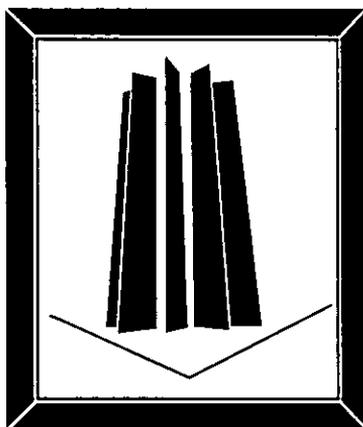


Escuela Nacional de Estudios Profesionales

Aragón



1998

"ESTUDIO DE TRANSPORTE LITORAL EN LA COSTA OESTE DEL PUERTO DE SALINA CRUZ, OAXACA, EN BASE A FORMULAS EMPIRICAS Y MEDICIONES DIRECTAS"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA EL ALUMNO:

MARIO JIMENEZ GOMEZ

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

FEBRERO DE 1998, SAN JUAN DE ARAGON, MEXICO.

**TESIS CON
FALLA DE**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

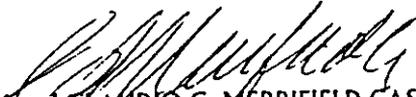
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

MARIO JIMÉNEZ GÓMEZ
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 18 de noviembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. VALENTE TORRES ORTIZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado, "ESTUDIO DE TRANSFORMACIÓN LITORAL EN LA COSTA OESTE DEL PUERTO DE SALINA CRUZ, OAXACA, EN BASE A FÓRMULAS EMPÍRICAS Y MEDICIONES DIRECTAS", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México., 21 de noviembre de 1996
EL DIRECTOR


Mtro. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO


c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/IIa.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ARAGÓN

DIRECCIÓN

MARIO JIMENEZ GOMEZ
PRESENTE.

En atención a su escrito de fecha 13 de abril del año en curso, en el que solicita ampliación del término para la presentación de su trabajo de Tesis, me permito comunicarle que en virtud del avance demostrado en el desarrollo del mismo y con el propósito de no dejar inconclusa la investigación correspondiente, se le concede una prórroga de **dos meses**, contados a partir de esta fecha, para que presente su trabajo totalmente concluido.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

San Juan de Aragón, México, a 14 de abril de 1998.

EL DIRECTOR

Lic. CARLOS EDUARDO LEVY VAZQUEZ

c c p Jefatura del Area de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/v:

*A LA MEMORIA DE ADAN, SERIA INSUFICIENTE EL ESPACIO PARA
EXPRESARTE MI SENTIR, HERMANO...*

A FELIX MI PADRE, QUE SIN SABERLO ME DIO LA MAYOR CONTRIBUCION.

*A MARGARITA , QUIEN CON SU APOYO Y MOTIVACION ME IMPULSO A
SUPERAR MOMENTOS CRITICOS Y A FINALIZAR LA JORNADA EMPRENDIDA.
GRACIAS MADRE.*

*A MIS HERMANOS RAYMUNDO Y MARCOS
... EN SU MOMENTO SUS CONSEJOS Y APOYO FUERON CLAVES...*

*A CLAUDIA, KEVIN Y KENYA
MIS MAYORES MOTIVACIONES*

*AGRADEZCO SINCERAMENTE AL INGENIERO VALENTE TORRES ORTIZ SU
INVALUABLE APOYO PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.*

*IGUALMENTE MI AGRADECMIMIENTO A JESUS IGNACIO HEREDIA A JORGE
RODRIGUEZ Y A LAS PERSONAL QUE ME AYUDARON DIRECTA E
INDIRECTAMENTE EN TODO ESTE PROCESO.*

ÍNDICE.

ASIGNACIÓN DE TESIS	I
RECONOCIMIENTO Y DEDICATORIAS	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	1

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1. ANTECEDENTES	4
1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA	4
1.2. COMENTARIOS SOBRE ESTUDIOS ANTERIORES	6
2. RÉGIMEN OCEANOGRÁFICO	10
2.1. CORRIENTES	10
2.2. OLEAJE	17
3. TRANSPORTE LITORAL	36
3.1. PROPIEDADES DEL AGUA Y SEDIMENTO	38
3.2. INICIACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS	43
3.3. COMPORTAMIENTO DE LOS SEDIMENTOS BAJO LA ACCIÓN DEL OLEAJE	48
3.4. PERFILES DE EQUILIBRIO DE LA PLAYA	56
3.5. CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE LITORAL	59

4. FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA CUANTIFICAR EL TRANSPORTE LITORAL	64
4.1. FÓRMULAS EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE	64
4.2. FÓRMULAS EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE Y DEL MATERIAL PLAYERO	68
4.3. FÓRMULAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE LITORAL	70
4.4. FÓRMULAS LITORAL EN FUNCIÓN DEL OLEAJE Y LA CORRIENTE	75

METODOLOGÍA

5. ESTUDIO DE TRANSPORTE LITORAL EN LA COSTA OESTE DEL PUERTO DE SALINA CRUZ, OAXACA	79
5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	79
5.2. HIPÓTESIS	80
5.3. OBJETIVOS	80
5.4. MATERIAL	81
6. DESARROLLO DEL ESTUDIO	82
6.1. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL TRANSPORTE LITORAL	82
6.2. CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE LITORAL	88

7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	109
7.1. RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE TRANSPORTE LITORAL	109
7.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	109
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
8.1. CONCLUSIONES	112
8.2. RECOMENDACIONES	113
APÉNDICES	115
BIBLIOGRAFÍA	131
GLOSARIO DE TÉRMINOS	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Pág.
1. Zona de rompientes y estrán	14
2. Corrientes de retorno	15
3. Células de circulación cerradas	16
4. Onda de oleaje idealizada	17
5. Clasificación de las ondas	20
6. Fenómeno de refracción	29
7. Construcción de planos de refracción	30
8. Límite de esbeltez de la ola	31
9. Tipos de rompientes del oleaje	33
9bis. Características generales de la ola rompiente.....	35
10. Equilibrio de un grano en el fondo	44
11 . Movimiento orbital de las partículas de agua cerca del fondo	49
12. Corriente en la capa límite de compensación	49
13. Perfil de una playa arenosa	51
14. Corrientes inducidas por el oleaje	52
15. Proceso de inicio del movimiento	52
16. Formación de vórtices cerca del fondo	54
17. Formación de dunas	54
18. Movimiento de arena y agua durante condiciones de calma en la zona de rompientes	56
19. Perfiles de equilibrio de una playa	57
20. Índice de la altura contra la esbeltez de la ola en la rompiente en aguas profundas	89
21. Profundidad contra esbeltez de la rompiente	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
1. Teorías del oleaje	23
2. Tipos de rompientes en relación a la esbeltez y la pendiente ...	34
3. Propiedades del agua	39
4. Tamaño de las partículas de acuerdo con la Unión Geofísica Americana (AGUD)	41
5. Velocidades medias críticas para vencer la cohesión de suelos	47
6. Resultados granulométricos anuales (período 1980-1981)	83
7. Resumen anual de oleaje	86
8. Características del oleaje rompiente	91
9. Transporte litoral calculado con la fórmula de Caldwell	93
10. Transporte litoral calculado con la fórmula de CERC	94
11. Transporte litoral calculado con la fórmula de Savage	95
12. Transporte litoral calculado con la fórmula de Ijima, Sato, Aono e Ishi	96
13. Transporte litoral calculado con la fórmula de Ichikawa, Ochiai, Tomica, Morobuse.....	97
14. Transporte litoral calculado con la fórmula de Manoha	98
15. Transporte litoral calculado con la fórmula de Ijima, Sato y Tanaka	99
16. Transporte litoral calculado con la fórmula del Shore Protection Manual	100
17. Transporte litoral calculado con la fórmula de Larras	101
18. Transporte litoral calculado con la fórmula de Pichkine	102
19. Transporte litoral calculado con la fórmula de Engelund	103

20. Transporte litoral calculado con la fórmula de Bijker	104
21. Transporte litoral calculado con la fórmula calibrada por PEMEX	105
22. Transporte litoral calculado con la fórmula calibrada por el Laboratorio Central de Hidráulica de Francia	106
23. Transporte litoral calculado con la fórmula de Springall	107
24. Mediciones directas de transporte litoral	108
25. Resultados empíricos de transporte litoral	110
26. Comparación de resultados	111

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras han sido históricamente determinantes en el desarrollo de las actividades de los pueblos tanto en el aspecto industrial como comercial, lo que ha motivado un creciente número de técnicas que han hecho posible la existencia de adecuadas estructuras costeras.

Dado que el transporte de sólidos, representado por erosiones o azolvamientos, es uno de los principales problemas de las obras marítimas y portuarias, sobre todo en la determinación de la vida útil de ésta en relación a la cuantía del transporte que se mueve a lo largo de la playa, es necesario determinar las características de este fenómeno para lo cual el presente estudio de transporte litoral se realizó para el puerto de Salina Cruz, Oaxaca, particularmente a la costa Oeste de dicho puerto, llamada Bahía de Salina del Marqués empleando fórmulas empíricas y mediciones directas de transporte litoral para tal fin.

El trabajo fue estructurado en ocho capítulos para su desarrollo. El capítulo primero presenta las características generales de la región dentro de la cual se desarrolla el estudio, además de contener comentarios sobre estudios anteriores realizados para el puerto de Salina Cruz.

En el capítulo segundo se desarrolla la teoría de los principales fenómenos que influyen en la generación del transporte litoral y

que contribuyen al mejor desarrollo del estudio. Se presenta en cada caso los elementos que caracterizan al fenómeno, la fuerza mecánica de su generación, su clasificación, la forma estadística para su análisis, las diferentes teorías que lo describen dando relevancia a la más comúnmente empleada.

El capítulo tercero proporciona elementos prácticos que permiten conocer el orden de la magnitud del movimiento de sedimentos, sin adentrarse en teorías complejas para el estudio de transporte de sedimentos. Para tal efecto se analizan las principales propiedades físicas del agua y de las partículas sólidas, estudiando su comportamiento bajo la acción de las corrientes y el oleaje, así mismo se muestran las diferentes obras que se usan en el control del transporte de sedimentos.

