + (v^{(n+1/2)})^2}}{(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y)^{n+1/2} (\bar{c}^y)^2} ;$$

en J, K+1/2

Los términos convectivos y la expresión desarrollada aquí para los efectos de turbulencia y viscosidad en el fondo pueden incluirse en los coeficientes recursivos dados en las fórmulas (39) y (40), es decir, en los coeficientes recursivos P, Q, R y S.

Para el cálculo implícito en la dirección x se usan los siguientes coeficientes.

$$P_J = \frac{r_{J+1/2}}{(1+r_{J-1/2}R_{J-1})}$$

$$Q_J = \frac{(A_J^{(n)} + r_{J-1/2} S_{J-1})}{(1+r_{J+1/2} R_{J-1})}$$

$$R_J = \frac{r_{j+1}}{\{1+r_J P_J + 1/4 \frac{\Delta t}{\Delta s} (u_{J+3/2}^{(n)} - u_{J-1/2}^{(n)})\}}$$

$$S_J = \frac{(B_{J+1/2}^{(n)} + r_J Q_J)}{\{1+r_J P_J + 1/4 \frac{\Delta t}{\Delta s} (u_{J+3/2}^{(n)} - u_{J-1/2}^{(n)})\}}$$

donde:

$$A_J^{(n)} = \xi^{(n)}_{-1/2} \frac{\Delta t}{\Delta s} \{(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y) v\}^{(n)}_{(y)} ; \text{ en } J, K$$

$$B_{J+1/2}^{(n)} = u^{(n)}_{+1/2} \{ \Delta t f - \frac{\Delta t}{2\Delta s} (u_{J+1/2}^{(n)}, K+1 - u_{J+1/2, K-1}^{(n)}) \} \bar{v}^{(n)} -$$

$$-1/2 \Delta t g u^{(n)} \frac{\sqrt{(u^{(n)})^2 + (\bar{v}^{(n)})^2}}{(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x(n)) (c^x)^2} ; \text{ en } J+1/2, K$$

La operación explícita para la velocidad "v" queda:

$$v^{(n+1/2)} = \frac{\{v^{(n)} - 1/2\{\Delta t f + 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{J+1, K+1}^{(n)} - v_{J-1, K+1/2}^{(n)})\} = u^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_y^{(n)}\}}{\{1 + 1/2 \Delta t g \sqrt{\frac{(u^{(n+1/2)})^2 + (v^{(n)})^2}{(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y)^2 + (\bar{c}^y)^2}} + 1/4 \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{J, K+3/2}^{(n)} - v_{J, K-1/2}^{(n)})\}}$$

----- (41)

Los coeficientes para las fórmulas de recursión en el sentido y son:

$$P_K = \frac{r_{K+1/2}}{(1 + r_{K-1/2} R_{K-1})}$$

$$Q_K = \frac{(A_K^{(n+1/2)} + r_{K-1/2} S_{K-1})}{(1 + r_{K=1/2} R_{K-1})}$$

$$R_K = \frac{r_{K+1}}{\{1 + r_K P_K + 1/4 \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{K+3/2}^{(n+1/2)} - v_{K-1/2}^{(n+1/2)})\}}$$

$$S_K = \frac{(B_{K+1/2}^{(n+1/2)} + r_K Q_K)}{\{1 + r_K P_K + 1/4 \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{K+3/2}^{(n+1/2)} - v_{K-1/2}^{(n+1/2)})\}}$$

donde:

$$A_K^{(n+1/2)} = \xi^{(n+1/2)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} \{(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x) u\}_x^{(n+1/2)}; \text{ en } J, K.$$

$$B_{K+1/2}^{(n+1/2)} = v^{(n+1/2)} - 1/2 \left\{ \Delta t f + 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} (v_{J+1, K+1/2}^{(n+1/2)} - v_{J-1, K+1/2}^{(n+1/2)}) \right\} u^{(n+1/2)}$$

$$- 1/2 \Delta t g v^{(n+1/2)} \frac{\sqrt{(\bar{u}^{(n+1/2)})^2 + (v^{(n+1/2)})^2}}{(\bar{h}^x + \bar{\xi}^y)^{(n+1/2)} (\bar{c}^y)^2} ; \text{ en } J, K + 1/2$$