El capítulo cuarto presenta un resumen de expresiones para calcular el transporte litoral, dichas expresiones constituyen los criterios empíricos más importantes que en la práctica se utilizan para su evaluación. Se presenta un ordenamiento de fórmulas atendiendo a los parámetros empleados para su aplicación.

El capítulo cinco contiene el planteamiento del problema motivo de este trabajo, presentando en forma clara la hipótesis y los objetivos a desarrollar y el material empleado para llevar a cabo dicho estudio.

El capítulo sexto contiene los parámetros calculados necesarios para poder aplicar las expresiones empíricas al sitio referido, al igual que se presentan también los resultados de dichos cálculos.

El capítulo siete muestra la comparación de los resultados producto de la aplicación de las fórmulas con las mediciones directas del transporte litoral obtenidas para el sitio en cuestión, así mismo se definen cuales expresiones son las más aplicables para medir el acarreo litoral en ese lugar, y por último en el capítulo ocho se dan las conclusiones y recomendaciones a que se llegó con dicho estudio.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA

El Puerto de Salina Cruz se encuentra localizado a los 16° 9' de latitud Norte y 95° 12' de longitud Oeste, en el litoral Oaxaqueño integrado por varias bahías que se desarrollan desde la punta Chipehua hasta la desembocadura del río Tehuantepec . Estas bahías reciben los nombres siguientes de Oeste a Este: Chipehua, Conejo, Salina del Marqués, Salina Cruz y la Ventosa.

La bahía de Chipehua se localiza entre la Punta del mismo nombre y la Punta de Huetahuichi y su costa es rocosa y acantilada.

La bahía del Conejo está comprendida entre la Punta de Huetahuichi, y la Punta Conejo, siendo una formación arenosa en la cual se aprecian cambios estacionales de consideración y efectos del transporte eólico evidenciados por el movimiento de los médanos de arena.

Entre la Punta Conejo y el puerto de Salina Cruz se encuentra la bahía de Salina del Marqués, a la cual referiremos el presente estudio , esta bahía es la más grande de todas y su característica principal, además del hecho de estar formada por una playa

arenosa en la que existe un promontorio rocoso denominado Punta Cola de Pato , es el de comunicarse con la Laguna del Marqués que es explotada para la extracción de sales por los ribereños.

El puerto de Salina Cruz está en el inicio de la bahía del mismo nombre , cuyos límites son el ahora llamado Cerro del Faro o del Morro y la Punta Ventosa. A partir de esta Punta, se desarrolla la bahía de la Ventosa formada por una playa tendida en la que se aprecian médanos de 20 a 30 metros de altura, cuya localización varía constantemente por efecto de los vientos ciclónicos provenientes del Sureste, ver Plano 1.

En general, esta costa tiene accidentes característicos de una costa juvenil de sumersión, dada la existencia de acumulación de depósitos de arena, laguna y tómbolos, que es factible apreciar en su desarrollo. La acción constante de los agentes atmosféricos e hidrológicos (vientos, lluvias, oleaje, mareas, corrientes marinas, etc.) tienden a modificar todas las salientes y promontorios, rellenar las bahías y producen una línea litoral casi continua.

Cuando ésta se presenta, puede estimarse que el litoral de sumersión ha llegado a la vejez, caso éste muy lejano de alcanzar para la zona en estudio.

Las consideraciones anteriores llegaron a justificar en una época el transporte litoral que ha azolvado a la zona de Salina del Marqués, ya que se decía que los materiales que entraban a este sitio eran acarreados en forma continua desde la bahía de Chipehua por ser ésta una costa rocosa y acantilada en la cual el

proceso erosivo se iniciaba y el material producto de la degradación de las rocas era transportado a las diferentes bahías y finalmente, entraba al puerto.

Sin embargo, el estudio general del transporte litoral en la zona indica la existencia de unidades fisiográficas que se han determinado y en las que se ha establecido un equilibrio como resultado de la acción estacional de los diferentes agentes que tienden a modificar el cordón litoral.

En general la zona tiene un clima tropical lluvioso con precipitaciones en verano, caracterizado por una temperatura mayor a 18 °C y una precipitación media anual del orden de los 1,000 mm.

Su vegetación dominante es la de sabana, y en las proximidades de la serranía es de bosque tropical. Se puede considerar que la zona tiene 150 días despejados en el año, 90 días nublados y 60 días con lluvias, siendo sus temperaturas mínimas del orden de 15 °C, máximas de 40 °C y medias de 27.8 °C.

Los vientos más frecuentes (reinantes o más intensos dominantes) provienen del Norte, alcanzando velocidades máximas hasta de 17 metros por segundo.

1.2 COMENTARIOS SOBRE ESTUDIOS ANTERIORES

Los estudios de transporte litoral realizados en la zona se iniciaron a partir de la fecha en que entró en operación el puerto y se hicieron notar los problemas del dragado, de entre dichos estudios podemos citar aquellos que han llegado a plantear soluciones cuya realización podría haber evitado el azolve continuo del puerto.

En 1909, los Ingenieros Nicolau, David y Anza, propusieron la construcción de una solución llamada "siciliana" que consistía en el encauzamiento de la bocana mediante obras de dirección Norte-Sur, cuya función complementada con obras que permitieran encauzar la corriente Oeste-Este, que según los ingenieros era la responsable del azolve del puerto, permitiría mantener la bocana libre de azolves haciendo que éstos continuaran al Este del puerto. Posiblemente los problemas que atravesaba el país en esa época impidieron la realización de tales obras.

Estudios posteriores llevaron a la conclusión de instalar la draga fija, con los resultados señalados. Después de la construcción de esta draga, se iniciaron los estudios que tuvieron como finalidad, determinar fundamentalmente las corrientes existentes en la zona, ya que éstas, según se decía, habían sido los causantes del proceso de dragado.

En 1955 el Ing. M. Wallet vino en misión al puerto de Salina Cruz, para precisar un programa de estudios que sería necesario realizar para la solución del problema. Dicho programa fue elaborado por la Sociedad Grenoblense de Estudios Hidráulicos (SOGREAH) entre junio y diciembre de 1956.

Los estudios estuvieron orientados fundamentalmente a la observación de vientos, oleajes, muestreo de material playero, corrientes y sondeos hidrográficos que permitieran definir el transporte litoral que según ellos podría ser de 390,000 m³ por año. Las conclusiones de este estudio, fueron que era conveniente la construcción de un espigón de prueba en Cola de Pato cuyo objetivo principal sería el de valorar adecuadamente el transporte

a lo largo de la costa y que fuera la base para la construcción de un modelo reducido, en el cual se estudiarían las diferentes maneras de evitar el problema del azolve al puerto, sirviendo la evolución de la línea de playa para poder verificar el comportamiento del modelo reducido. El espigón de Cola de Pato debería de tener la longitud de 300 metros de largo y podría retener material durante 5 años.

Con el fin de complementar las observaciones hechas por la misión de SOGREA, se estableció un programa adicional de medidas que debería realizar una comisión mexicana integrada por personal de la Dirección General de Obras Marítimas.

En 1957, esta misma Dirección elaboró un estudio más detallado del espigón Cola de Pato, en el cual se consideraba que el volumen de azolve que entraba al puerto, según los volúmenes medios dragados a la fecha, era de 1,200 m³ por día y considerando los 300 metros del espigón se podría resolver la entrada de arenas al puerto durante 10 años.

En el mes de agosto de ese mismo año, el Consejo Técnico Consultivo de la Dirección General de Obras Marítimas realizó un estudio que, tomando en cuenta las diferentes posiciones existentes en esa época, determinó que sería conveniente la formación de un bajo que en forma similar al que se había formado al Este del puerto en la zona de tiro del material de dragado, el cual podría establecerse entre el espigón de Puertos Libres y el rompeolas del Oeste.

La idea de esta obra era la de parar el transporte de material con dirección de Oeste a Este, creando una zona de calma que hiciera factible la acumulación del material antes de llegar al

puerto y que en una etapa posterior podía construirse un enrocamiento semejante a Cola de Pato con una cantidad menor de material.

Con base en las diferentes ideas se decidió encomendar en ese mismo año al Instituto de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México la construcción de un modelo reducido que permitiera verificar por una parte la bondad de la obra en Cola de Pato, así como las otras posibles soluciones que se podrían plantear para resolver el problema del puerto.

Los estudios en modelo reducido realizados por el Instituto de Ingeniería consistieron en el estudio de diferentes alternativas que iban desde la construcción de un espolón en Punta Conejos que propiciara la formación de una flecha litoral en la Bahía del Marqués, la construcción de un sistema de espigones en toda la playa, desde el rompeolas Oeste hasta punta conejos cuya función era estabilizar la línea de playa e impedir el movimiento de arenas, la construcción del espigón en Cola de Pato, hasta la construcción de diferentes obras entre el rompeolas Oeste y el espigón de Puertos Libres que formaran una trampa para el material que debería entrar al puerto y pudiera ser dragado en ese sitio, sin interferir para nada el tráfico marítimo.

CAPÍTULO 2

RÉGIMEN OCEANOGRÁFICO

2.1 CORRIENTES

El adecuado conocimiento de las corrientes es muy importante, sobre todo porque éstas son relativamente fuertes en la región de la costa, las corrientes son los vectores de los sedimentos que se hallan precisamente en suspensión debido al oleaje, y pueden conjugar igualmente su acción con la de éste en lo que se refiere al transporte de sedimentos. Resulta evidente, por otra parte, que su importancia es fundamental sobre la dispersión de los elementos contaminantes.

En general se puede definir a las corrientes como desplazamientos de una masa de agua, determinadas por dos características: dirección y velocidad.

La dirección de una corriente es el rumbo al cual se dirige. La velocidad de una corriente se expresa tradicionalmente en nudos, cuando se tratan aspectos relativos a la navegación (1 nudo = 1 milla marítima por hora = 1,853 m/h).

Las corrientes para su estudio se pueden dividir en cuatro apartados: corrientes oceánicas, corrientes inducidas por el viento, corrientes por marea y corrientes en la costa producidas por el oleaje. Aunque en relación a su ámbito también pueden clasificarse en corrientes locales y generales, en función de su relativa área de influencia, resultando obvia su diferenciación.

2.1.1 Corrientes oceánicas

Las causas que generan las corrientes marinas son esencialmente dos: viento y gradiente.

- El Viento como elemento generador opera por el efecto del arrastre de las moléculas superficiales, las cuales a su vez, por rozamiento actúan sobre las moléculas más profundas, según sea la intensidad y persistencia del viento y también, dependiendo que haya o no elementos que se opongan al mantenimiento del flujo de agua. Por lo tanto, de este tipo de corriente se puede decir que en general es prácticamente superficial y de poca intensidad. Así mismo coincide en dirección con los vientos generales o planetarios y tienen una dirección más o menos constante en el transcurso del año.

- El gradiente como elemento productor de las corrientes ésta determinado por la diferencia de densidades de las masas de agua, la cual es función de la temperatura y salinidad. Una serie de elementos circunstanciales contribuyen a matizar las corrientes cualquiera que sea su origen. La configuración litoral y la topografía del fondo son dos de estos elementos, así mismo, influye también la inercia de la misma corriente, una vez generada.

La aportación de agua dulce puede ser también un elemento característico de un esquema de corrientes, tratándose de corrientes que involucran una gran cantidad de masa de agua, la Fuerza de Coriolis es otro agente que produce un determinado comportamiento.

2.1.2 Corrientes locales inducidas por el viento

Cuando el viento sopla sobre la superficie libre del mar, se produce un esfuerzo cortante sobre el agua debido a lo cual las partículas líquidas que cuando el viento no actuaba describían órbitas elípticas casi cerradas al paso de las olas, ahora tendrán una resultante de translación importante.

2.1.3 Corrientes por marea.

La elevación y descenso periódico del nivel de agua ocasiona movimientos notables en las masas líquidas, sobre todo en zonas costeras en donde la comunicación con el mar abierto está relativamente restringida, (estuarios, bahías, entradas a puertos, desembocaduras, etc.) de esta forma se generan las llamadas corrientes de marea.

A su vez este tipo de corrientes se subdivide en: "corrientes rotativas", cuando su rumbo varía escalonadamente conforme a la rosa de los vientos, en uno u otro sentido a medida que la marea regresa; "corrientes pendulares", cuando el sentido de la corriente cambia según el estado de la marea (flujo o reflujo); "corrientes hidráulicas", caracterizadas por el efecto de represamiento de las aguas producido por una especial configuración de la costa.

La característica primordial de este tipo de corrientes es su periodicidad que puede ser diurna o semi diurna-mixta, según sea la marea astronómica. En las entradas la marea de una corriente fluye en dos sentidos; cuando está creciendo hacia la zona

interna (flujo) y cuando está descendiendo hacia mar adentro (reflujo).

Las características de las corrientes de marea, como es fácil de comprender, cambian de un lugar a otro, dependiendo en primer término del carácter de la marea y en función también de la profundidad y configuración del terreno donde se desarrolla. Por lo tanto no son recomendables las expresiones analíticas para su cálculo, haciéndose necesaria su medición directa.

Los efectos producidos por las corrientes de marea interesan al ingeniero, por lo general, en las zonas inmediatas al litoral; en zonas de mar profundo estas corrientes mantienen una rotación periódica por causa de la fuerza de Coriolis con velocidades relativamente bajas. Por el contrario, en las proximidades de las costas y especialmente en las zonas estrechas, como las antes mencionadas, las velocidades pueden llegar a ser bastante considerables dando lugar a problemas de diversa índole, como pueden ser el transporte de sedimentos, accesos de puertos, transporte de contaminantes, etc.

2.1.4 Corrientes producidas por oleaje.

La importancia de las corrientes producidas por el oleaje radica fundamentalmente en el hecho de que son las que originan y regulan, en su mayor parte, el movimiento de los sedimentos costeros.

En función de la dirección de su movimiento estas corrientes se clasifican en dos tipos:

a) Corrientes normales a la costa.

Son generadas por la necesidad de evacuación del volumen de agua sobrante que ha sido empujado y acumulado contra la playa en el estrán (Fig. 1). Debido a la acción del oleaje y del viento; este exceso de volumen se manifiesta con una sobreelevación del nivel del mar en la zona de rompientes.

Este tipo de corrientes, a su vez, pueden tomar dos formas, la primera se denomina resaca (underflow) y se manifiesta como

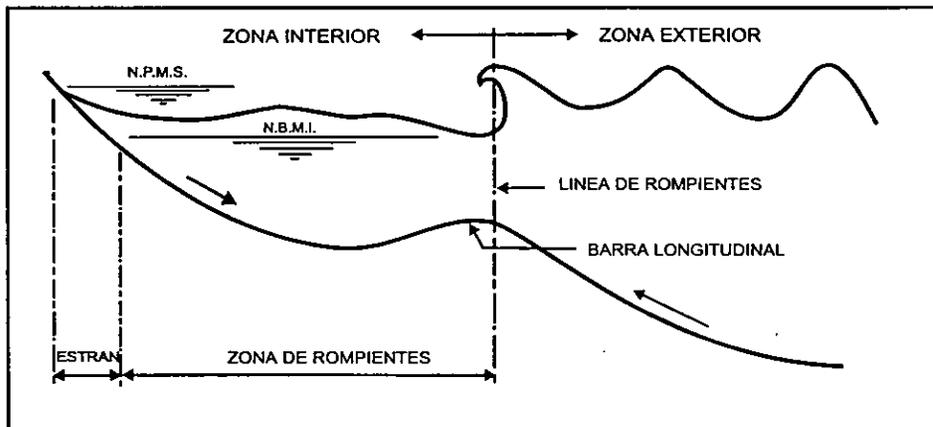


Fig. 1 . Zona de rompientes y estrán

un flujo difuso que arranca del estrán desplazándose próximo al fondo hacia mar adentro a lo largo de prácticamente toda la playa: esta corriente desaparece a la altura de la línea de rompientes no produciendo, entonces, ninguna renovación aplicable del agua.

La segunda forma se denomina corriente de retorno (ripcurrent) y se presenta en forma de chorro concentrado, atravesando la línea de rompientes para expandirse luego (Fig. 2).

Las corrientes de retorno presentan gran dificultad para su análisis, dada su movilidad, y los múltiples parámetros que en ella intervienen, como son: la topografía del fondo, la interacción entre las olas y las corrientes, etc.

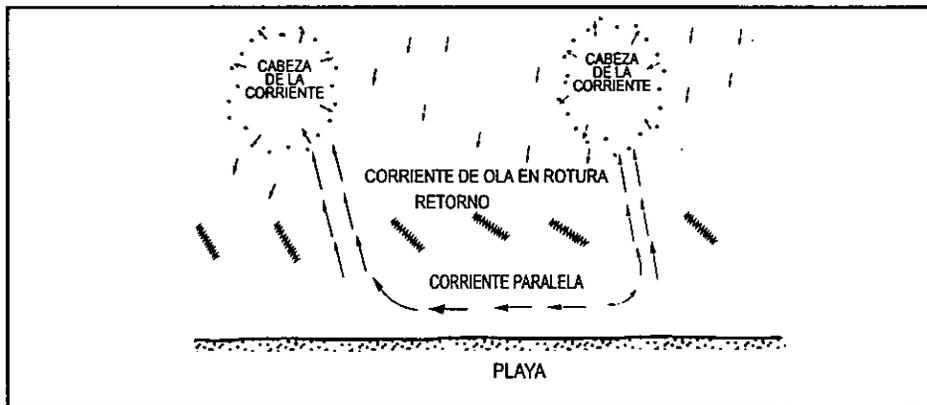


Fig. 2. Corrientes de retorno

Cuando se tienen una incidencia normal del oleaje a la playa, algunos estudios han indicado que se forman células cerradas de circulación de las corrientes (Fig. 3).

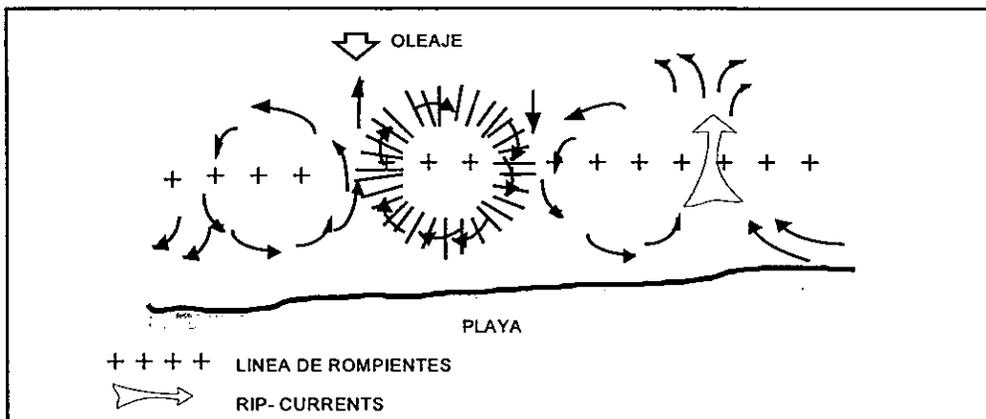


Fig. 3 Células de circulación cerradas.

La importancia de este tipo de corrientes estriba en que producen una calcificación en los sedimentos de las playas, la cual interviene en su balance o estabilidad.

b) Corrientes paralelas a la costa.

Lo más común en una playa es que el oleaje incida formando un cierto ángulo con ella, es decir, oblicuamente, bien sea debido a la refracción que sufre en su acercamiento o por la dirección en que fue generado; debido a ello se formará una corriente paralela a la costa localizada entre la línea de rompientes y la orilla: esta corriente recibe el nombre de "Corriente Litoral" o Corriente a lo largo de la costa (long shore current).

Se considera generalmente que esta corriente es la principal responsable de transportar los sedimentos a lo largo de la costa, una vez que el sedimento ha sido puesto en suspensión

en la rotura de la ola, por tal razón es muy importante dentro de la ingeniería de costas conocerla cuantitativa y cualitativamente.

2.2 OLEAJE.

El oleaje es generado por el viento al actuar sobre la superficie del mar. Dicho oleaje es aparentemente caótico e irregular. El oleaje adquiere una forma más regular a medida que se aleja del lugar en que fue generado ya que hay una separación natural de las ondas en función de su período.

Con la finalidad de describir el oleaje, se ha idealizado la onda que se muestra en la Fig. 4.