Las fórmulas de recursión en el sentido "y" son:

$$\xi_K^{(n+1)} = -P_K v_{K+1/2}^{(n+1)} + Q_K$$

$$v_{K-1/2}^{(n+1)} = -R_{K-1} \xi_K^{(n+1)} + S_{K-1}$$

Finalmente la operación explícita para la velocidad

"u" queda:

$$u^{(n+1)} = \frac{\{u^{(n+1/2)} + 1/2 \{ \Delta t f - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} (u_{J+1/2, K+1}^{(n+1/2)} - u_{J+1/2, K-1}^{(n+1/2)}) \} v^{(n+1)} - 1/2 \frac{\Delta t}{\Delta s} g \xi_x^{(n+1/2)} \}}{(1 + 1/2 \Delta t g \frac{\sqrt{(\bar{u}^{(n+1/2)})^2 + (v^{(n+1/2)})^2}}{(\bar{h}^y + \bar{\xi}^x)^{(n+1)} (\bar{c}^x)^2} + 1/4 \frac{\Delta t}{\Delta s} (u_{J+3/2, K}^{(n+1/2)} - u_{J-1/2, K}^{(n+1/2)}))}$$

----- (42)

IV.1.4. Programa de computadora y su aplicación al caso de la Bahía de Tóbari

Como se menciona al principio de este capítulo; con el fin de analizar el comportamiento de la Bahía de Tóbari, antes y después de la construcción del bordo, y de acuerdo con la metodología descrita, se aplicó un programa de compu-

tadora en lenguaje FORTRAN, elaborado por el Instituto de Ingenieria de la UNAM en 1974.

En su caso más general, el programa considera el problema de una bahía conectada en uno o varios puntos al océano y que puede tener uno o varios puntos con descarga de corrientes de agua hacia la bahía. Cuando se consideran descargas de corrientes en aguas hacia la bahía éstas se proporcionan como gasto constante y cuando la conexión es hacia el océano, la información que se proporciona corresponde a los niveles de marea en los puntos de conexión.

La complejidad de la geometría de la Bahía no significa ningún problema, puesto que ésta puede ser como se desee ya que mediante la trama de cuadrados se forma una malla que sigue en forma aproximada dicha geometría. Desde luego, mientras más pequeños sean los lados de los cuadrados, más precisión se tiene en la geometría y en el cálculo; sin embargo, las necesidades de tiempo de máquina crecen geométricamente con la complejidad del problema.

Para un problema en particular, la malla deberá estar compuesta por cuadrados unidos entre sí por, cuando menos, uno de sus lados como única restricción. Las condiciones de frontera se asocian con uno o más de los cuadrados

correspondientes, lo cual puede ser una restricción para el ancho de los cuadrados, ya que se considera que la frontera existe en todo el lado del cuadrado correspondiente y no solamente en un punto.

Una vez formada la malla, se eligen arbitrariamente los ejes "X" e "Y" coincidiendo con las direcciones de los lados de los cuadrados, aunque es recomendable escoger el eje "X" paralelo al lado más largo de la malla para simplificar la impresión de resultados.

En las tablas IV.1.4.1 y IV.1.4.2 se presenta un ejemplo de resultados del programa de computadora, para el caso de una malla que tiene como máximo 50 elementos en el sentido "X" y 17 elementos en el sentido "Y".

Como puede apreciarse, cada renglón de la hoja de computadora representa una línea de elementos en el sentido "Y" y cada número o cada cuatro asteriscos(*), representan un elemento en el sentido "X".

Los asteriscos delimitan las fronteras de la Bahía, bien sea que se trate de tierra o bien que sea la conexión con el mar.

Como el espacio de impresión está limitado a la capacidad de las hojas de computadora, cuando la malla excede

ELEVACIONES EN EL
 TIEMPO 1020.00 MINUTOS

```

-17 -17 -17.....
-17 -17 -17.....
*** -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17.....
***** -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -18 -18 -17.....
***** -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -18 -18 -17.....
***** -17 -17 -17..... -17 -17 -17 -17 -17 -18 -18 -17.....
***** -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -15 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -17 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -17 -17 -17 -17 -17 -17 -16 -17 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -17 -17 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16 -16.....
***** -16 -16 -16.....
    
```

TABLA IV.1.4.1 EJEMPLO DE IMPRESTON DE RESULTADOS DEL MODELO

.....	-17	-17	-16	.....													
.....	-16	-16	-17	-17	.....												
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....							
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....						
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....						
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....					
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....				
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....			
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....		
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....	
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....
.....	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	.....

EJEMPLO DE IMPRESION DE RESULTADOS DEL MODELO
 TABLA IV.1.4:2 (2a. PARTE)

estos límites se imprime la información por partes. De esta manera, como la capacidad de impresión en el sentido "X" está limitado a 25 elementos y la malla que se está ejemplificando tiene sus elementos en ese sentido, la tabla IV.1.4.2 es la continuación de la tabla IV.1.4.1. Si se rebasara la capacidad en los dos sentidos, entonces aparecería primero la continuación en el sentido "Y" y posteriormente la continuación en el sentido "X".

Las tablas IV.1.4.1 y IV.1.4.2 son un ejemplo de los resultados de elevaciones del espejo del agua para el tiempo 1 020 minutos, tal y como se indica en la parte superior de la tabla IV.1.4.1. Como las elevaciones están dadas en cm. los resultados indican que se tienen elevaciones del agua entre -0.17 y -0.16 msnm. De la misma manera, si se trata de velocidades en el sentido "X" o en el sentido "Y", los resultados se expresan en cm/seg y el signo indica el sentido de los vectores de la malla; si el signo es positivo, el sentido es hacia la derecha de la hoja en caso de velocidades en "X" (u), o hacia arriba en caso de velocidades en "Y" (v).

De acuerdo con lo anterior, para cada intervalo de tiempo el programa de computadora genera tres planos de la Bahía donde se indican respectivamente las profundidades, la velocidad en el sentido "X" y la velocidad en el sentido "Y"; asimismo, se proporcionan los volúmenes manejados

dentro de la Bahía en cada intervalo de tiempo.

Para representar la geometría de la Bahía se utilizó la malla ilustrada en la Figura IV.1.4.1 la cual está formada por cuadros de 400 metros de lado.

En este caso se consideró la dirección del eje "x" a la línea de la malla que sigue en forma aproximada a la línea de la playa y con el sentido positivo en dirección NW, es decir, hacia la boca Norte. La dirección del eje "y" es perpendicular al anterior y el sentido positivo va del continente hacia el mar.

De acuerdo con las condiciones de marea y de geometría de la Bahía, se generaron cuatro alternativas de simulación:

- Alternativa 1: Marea viva sin bordo
- Alternativa 2: Marea viva con bordo
- Alternativa 3: Marea muerta sin bordo
- Alternativa 4: Marea muerta con bordo

Para simular el funcionamiento de la Bahía con la presencia del bordo, se consideró como frontera de tierra a los elementos 364 a 193 y 121 a 36 tal y como se muestra en la Figura IV.1.4.1 De esta manera, se consideró que la alcantarilla está representada por el elemento 156 de la

figura IV.1.4.1. Si bien es cierto que las condiciones de la alcantarilla no son reales, ya que tiene un ancho de 20 metros y no de 400 metros como se supuso; sin embargo, se comprobó que para los efectos de circulación en la Bahía esta simplificación no afecta considerablemente.

De la interpretación de los resultados destacan las siguientes consideraciones:

- En general se tienen las mismas condiciones de funcionamiento con los dos tipos de marea.
- Tanto en condiciones de agua entrando y saliendo de la Bahía, las velocidades de la Bahía Norte son menores con la presencia del bordo que sin él, mientras que la Bahía Sur se presenta el caso contrario.
- Cuando la marea está subiendo y en presencia del bordo, la Bahía Norte tiene cerca del bordo una elevación mayor que la del mar, mientras que en la Bahía Sur el nivel del agua es menor que la del mar. Esto explica la diferencia del comportamiento de las velocidades con y sin el bordo, ya que en la Bahía Sur existe una inercia mayor en el movimiento de la masa, por lo que en tiempos iguales el movimiento está defasado. Desde luego, sin la presencia del bordo no existen los desniveles tan fuerte.

- Con la presencia del bordo se generan corrientes de agua que forman remolinos cerca del mismo; si la marea está bajando, los principales remolinos se forman en la zona del continente, como se muestran en la Figura IV.1.4.2 mientras que si la marea está subiendo, los remolinos se forman en la cercanía del bordo del lado de la isla Huivulai.

- La tendencia del movimiento del agua cerca de los bordos es en sentido contrario entre un lado de la Bahía y el otro, tal y como se muestra en la Figura IV.1.4.2 con flechas curvas, En este caso se ilustra en esta figura el caso de marea viva y muerta, ya que para la Bahía Sur son diferentes las tendencias según el tipo de marea. Los sentidos de circulación indicados en la Figura IV.1.4.2 corresponden al caso en que la marea está bajando, mientras que cuando la marea está subiendo los sentidos se invierten pero conservan la misma tendencia.