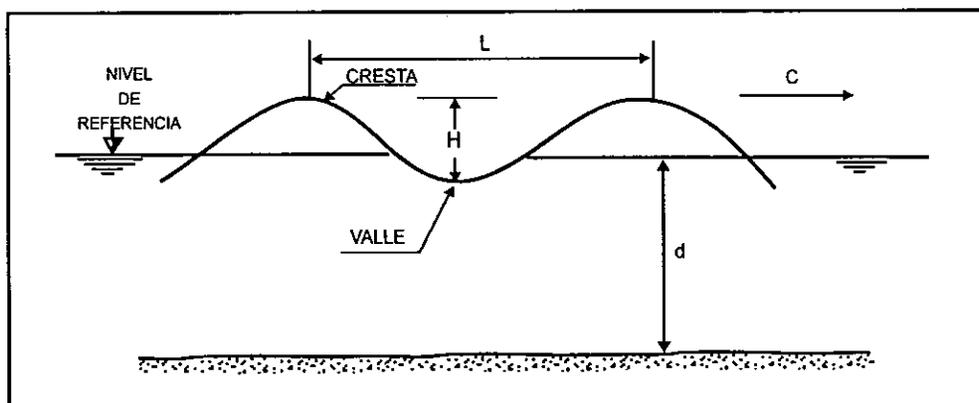


Fig. 4. Onda de oleaje idealizada

La altura de la ola H se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle de una ola determinada; por su parte la longitud L

es la distancia horizontal media entre dos crestas o valles consecutivos. Otra característica importante de la onda de oleaje está dada por su período T , el cual se define como el tiempo que tardan en pasar por un punto fijo dos crestas o dos valles consecutivos; la celeridad C de la onda, es la velocidad con la cual se desplaza la ola. Y así podemos decir que los parámetros que definen el oleaje son su altura H , su longitud L , su celeridad C y su período T . Obviamente siendo el oleaje de naturaleza aleatoria, en un tren de olas se tendrán infinidad de valores de las características antes indicadas.

Para definir las características del perfil de una ola, se utiliza la llamada relación de esbeltez, $g = H/L$; por su parte, la frecuencia del oleaje queda determinada por el inverso del período: $W = 1 / T$. La configuración del oleaje en el mar, varía de una manera irregular, tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que se considera un proceso aleatorio. Debido a estas limitaciones que se tienen para hacer observaciones de este proceso, para poder utilizar los registros disponibles de los desplazamientos de la superficie del mar, se acepta a priori que éstos son típicos del fenómeno y que los cálculos estadísticos realizados en ellos permiten definir una guía de las leyes que gobiernan el oleaje en el mar.

Para tratar de filtrar la información y poder acotar a los parámetros anteriores, es usual referirse a las características del oleaje significativo, el cual se supone coincide con las alturas del oleaje reportado de observaciones visuales. Se define como la altura de la ola significativa, al promedio del tercio medio de

todas las olas más altas en una observación dada. Para que haya concordancia entre la definición de la altura de la ola significativa y la altura de una ola deducida de una observación visual, se supone que la altura significativa es la predominante.

Las ondas en el océano son de una amplia gama de períodos; en la Fig. 5. se presenta un diagrama en donde aparecen los principales tipos de ondas en el océano en relación a su período y los agentes que la producen. Aparecen en la figura, también, las energías correlativas a cada tipo de onda.

Se observa que la onda que tiene una mayor concentración de energía, es el oleaje producido por el viento, el cual tiene períodos máximos de alrededor de 20 seg., habiéndose registrado alturas máximas del orden de 30 m. Las ondas de largo período se asocian a los Tsunamis, generados por temblores ocurridos en el océano o por la erupción de algún volcán submarino, la onda o marea de tormenta, generada por este tipo de perturbaciones meteorológicas y la onda de marea astronómica con períodos de hasta más de 12 hrs.

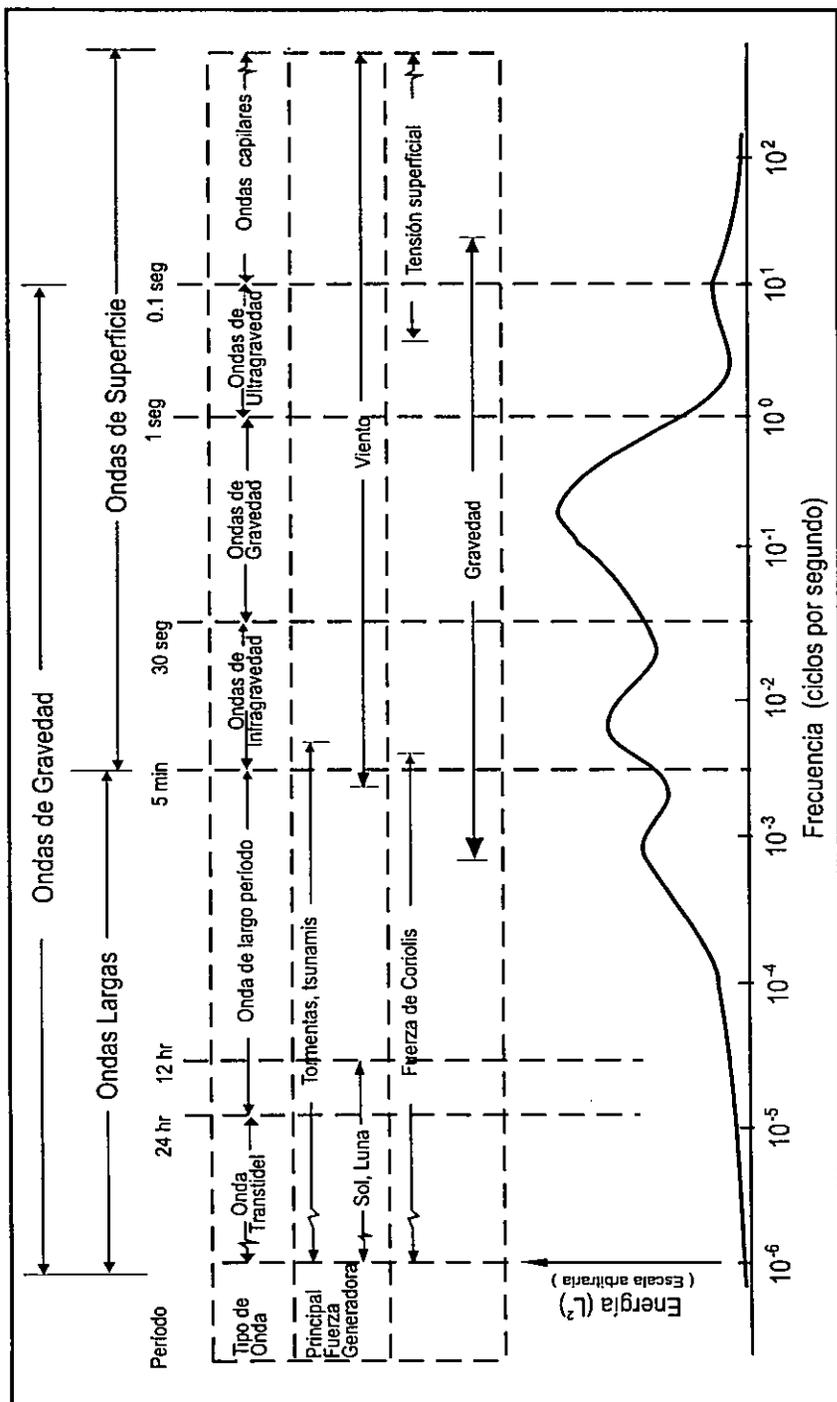


Fig. 5. Clasificación de las ondas.

2.2.1 Teorías de oleaje existente.

Como se ha visto el oleaje se caracteriza por ser irregular y aleatorio, además de desarrollarse prácticamente en dos dimensiones; por ello su descripción matemática presenta ciertas dificultades. Sin embargo, se han desarrollado varias teorías para analizar matemáticamente el fenómeno, mismas que han evolucionado desde que hicieron su aparición, ver Tabla 1.

La teoría más clásica desarrollada por Airy en 1845, se denomina, "teoría lineal de pequeña amplitud" , siendo su importancia notable debido a que se ajusta bastante bien al comportamiento real de las olas cuando se encuentran en profundidades infinitas, siendo, además de fácil aplicación.

En 1802 Gerstner desarrollo la "teoría troncoidal" que fue la primera en considerar ondas de amplitud finita; para describir el perfil de la onda se considera adecuada, dejando mucho que desear en cuanto al movimiento orbital de las partículas. Por su parte Stokes en 1880 estableció una teoría, también de amplitud finita, la cual en sus aproximaciones de 3° y 4° orden describe adecuadamente el oleaje en mar profundo.

Todas las teorías mencionadas no presentan validez cuando se trata de profundidades reducidas ya que no consideran la influencia del fondo del océano sobre el perfil de las ondas. La teoría de Korteweg o cnoidal merece especial mención en este sentido ya que es la que mejor define el funcionamiento ondulatorio en profundidades someras, aunque su principal obstáculo lo representa la dificultad práctica para su aplicación.

La teoría cnoidal tiene su límite de aplicación cuando se acerca la rotura del oleaje en cuyo caso la teoría de la onda solitaria ofrece una buena aproximación y su manejo es relativamente sencillo.

Como se mencionó, la teoría de Airy es la que mayor aplicación tiene en los prácticos comunes. Las hipótesis de partida de esta teoría son las siguientes:

- a.- El fluido es homogéneo e incompresible; por lo tanto la densidad ρ es constante.
- b.- Se desprecia la tensión superficial ($k = 0$)
- c.- Se desprecia el efecto de Coriolis ($F_c = 0$)
- d.- La presión en la superficie libre es uniforme.

2.2.2 Fuentes de información del oleaje estadístico.

La manera más confiable que existe para conocer las características del oleaje para un sitio determinado, sería el de realizar mediciones directas durante un lapso que se recomienda no sea menor de un año, para lo cual en la actualidad existen diferentes aparatos que permiten llevarla a cabo.

Sin embargo, la medición directa casi nunca es posible realizarla, bien sea por motivo de orden económico, o por la necesidad de contar con datos rápidamente, por lo que es común hacer uso de fuentes de información que definen las variables de oleaje en cuanto a período y altura.

A continuación se presentan dos de ellas.