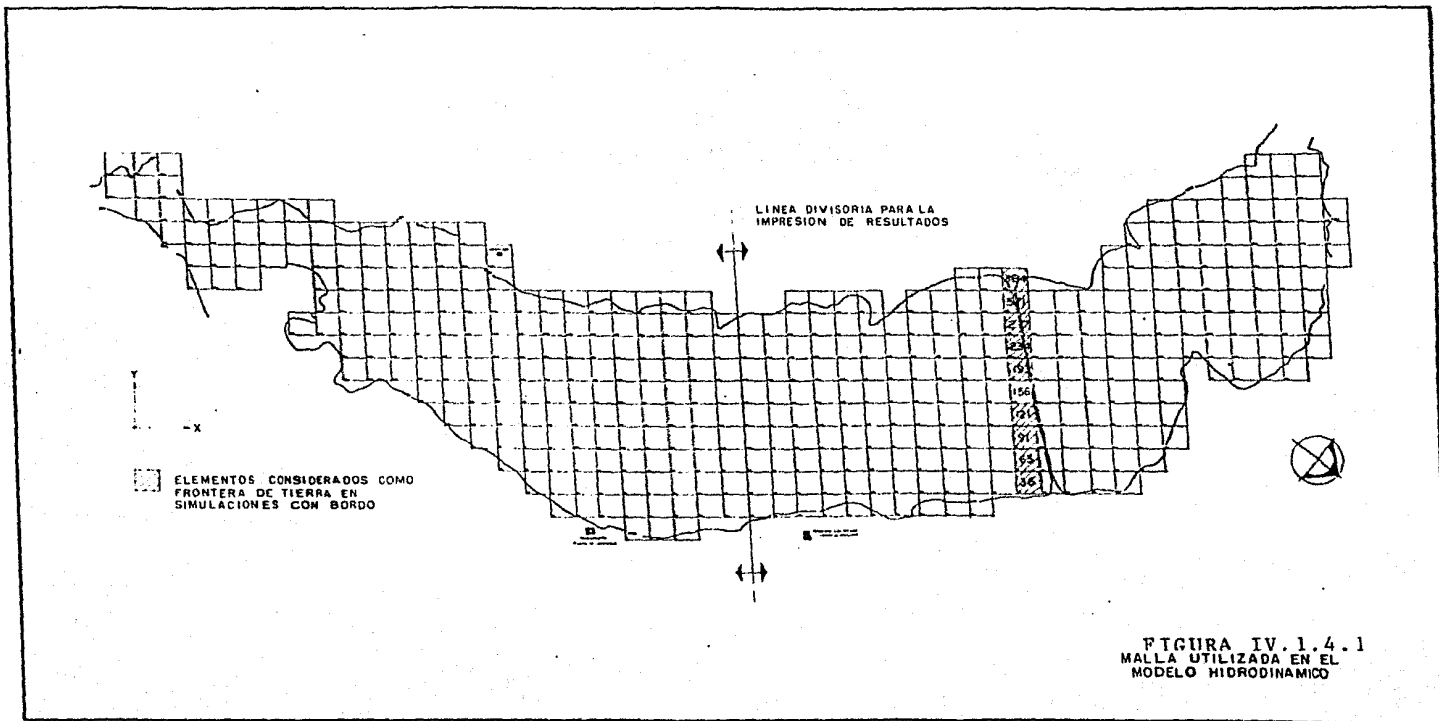
- Existe una zona de calma sin la presencia del bordo que se desarrolla a todo lo ancho de la Bahía y que se encuentra a una distancia de 2 a 2.5 Km. hacia el Sureste (SE) del bordo, lo cual indica que esa zona podría haber sido más adecuado para la localización del bordo pues se tienen condiciones de equilibrio. Esta zona se observa en la Figura

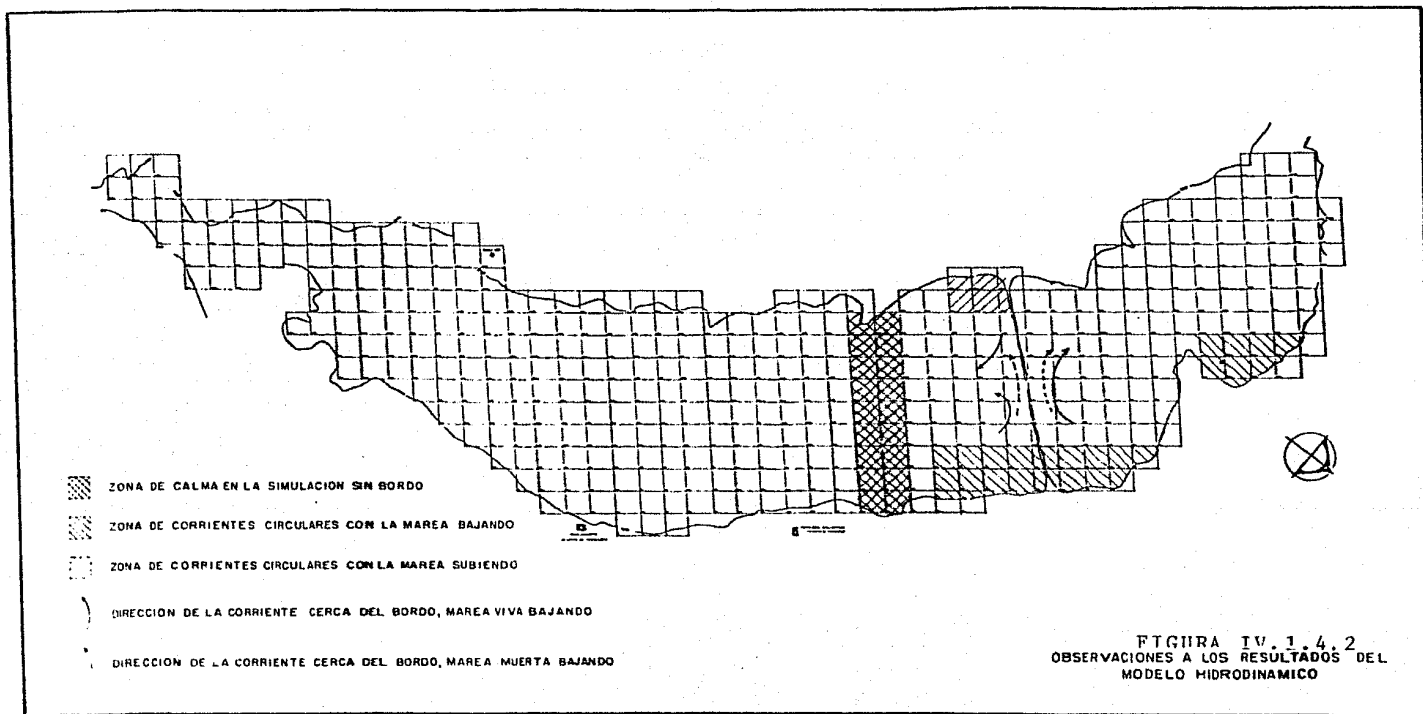
IV.1.4.2 y en general se mantiene durante todas las simulaciones realizadas.

- Aún cuando la malla es muy ancha para descubrir condiciones locales, la circulación del agua indica que el bordo es prácticamente una línea impenetrable para la transferencia del líquido de una zona a la otra.

- Debido a las condiciones actuales de velocidad, es de esperar que las Bahías se azolven principalmente en la parte continental.

- La disminución de la velocidad en la Bahía Norte, por la presencia del bordo, probablemente ha propiciado el azolvamiento de la boca.





CAPITULO V

DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.

En este capítulo se plantea la situación en que se encuentra funcionando la Bahía, enfocada principalmente a su comportamiento hidráulico.

Para dar el diagnóstico acerca de la Bahía de Tóbari fue necesario hacer un análisis de cada uno de sus aspectos y características, compuestos principalmente - por los fenómenos de oleaje, arrastre litoral, transporte eólico, direcciones de oleaje, medición de corrientes y estimación de volúmenes de azolve que son, a nivel del presente estudio, un antecedente del comportamiento de los mismos en la zona de Tóbari, por lo que cabe hacer la - aclaración que, aunque los resultados se consideran confiables, deben tomarse con reservas, pues como se expuso anteriormente, la información utilizada corresponde en algunos casos a datos regionales, aunque ha sido complementada con levantamientos topográficos y una serie de mediciones locales tomadas durante lapsos cortos. Hubiera - sido importante e interesante continuar con la campaña de mediciones con objeto de aumentar el grado de confiabilidad de la información y poder mejorar o confirmar los resultados del estudio, pero por aspectos de tiempo y dinero las campañas realizadas tuvieron una duración aproximada

de tres meses, lapso que permitió contar con los datos mínimos para desarrollar el análisis del comportamiento de la Bahía.

El manejar información regional y local presentó problemas de escala que en algunos casos resultaron incongruentes, siendo usados estos datos con las reservas necesarias.

Con lo mencionado anteriormente se pretende mostrar que el estudio tiene limitaciones de información y en cuanto estas pudieran ser mejoradas, los resultados también serán más aproximados a la realidad.

Respecto a la tecnología empleada para llegar a establecer un diagnóstico, es importante mencionar que en algunos aspectos existen demasiadas variables que influyen en el funcionamiento y que se recurrió a fórmulas empíricas o a modelos aproximados para la concepción del mismo.

Dentro de los fenómenos considerados para realizar el diagnóstico del estuario se pueden citar una serie de características o aspectos importantes tales como; direcciones de oleaje, volúmenes anuales de transporte debidos a la fuerza del oleaje, registros del viento dominante, principales trayectorias ciclónicas y sus efectos en el sitio de estudio, área de drenaje del distrito de riego

que descarga a la Bahía, erosión debida al viento en la isla Huivulai, etc.

V.1 Principales consideraciones y resultados.

Pese a que, como se menciona anteriormente, existen algunas carencias en la información utilizada, los análisis realizados conducen a conclusiones aceptables, ya que en algunos casos, por diferentes caminos se llegó al mismo resultado.

Para establecer el diagnóstico se utilizaron las siguientes consideraciones y resultados de la información procesada:

- a) Según el plano de refracción de oleaje (ver Figura III. 3.1.3), debido a su posición, las principales direcciones en que la costa de Tóbari recibe una cantidad significativa de energía debido al oleaje son las direcciones; Oeste (W), Sur (S) y Suroeste (SW).
- b) De acuerdo con los cálculos mostrados en el capítulo III y partiendo de los resultados por diferentes métodos, el volumen anual transportado por el oleaje se estimó entre 20 y 30 mil m³/ año, estableciéndose la dirección del transporte de Noroeste (NW) a Sureste (SE), es decir de la boca Norte a la boca Sur.