- a.- Datos estadísticos de oleaje (Ocean Wave Statistics).

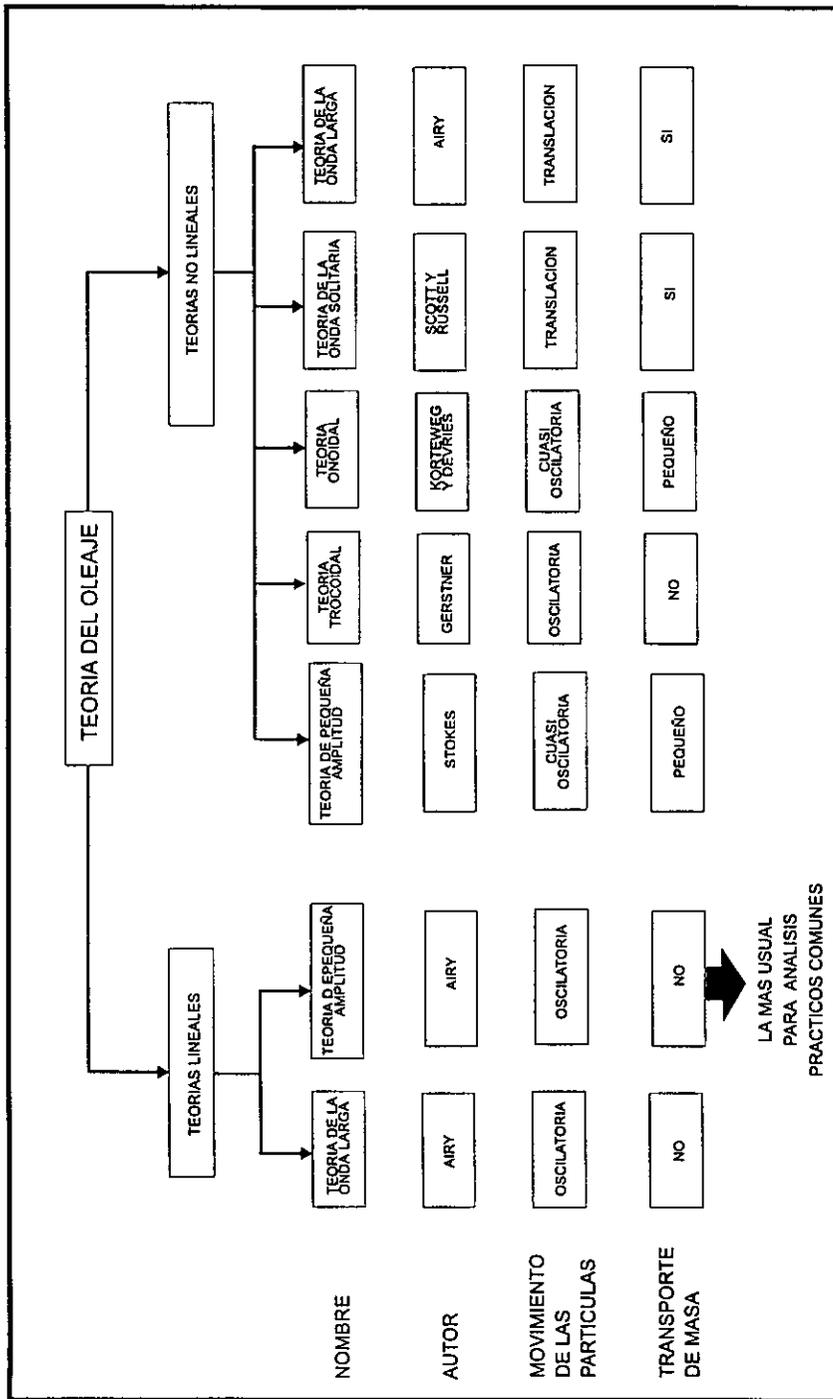


Tabla 1. Teoría del oleaje

Esta fuente de información fue editada en 1967 por el Laboratorio Nacional de Física del Ministerio de Tecnología de la Gran Bretaña y contiene los datos estadísticos del oleaje, estimados visualmente por barcos voluntarios que navegaron en las rutas establecidas en todo el mundo durante los años de 1953 a 1961.

Los datos reportados por los observadores son: dirección, período y alturas de ola, no haciéndose ningún tipo de distinción entre el oleaje local (SEA) y el distante (SWELL).

b.- Cartas de oleaje local y distante (Sea and Swell Charts).

En este caso la información se refiere a las publicaciones denominadas "Atlas of Sea and Swell Charts" tanto del Océano Pacífico Noroeste como del Océano Atlántico Norte, ambas editadas por la U.S. Navy Oceanographic Office, Washington D.C. mismas que fueron procesadas por el Departamento de Estudios y Laboratorios de la Dirección General de Obras Marítimas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Los datos presentados por esta fuente, obedecen a observaciones visuales del estado del mar, realizadas desde embarcaciones durante un período de tres años. Para su presentación el oleaje se agrupa en dos tipos, dando la definición para cada uno de ellos:

1.- Oleaje local (Sea).

Las olas generadas por vientos locales mismas que son generalmente de períodos cortos y superficie irregular rápidamente cambiante que se desplaza en la misma dirección que el viento generado.

2.- Oleaje distante (Swell).

Olas que han avanzado más allá de la influencia de los vientos generados. Son más largas en período, de crestas redondeadas más uniformes, de mayor altura y su dirección es independiente de la dirección del viento.

2.2.3 Refracción del oleaje.

Conforme el oleaje se traslada a aguas someras, el cambio de profundidad causa una disminución en la celeridad debido al efecto de fricción, como consecuencia su longitud disminuye y su altura aumenta y el frente de ese oleaje se reorienta conforme a los contornos del fondo (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).

La velocidad de propagación de una ola progresiva, para un período determinado, de acuerdo a la teoría lineal se expresa:

$$C = \frac{gt}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.1)$$

La disminución de velocidad significa que cuando un tren de olas, de un determinado período, entra en aguas intermedias ($1/25 < d/L_0 < 1/2$) y bajas ($d/L_0 < 1/25$) las distintas partes de la cresta (frente de ola) se desplazan con diferentes velocidades dependiendo de la profundidad, provocando que la cresta se deforme o doble en su proyección horizontal, de tal forma que

tiende a hacerse paralela a las líneas batimétricas sobre las que se propaga.

La importancia de la refracción del oleaje estriba en el hecho de que prácticamente todas las estructuras marítimas se construyen en aguas bajas o intermedias, donde las olas sufren considerables cambios debido a su efecto.

Los patrones del oleaje incidente en una región determinada de la costa, son conocidos normalmente mediante fotografías aéreas o con la construcción de los diagramas de refracción. Por lo tanto, el estudio del fenómeno de refracción es materia obligada para la determinación de las características del oleaje y sus acciones, como por ejemplo:

- ◆ determinar los arrastres de sedimentos.
- ◆ definir los ángulos de incidencia de los frentes de ola con respecto a la línea de costa, los que permiten calcular la tendencia y magnitud del transporte litoral.
- ◆ definir fronteras en modelos hidráulicos.

Además de la refracción causada por el fondo, las olas pueden refractarse por corrientes o por algún otro fenómeno que provoque que una parte de la ola se desplace más rápidamente que otra.

Para definir las características cambiantes del oleaje a diferentes profundidades, es necesario trazar los planos de refracción, por cualquiera de los diversos procesos que existen para ello.

Las ecuaciones fundamentales que rigen la elaboración de los planos de refracción, se basan en la teoría lineal del oleaje

armónico simple de pequeña amplitud. La diferencia de las expresiones para calcular las características del oleaje en relación con la profundidad d en la que se encuentran, están ligadas a los rangos de variación de la relación d/L , y las aproximaciones de las funciones hiperbólicas.

Las características de las olas en aguas profundas y aguas bajas están ligadas por las relaciones siguientes:

Aguas profundas

Aguas bajas

$$C_o = \sqrt{\frac{g L_o}{2 \pi}} \quad C = \sqrt{\frac{g L}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{L}} \quad (2.2)$$

$$T_o = \sqrt{\frac{2 \pi L_o}{g}} \quad T = \sqrt{\frac{2 \pi L}{g} \coth \frac{2 \pi d}{L}} \quad (2.3)$$

$$L_o = \frac{g T_o^2}{2 \pi} \quad L = \frac{g T^2}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{L} \quad (2.4)$$

$$L_o = C_o T_o \quad L = C T \quad (2.5)$$

donde con subíndice "o" se indican las características del oleaje en aguas profundas.

Considerando que $T = T_o$, de la ecuación (2.5) se deduce que:

$$L K = L_o \quad (2.6)$$

donde:

$$K = \cot \frac{2\pi d}{L} \quad (2.7)$$

En la actualidad el fenómeno de refracción puede analizarse mediante métodos gráficos y numéricos; estos últimos no se abordarán en el presente trabajo.

Para poder explicar los métodos gráficos conviene definir como frente de la ola a la cresta de ésta, la cual se supone infinita, y como ortogonal o rayo de la ola a una línea siempre perpendicular a la cresta.

Existen diversos métodos para la construcción de los planos de refracción. En unos se trabaja con los frentes de ola y sus ortogonales, y en otros únicamente con sus ortogonales.

Todas las metodologías están basadas en el principio de óptica denominado como la Ley de Snell, cuyas suposiciones de partida son las siguientes:

a.- La energía comprendida entre dos ortogonales permanece constante (las ortogonales son líneas que se dibujan perpendicularmente a las crestas y se prolongan en la misma dirección de la ola), ver Fig. 6.

b.- La dirección de avance de la ola es perpendicular a su cresta en cada momento.

c.- La celeridad de la ola en un punto en particular, para un período determinado, depende únicamente de la profundidad de ese punto.

d.- Los cambios en la batimetría son graduales.

e.- La forma de la ola es senoidal, de cresta indefinida, pequeña amplitud ($h \ll L$), período constante y monocromática (todas las ondas son iguales).

f.- Se desprecian los efectos de corrientes, vientos y reflexiones del oleaje incidente en la playa.