- c) Según los registros proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, las direcciones del viento dominante proceden del oeste (W), Oeste-Suroeste (W-SW), Suroeste (SW), Sur-Suroeste (S-SW), y del Este-Noroeste (E-NW), mismos que fueron considerados para el trazo de los canales de penetración del estuario, así como para verificar las direcciones predominantes de oleaje.
- d) Debido a que al estuario descarga un área significativa de terrenos principalmente agrícolas (aproximadamente $4.6 \times 10^8 \text{ m}^2$), y por lo consiguiente, sujetos a la erosión de los mismos, se consideró necesario evaluar el arrastre de sólidos sedimentados, llegándose a la conclusión de que se puede prescindir del arrastre de fondo de los drenes en época de estiaje, puesto que en condiciones normales y debido a la poca pendiente de los mismos, en ellos no se alcanzan velocidades considerables y por lo tanto no son capaces de transportar cantidades importantes de sólido de fondo. Ocurre todo lo contrario en época de lluvias, cuando los drenes adquieren velocidades considerables y grandes volúmenes de sólidos provenientes del área de cultivo son arrastrados y descargados al estuario.

- e) Otro resultado importante es la estimación del volumen anual de suelo perdido en la cuenca, el cual es de aproximadamente $152\ 000\ \text{m}^3/\text{año}$ equivalente a un 0.15% del volumen de agua en el estuario, mismo que se estimó en 100 millones de metros cúbicos.
- f) Se evaluó también el transporte de arena debido al viento, concretándose el análisis a la isla Huivulai, formación arenosa que protege al estuario del oleaje, misma que es muy erosionable ante la fuerza del viento, sobre todo cuando éste es ciclónico. Del análisis se concluye que un viento de características ciclónicas (más de 100 K./hora para el ciclón Pauline) actuando durante 6 horas, puede transportar $7\ \text{m}^3$ por cada metro de ancho. Aunque es poco frecuente que un viento que presenta estas características pueda durar al tiempo mencionado y actuando con la misma intensidad, de cualquier forma los resultados anteriores hacen pensar que el transporte eólico es un fenómeno que no debe pasarse por alto, ya que debido a su fuerza y presentándose en zonas tan altamente erosionables contribuye a incrementar el problema con cantidades significantes de azolve. Además, las cantidades de arena transportadas por el viento proveniente de Huivalai constituyen un peligro potencial para la conservación del

estuario, por esta razón es imperativo tomar medidas en la isla a fin de estabilizarla.

- g) Uno de los resultados más importantes obtenido del modelo de simulación es que existe una zona de calma (casi sin corrientes) cuando no había bordo, que se desarrolla a todo lo ancho de la Bahía y que se encuentra a una distancia de 2 a 2.5 Km hacia el Sureste (SE) de la localización actual del bordo (Figura IV.1.4.2.) lo que indica que esa zona podría haber sido más adecuada para el trazo de dicho bordo pues se tienen condiciones de equilibrio que se mantienen en todas las simulaciones realizadas.

V.2 Diagnóstico

Con base en el análisis realizado, el diagnóstico de la situación actual de la Bahía de Tóbari puede resumirse como sigue:

- Teóricamente, la capacidad de un estuario como Tóbari - aceptará grandes volúmenes de azolve antes de concluir totalmente su funcionamiento hidráulico; sin embargo, debido a los problemas que afronta, (como resultado de la construcción del bordo), en menor tiempo el estuario dejará de ser realmente eficiente y como consecuencia, las comunidades pesqueras que hasta ahora se han desarrollado con éxito se verán seriamente afectadas, probablemente en forma

permanente.

- El azolvamiento de la Bahía de Tóbari es evidente, según se puede apreciar por los bajos existentes en diferentes puntos de la misma y por los playones de limo y arcilla que se han formado en ambos lados del bordo en la proximidad del continente, en donde las descargas de sedimentos procedentes de los drenes se han depositado.

- La boca Norte presenta una tendencia muy clara de un cierre paulatino ya que se observan acumulaciones de arena en el mar frente a la boca, además el arrastre litoral ha empezado a formar una barra que progresa rápidamente y está dificultando el intercambio de agua entre el mar y la Bahía; más no así la boca Sur, que no ha sido afectada de manera importante ya que las velocidades en ella no han cambiado significativamente.