Los planos de refracción se construyeron usando el método que está basado en el principio de Huygens. C_1 es la celeridad en el punto P_1 , donde la profundidad es d_1 para una ola de período T . La cresta siguiente se encuentra a la distancia $C_1 T$, entonces tangente a la circunferencia de radio $C_1 T$ centrada sobre el punto considerado,. La cresta siguiente es también tangente a la circunferencia de radio $C_2 T$ centrada en el punto vecino P_2

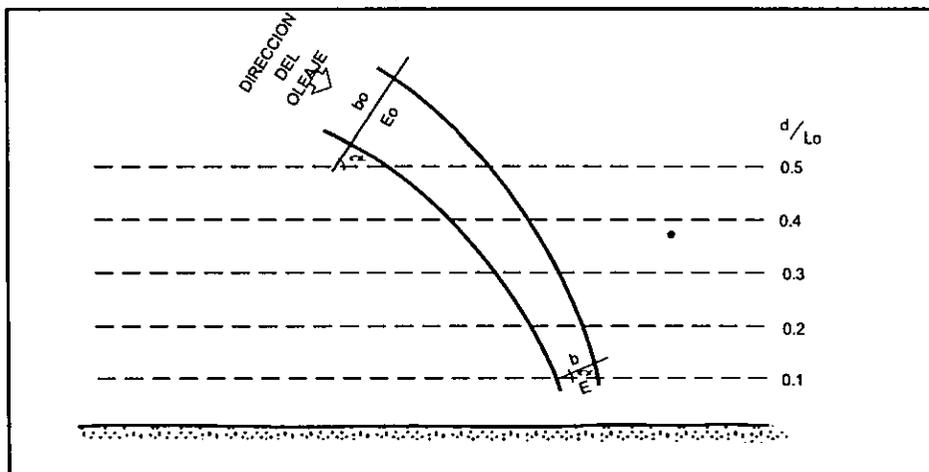


FIG. 6. Fenómeno de refracción

donde la profundidad es d_2 . La cresta siguiente es entonces envolvente de las circunferencias centradas sobre la cresta inicial y de radio $C_1 T$. La celeridad C es calculada en función de la profundidad correspondiente al centro de la circunferencia y a partir del período T , ver Fig. 7.

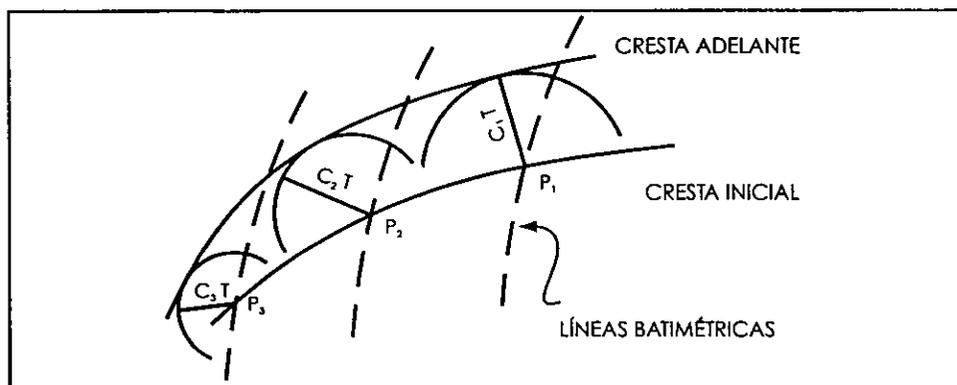


Fig. 7. Construcción de planos de refracción.

2.2.4 Rompientes.

Las olas al desplazarse de aguas profundas a someras disminuyen gradualmente su longitud e incrementan su altura; por tanto la pendiente de la onda aumenta y finalmente rompe a una cierta profundidad.

El fenómeno de rompiente se presenta en el mar que está bajo la acción del viento. Además la rompiente se caracteriza por la presencia de turbulencia e inclusión de aire asociado con una disipación de energía.

La rotura de una ola puede ser motivada por dos causas, que son:

a.- Relación de esbeltez

$$\gamma = H / L \quad ; \quad \text{relación de esbeltez}$$

El valor límite para la rotura de la ola es $\gamma = 0.142 = 1/7$.

Cuando se alcanza este valor la ola empezará su proceso de rompimiento, disipando parcialmente su energía. Esta rotura sucede cuando la velocidad de las partículas en la cresta de las olas se iguala con la celeridad de la onda y un incremento en la relación de esbeltez aumenta la velocidad de las partículas provocando la inestabilidad de la ola. La rotura en este caso está asociada también al ángulo que forma la cresta, tal y como se muestra en la Fig. 8.

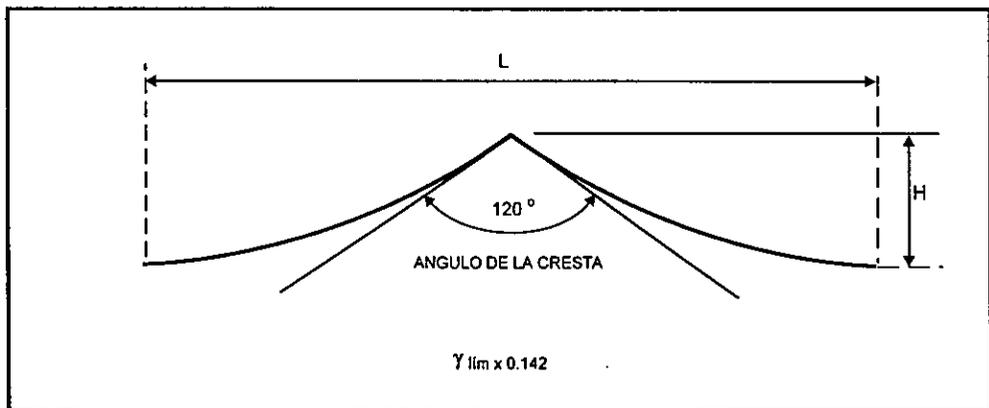


Fig. 8. Límite de esbeltez de la ola.

b.- Por efecto de fondo.

En este caso la ola rompería por efecto de la profundidad del fondo; de acuerdo a la teoría de la onda solitaria modificada, las expresiones que dan las condiciones de rompiente son:

$$\frac{H_b}{H_o} = \frac{1}{3.3(H_o / L_o)^{1/3}} \quad (2.8)$$

$\frac{H_b}{H_o}$ = índice de altura rompiente

$$\frac{d_b}{H_b} = 1.28 \quad (2.9)$$

d_b = profundidad de rompiente

H_b = altura de ola rompiente

Esta última expresión, la más usual, significa que una ola con altura determinada tenderá a romper cuando la profundidad del fondo donde se desplaza alcance un valor de 1.28 veces su altura. A su vez, se ha demostrado que existen fundamentalmente tres formas o tipos en los que la ola puede romper, denominándoseles internacionalmente a cada una de ellas: SPILLING, PLUNGING Y SURGING; aunque algunos autores aceptan una forma más llamada COLLAPSING, ver Fig. 9.

La rompiente Spilling (continua) se caracteriza por romper muy suavemente, y porque en un amplio recorrido, la onda deja tras esta la superficie llena de espuma. No existe una clara línea de rompiente.

La rompiente Plunging (rodante), se distingue por tener una zona de rompiente perfectamente definida, que es donde el agua de la cresta se adelanta a la onda y cae frente a ella, produciendo

mucha espuma y turbulencia y disipando gran cantidad de energía en espacios relativamente cortos.

La rompiente Surging (ondulante) es la que ocurre casi en la línea de playa. La onda se aproxima hasta la línea de costa donde rompe y disipa su energía en forma de un frente con espuma, que sube sobre la playa. La zona de rompiente queda perfectamente definida en la línea de costa.

Finalmente, el Collapsing es una combinación o transición entre las formas Plunging y Surging.

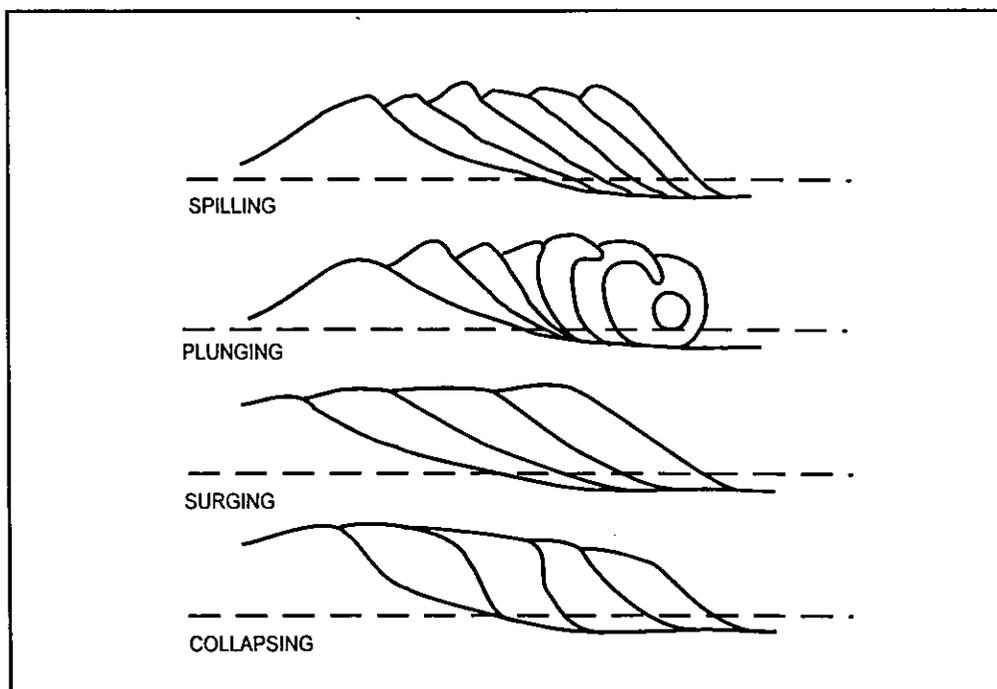


Fig. 9. Tipos de rompientes del oleaje.

Se ha demostrado, por otra parte, que el tipo de rompiente de una ola en una costa depende tanto de la relación de esbeltez γ , como de la pendiente de la playa m ; los valores deducidos al respecto por Wiegel se presentan en la Tabla 2.