- De acuerdo a la información recabada y del análisis de que ha sido objeto, todo parece indicar que el cierre paulatino de la boca Norte y la entrada del azolve en la Bahía, en forma general, ha ocurrido como consecuencia de la construcción del bordo. Cabe hacer notar que si en la Bahía no existiera el bordo, los problemas de azolve se reducirían en las descargas de los drenes ya que el intercambio de agua entre el mar y la Bahía mejoraría notablemente, logrando una mayor velocidad de la aguas, lo que ayuda a desalojar un mayor volumen de material fino en suspensión.

- Otro problema que se ha producido como consecuencia del bordo consiste en que la zona Norte de la Bahía no logra almacenar los volúmenes de agua inducidos por la acción de la marea, esto es, entre más pequeña sea el área, la transmisión de la marea en la Bahía cubre en menos tiempo toda la zona, disminuyendo la diferencia de niveles entre el mar y la Bahía, y al reducirse el gradiente hidráulico entre estos dos cuerpos de agua, las velocidades en la bocas disminuyen.

- Por último, tomando en cuenta los resultados del estudio, resulta conveniente quitar el bordo, no solo desde el punto de vista técnico sino también desde el punto de vista social; sin embargo, esto no se soluciona con el hecho de destruir el bordo en el sitio que ocupa actualmente, ya que a largo plazo se contraerían mayores problemas, de tal forma que se requerirá, y es lo más recomendable, vaciar parte del material sobre la isla Huivulai y el resto sobre la zona continental.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Teniendo en cuenta los análisis realizados y de acuerdo con el diagnóstico del funcionamiento hidráulico de la Bahía de Tóbari, se recomienda lo siguiente:

- a.1) Remover el bordo de comunicación entre el continente y la isla Huivulai; para tal efecto, una parte del material constitutivo del mismo deberá ser trasladado a la zona continental y el volumen restante a la isla Huivulai. El material que se descargue en la isla vendrá a ayudar a la estabilización de la misma, constituyendo esto un estudio independiente del ahora realizado, complementándolo además, con un análisis para designar el tipo de vegetación que deberá ser plantada en la isla con el fin de lograr su estabilidad.

- a.2) Si se requiere una comunicación con la isla Huivulai es necesario utilizar el bordo, pero para disminuir sus efectos dañinos a un mínimo se deberá dejar un paso libre de 1000 metros, para lo cual se tendría que construir un puente o alcantarilla con un claro libre total de esa longitud. Su colocación deberá hacerse en la mitad cercana al conti

nente. Ello permitirá aumentar las velocidades de las corrientes dentro del estuario y mejorar así el funcionamiento hidráulico del mismo, (ver Figuras VI.1.1 y VI.1.2.).

- b) En cuanto a los canales de navegación se refiere, éstos deberán ser construidos, pues resultan necesarios para que los pescadores se trasladen hasta los centros de recepción de sus productos; además, con su funcionamiento se espera un incremento hidráulico dentro del estuario. Se recomienda también, que se lleve a cabo el dragado dentro de la Bahía, aunque no necesariamente a gran profundidad, sino más bien a una tal que las lanchas puedan navegar en presencia de marea baja. Este dragado es recomendable además, porque aumentaría el volumen del prisma de marea en la Bahía, lo cual mejora el funcionamiento en las bocas.
- c) Por último se hace una recomendación que resulta importante y que consiste en colocar tanques de sedimentación en las descargas de los canales que maneja la S.A.R.H. con la finalidad de detener el material sólido transportado por dichos canales provenientes de la zona agrícola.