PENDIENTE	SURGING	PLUNGING	SPILLING
1:50	$\gamma < 0.0039$	$0.0037 < \gamma < 0.020$	$\gamma > 0.020$
1:20	$\gamma < 0.0079$	$0.0079 < \gamma < 0.035$	$\gamma > 0.035$
1:10	$\gamma < 0.010$	$0.010 < \gamma < 0.070$	$\gamma > 0.060$

Tabla 2. Tipo de rompiente en relación a la esbeltez y la pendiente.

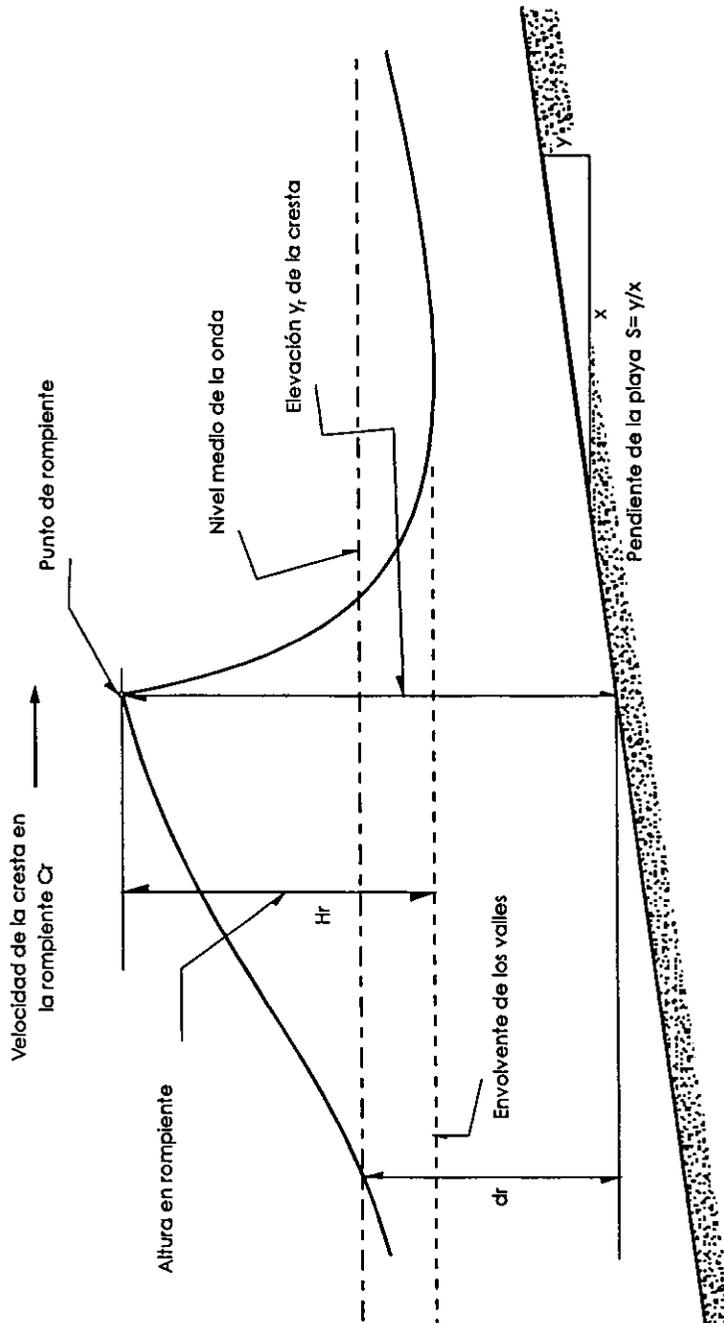


Fig. 9 bis. Características generales de la ola rompiente

CAPÍTULO 3

TRANSPORTE LITORAL

El transporte de sedimentos o acarreo litoral es el fenómeno que se lleva a cabo en una playa, cuando las partículas sólidas que la componen se transportan a lo largo de ella; se sabe que el arrastre de sólidos se produce principalmente entre la línea de playa y la zona de rompientes, aunque también fuera de ésta se produce transporte.

Es muy importante señalar que a la fecha el nivel de conocimiento del fenómeno de transporte litoral, no se ha desarrollado totalmente, resultando necesario realizar mediciones sistemáticas en el campo de los diferentes procesos relacionados con este fenómeno . No obstante que existen numerosas publicaciones de los diversos procesos relacionados con el transporte de sedimentos, el estudio de estos en la naturaleza misma nos ha indicado que es el mejor libro de texto.

Desde el punto de vista ingenieril, el estudio del transporte de sedimentos, se ha concentrado en:

- La observación de los perfiles de equilibrio.
- Determinación de la profundidad de inicio de movimiento de los sedimentos.
- Estudio de las corrientes que se presentan.
- Estudio de la distribución de tamaños y composición

mineralógica de los sedimentos a lo largo de la costa.

- Desarrollo de métodos para cuantificar el transporte litoral y conocer su dirección.
- En ingeniería de costas sirve para diseño de protecciones costeras y puertos.

En base en lo anterior podemos señalar que uno de los principales objetivos en el estudio de transporte de sedimentos es predecir si se tendrá una condición de equilibrio o existirá erosión o depositación y determinar las cantidades involucradas. La cantidad de transporte de sedimentos, expresada como masa, peso o volumen por unidad de tiempo, puede ser determinada por medio de mediciones de campo o por métodos analíticos; con ambas formas se obtienen resultados poco precisos, por lo que posibles variaciones en las cantidades de transporte calculadas tendrán que ser consideradas para fines de diseño. El problema fundamental para el conocimiento de transporte de sedimentos es la complejidad del proceso de transporte; la interacción de un flujo turbulento, cuyas características son solamente conocidas por empirismos, y la frontera consistente en la pérdida de sedimentos, difícilmente puede ser descrito por simples ecuaciones. Por lo tanto, la mayor parte del conocimiento está basado en experimentos y mediciones en campo y laboratorio.

Las causas que provocan el transporte de sedimentos en las costas son básicamente las corrientes y el oleaje; provocan esfuerzos cortantes sobre los sedimentos sólidos y hacen que sean transportados en suspensión o por el fondo a distancias más o menos grandes y depositados en zonas tranquilas. Por ello antes

de emprender la realización de una obra es preciso tomar en cuenta las posibles interacciones entre el fluido en movimiento y los sedimentos del fondo sobre los que éste actúa.

La naturaleza de esta interacción es sumamente compleja y el movimiento de los sedimentos depende de múltiples parámetros como son: gradientes de velocidades en el fluido, turbulencias, geometría del fondo, naturaleza de los materiales, espesor del sedimento en movimiento, porosidad y cohesión de los depósitos y características del fluido entre otras. Además, todos estos parámetros no son constantes en el tiempo y en el equilibrio final de los sedimentos no será más que una resultante de acciones hidrodinámicas, en las que el fluido y sólido reaccionan uno sobre otro.

Las leyes que rigen estos fenómenos aún no se conocen a la perfección, por lo que resulta difícil, incluso imposible, prever con precisión, la evolución de un fondo sometido a múltiples acciones hidroneumáticas, mediante un simple enfoque teórico del movimiento de los sedimentos.

Utilizando en combinación algunas leyes teóricas y empíricas es posible comprender mejor el movimiento de los sedimentos.

3.1 PROPIEDADES DEL AGUA.

Algunas de las propiedades del agua se muestran en la Tabla 3.

Las propiedades del sedimento más frecuentemente usadas son:

a.- Tamaño.

Una clasificación adecuada del tamaño de las partículas es la dada por la Unión Geofísica Americana para arcillas, limos, arena, grava, guijarros y cantos rodados (Tabla 4), la cual se basa en el diámetro de la abertura del tamiz (D). Además de este diámetro existe el diámetro de sedimentación (D_s) y el diámetro nominal (D_n).

b.- Forma.

Aparte del diámetro también la forma es de importancia. Una partícula plana tendrá una menor velocidad de caída y será más difícil de transportar por el lecho o fondo que una redonda. Para caracterizar la forma del grano se hace uso del "Factor de Forma", $s.f. = c/\sqrt{ab}$ donde a, b y c son tres ejes mutuamente perpendiculares de los cuales a es el mayor, b el medio y c el menor.

Para esfera s.f. = 1, para arenas naturales s.f. = 0.7

Propiedad	Símbolo	Unidades	Expresión
Peso específico	γ	kg / m ³	-----
Densidad Relativa	Δ	-----	$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$
Viscosidad cinemática	ν	m ² seg ⁻¹	$\nu = \eta / \rho_w$
Viscosidad dinámica	μ	kg m ⁻¹ s ⁻¹	$\mu = (\eta a_u) / a_z$
Tensión superficial	σ	kg s ⁻¹ σ N m ⁻¹	-----

ρ_s = densidad del agua de mar (1,026 Kg/m³)

ρ_w = densidad del agua dulce (1,000 Kg/m³)

para la superficie agua/aire : $\sigma = 0.074$ N/m a la presión atmosférica

Tabla 3. Propiedades del agua.

c) Densidad.

La mayoría de los sedimentos tiene su origen en la desintegración o descomposición de rocas.

- Arcilla : fragmentos de feldespato y micas.
- Limo : sílicas
- Arena : cuarzo
- Grava y cantos rodados : fragmentos de roca original.

La densidad de la mayoría de las partículas (<4 mm de D) varia muy poco. Debido a que el cuarzo es predominante en sedimentos naturales, la densidad promedio puede ser asumida como 2,650 kg/m³; aunque algunas veces están presentes minerales pesados los cuales generalmente son segregados durante la formación de rizos u otros modos de transporte. Los minerales arcillosos varían entre 2,500- 2,700kg/m³ de densidad.