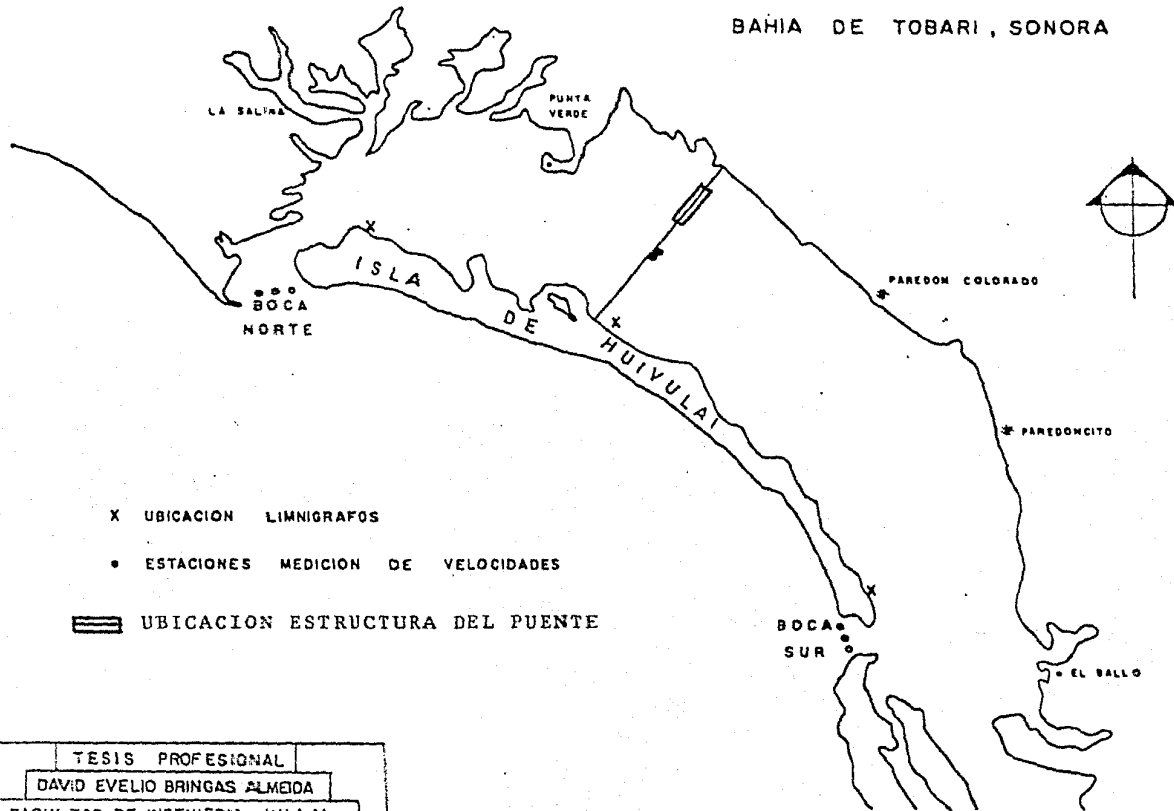
FIGURA VI.1.1. VOLUMENES DIARIOS REMOVIDOS PARA LA MAREA 1

LONGITUD DE ALCANTARILLA	LAGUNA NORTE			LAGUNA SUR		
	ENTRADA	SALIDA	§ DE VOLUMENES REMOVIDOS RESPECTO AL VOLUMEN INICIAL	ENTRADA	SALIDA	DIFERENCIA
20	115.5	116.2	0.7	115.8	117.1	1.3
30	116.2	116.9	0.7	115.5	116.8	1.2
50	117.6	118.3	0.8	114.9	116.2	1.2
100	120.7	121.2	0.9	113.7	114.9	1.2
200	125.8	126.7	0.9	111.8	113.0	1.2
300	129.3	130.4	1.1	110.5	111.7	1.2
400	131.9	132.9	1.1	109.6	110.7	1.1
500	133.5	134.6	1.1	108.9	110.0	1.1
1000 *	137.7	138.9	1.2	107.7	108.8	1.1
2000 *	141.7	143.0	1.3	106.4	107.4	1.0
3000 *	144.5	145.8	1.3	105.5	106.5	1.0
4000 *	146.5	147.9	1.4	104.9	105.9	1.0

$$\% \text{ VOL. REMOV.} = \frac{\text{Vol removido}}{\text{Vol de Bahía a la cota} - 0.46}$$

* Valores ajustados estadísticamente

BAHIA DE TOBARI, SONORA



X UBICACION LIMNIGRAFOS

• ESTACIONES MEDICION DE VELOCIDADES

== UBICACION ESTRUCTURA DEL PUENTE

TESIS PROFESIONAL

DAVID EVELIO BRINGAS ALMEIDA

FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.

FIGURA VI.1.2 NOVIEMBRE DE 1983

BIBLIOGRAFIA .

- 1.- MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES.
(HIDROTECNIA).
A.2.13. HIDRAULICA MARITIMA.
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD.
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS.
- 2.- MANUAL DE HIDRAULICA MARITIMA ELEMENTAL.
(TEXTO)
ING. JOSE LUIS SANCHES BRIBIESCA
INVESTIGADOR
INSTITUTO DE INGENIERIA, U.N.A.M. MEXICO, D.F. 1982
- 3.- MODELO MATEMATICO PARA EL ESTUDIO DE LA HIDRODINAMICA Y DIFUSION EN ESTUARIOS Y LAGUNAS COSTERAS.
ENRIQUE AGUILAR AMILPA.
FERNANDO AGUILAR AMILPA.
CARLOS CRUICKSHANK V.
INSTITUTO DE INGENIERIA, U.N.A.M. MEXICO, D.F. 1973
- 4.- ASPECTS OF A COMPUTATIONAL MODEL FOR LONG-PERIOD WATER- WAVE PROPAGATION.
JAN J. LEENDERISE
UNITED STATES AIR FORCE PROYECT RAND.
SANTA MONICA, CALIFORNIA 1967.
- 5.- REFERENCIA 1.
ESTUDIO Y PROYECTO DE DRAGADO EN LA BAHIA DE TOBARI, MUNICIPIO DE ETCHOJOA, SONORA.
DIRAC, S.A. DE C.V. INGENIEROS CONSULTORES
MEXICO 1981.