T A M A Ñ O			TIPO
Milímetros	Micras	Pulgadas	
4000 - 2000		160 - 80.0	cantos rodados muy grandes
2000 - 1000		80.0 - 40.0	cantos rodados grandes
1000 - 500		40.0 - 20.0	cantos rodados medianos
500 - 250		20.0 - 10.0	cantos rodados pequeños
250 - 130		10.0 - 5.00	grandes guijarros
130 - 64		5.00 - 2.50	pequeños guijarros
64 - 32		2.50 - 1.30	grava muy gruesa
32 - 16		1.30 - 0.60	grava gruesa
16 - 8		0.60 - 0.30	grava media
8 - 4		0.30 - 0.16	grava fina
4 - 2		0.16 - 0.08	grava muy fina
2.00 - 1.00	2000 - 1000		arena muy gruesa
1.00 - 0.50	1000 - 500		arena gruesa
0.50 - 0.25	500 - 250		arena media
0.2500 - 0.1250	250 - 125		arena fina
0.1250 - 0.0620	125 - 62		arena muy fina
0.0620 - 0.0310	62 - 31		limo grueso
0.0310 - 0.0160	31 - 16		limo medio
0.0160 - 0.0080	16 - 8		limo fino
0.0080 - 0.0040	8 - 4		limo muy fino
0.0040 - 0.0020	4 - 2		arcilla gruesa
0.0020 - 0.0010	2 - 1		arcilla media
0.0010 - 0.0005	1 - 0.50		arcilla fina
0.0005 - 0.00025	0.50 - 0.25		arcilla muy fina

Tabla 4. Tamaño de las partículas de acuerdo con la Unión Geofísica Americana (AGUD).

d) velocidad de caída de sedimentos no cohesivos.

La velocidad de caída de un sedimento es un parámetro fundamental en estudios sobre suspensión y sedimentación de partículas.

La velocidad de caída está definida por la ecuación que da el equilibrio entre la fuerza de gravedad y la resistencia al flujo:

$$\frac{\pi}{6} D^3 (\rho_s - \rho_w) g = C_D \frac{1}{2} \rho_w W^2 \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.1)$$

gravedad resistencia

en la cual:

C_D = Coeficiente de arrastre

W = Velocidad de caída

D = Diámetro de la partícula

de esta relación se tiene:

$$W = \left(\frac{4 g D}{3 C_D \Delta} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (3.3)$$

Δ = Densidad relativa.

Los valores de C_D dependen del número de Reynolds ($Re = W D / \nu$) y de la forma de la partícula (expresada por $s.f. = c / \sqrt{ab}$).

e) Velocidad de caída de sedimentos cohesivos en agua calma.

En un medio con sal disuelta, las partículas se juntan en flóculos de 0.5 a 1.5 mm de diámetro por lo que W es de 10 a 100 000 veces más grande que para las partículas individuales. Este

fenómeno de floculación es más efectivo cuando la salinidad y la temperatura son elevadas.

3.2 INICIACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS.

Al avanzar el oleaje de la playa hacia la costa, a cierta profundidad los sedimentos empiezan a moverse por la acción de la energía del oleaje, a la que se le conoce como profundidad límite de inicio de movimiento.

Se denomina movimiento inicial, al estado en que algunas partículas de la primera capa sobre la superficie del fondo empiezan a moverse, y movimiento general, al estado en que todas las partículas sobre la superficie del fondo del mar empiezan a moverse.

El equilibrio de una partícula sobre el fondo es perturbado cuando el efecto resultante de las fuerzas (de arrastre, sustentación y viscosas) sobre la superficie de la partícula llegan a ser mayores que las fuerzas estabilizadoras como la gravedad y la cohesión. La cohesión es importante solamente en sedimentos en el rango de arcillas y limos o arenas finas con un apreciable contenido de limo.

El aspecto teórico sobre el inicio del movimiento empezó a ser analizado por Brahm (1753) y posteriormente Dubuat (1779-1786) el cual introdujo el concepto sobre esfuerzo cortante de fondo e hizo algunos experimentos sobre el movimiento de partículas.

Posteriormente White (1940) dio una explicación completa sobre el equilibrio de un grano en el fondo, dentro de un flujo, ver Fig. 10.

- La fuerza perturbadora F (resultante de las fuerzas de arrastre y sustentación) será proporcional al esfuerzo cortante τ_o y al área superficial de la partícula (D^2).

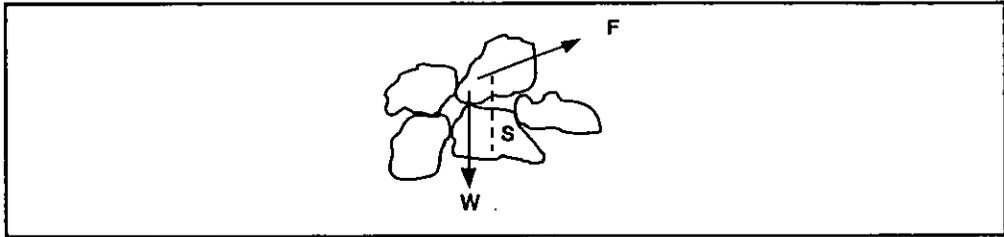


Fig. 10. Equilibrio de un grano en el fondo.

- La fuerza de gravedad estabilizadora es proporcional a : $(\rho_s - \rho_w) g D^3$. Tomando el momento con respecto al punto de giro "s" resulta la ecuación:

$$0.11 \tau_o D^2 \geq 0.12 (\rho_s - \rho_w) g D^3 \quad (3.4)$$

ó

$$\tau_o \geq C (\rho_s - \rho_w) g D \quad (3.5)$$

El factor C dependerá de la condición del flujo cerca del lecho, la forma de la partícula, la posición relativa de la partícula con respecto a otras partículas, etc. La condición del flujo (Re^*) cerca del lecho puede ser descrita por la relación del tamaño del grano con respecto al espesor de la subcapa viscosa, que es proporcional a $U^* D / \nu = Re^*$, Número de Reynolds basada en el tamaño del grano y la velocidad al corte (U^*).

La dificultad de todas las pruebas es la definición de "iniciación" de movimiento: es el movimiento de la primera partícula o de un gran número de granos. Shields relacionó el tipo de transporte de sedimentos con τ_0 y definió τ_{cr} por extrapolación para transporte de material nulo. En donde τ_{cr} es el esfuerzo cortante crítico.

3.2.1. Efectos de varios factores sobre el sedimento

a) Efecto del criterio usado .

Es claro que el valor crítico de τ_0 dependerá del criterio para la iniciación del movimiento . Con el fin de tener un criterio objetivo Neill (1968-1969) propuso el parámetro adimensional:

$$N = nD^3 / U^* \quad (3.6)$$

En el cual n es el número de granos dispersados por unidad de área y por unidad de tiempo. Para material rugoso Shields dio el valor de $N = 15 \times 10^{-6}$.

b) Efecto de la forma de la partícula .

Los experimentos de Shields fueron hechos con diferentes tipos de material y en ellos no se obtuvo influencia alguna de la forma de la partícula. Pruebas en el Laboratorio de Hidráulica de Delft (Holanda), con material grueso, mostraron que el valor crítico de τ_{cr} es el mismo para varias formas (esferas, cubos, piedras rotas, etc.), si el diámetro nominal D_n es el parámetro de comparación.

c) Efecto de graduación.

Es claro que un amplio rango de graduación tendrá influencia sobre τ_{cr} . En la práctica la graduación tiene influencia para $D_{95}/D_{50} > 5$ solamente (Knoroz 1971), ya que los granos grandes están más expuestos y los más pequeños están cubiertos por los más grandes. Por lo tanto el D_{50} es una buena medida para la mayoría de muestras.

Para una amplia graduación ocurrirá el efecto "coraza" el cual significa que las partículas finas son erosionadas y una capa coraza de partículas gruesas se forma previniendo al lecho de erosiones subsecuentes.

d) Efecto de h/D .

La estructura turbulenta cerca del lecho en un fluido infinito está completamente definida por el esfuerzo cortante del lecho (τ_o) y rugosidad (K_s), pero para pequeños valores de h/D la profundidad da una limitación sobre el tamaño de los vórtices grandes. El radio de la duración del vórtice y el tiempo necesario para acelerar una partícula llega a ser pequeño; por tanto puede ser esperada una influencia de h/D (se tiene mayor estabilidad con h/D pequeños).

Experimentos han demostrado que τ_{cr} aumenta con decrementos de h/D (Ashida, 1973).

e) Sedimentos cohesivos.

El carácter cohesivo de un suelo aumentará su resistencia contra la erosión: datos empíricos sobre velocidades medias críticas en m/seg. para este tipo de suelos se presenta en la Tabla 5.

	SUELO MODERADAMENTE COMPACTO		COMPACTO
Arena Arcillosa	0.45	0.9	1.25
Arcilla	0.35	0.8	1.2
Suelo arcilloso pobre	0.3	0.7	1.05

Tabla 5. Velocidades medias críticas para vencer la cohesión de suelos.

Diferentes autores han tratado de correlacionar el esfuerzo cortante crítico con las características del suelo (contenido de limo, índice de plasticidad, etc.). De los resultados de las investigaciones se deduce que para suelos cohesivos con $D_{50} = 10 - 100 \mu$ es posible tener velocidades cortantes críticas $U_{cr} = 3 - 4.5$ cm/seg.

Para sedimentos depositados muy recientemente (por ejemplo limos en estuarios), se dan relaciones entre U_{cr} y el peso seco de los sedimentos. Los valores mínimos son del orden de $U_{cr} = 1.0$ cm/seg. (Período de consolidación de algunos días) a 3.0 cm/seg. para períodos de consolidación de algunas semanas.

3.3 COMPORTAMIENTO DE LOS SEDIMENTOS BAJO LA ACCIÓN DEL OLEAJE.

Bajo la acción del oleaje, los sedimentos están sometidos a diferentes fuerzas: unas provienen directamente del movimiento orbital de las partículas de agua en las cercanías del fondo (Fig. 11), otras de las corrientes en la capa límite y de las corrientes de compensación (Fig. 12).

Cerca de la costa el oleaje produce, además, una corriente paralela a la costa (Longshore Current) debido a su incidencia oblicua, cuya magnitud en un temporal es semejante a la de un gran río en época de avenidas. Adicionalmente, en la parte alta de las playas, al precipitarse sobre estas el oleaje, se producen desplazamientos de los sedimentos en "zig-zag" o diente de sierra que llegan a ser de gran importancia.

3.3.1 Movimiento del agua producida por el oleaje cerca del fondo.

Cerca del fondo, el oleaje produce corrientes capaces de provocar la oscilación de las partículas sólidas si su velocidad es superior a la velocidad crítica de inicio de movimiento de los sedimentos. La velocidad máxima orbital, U_{max} en el fondo está dada por la expresión:

$$U_{max} = \frac{\pi H}{T \operatorname{sen} h \frac{2\pi d}{L}} \quad (3.7)$$

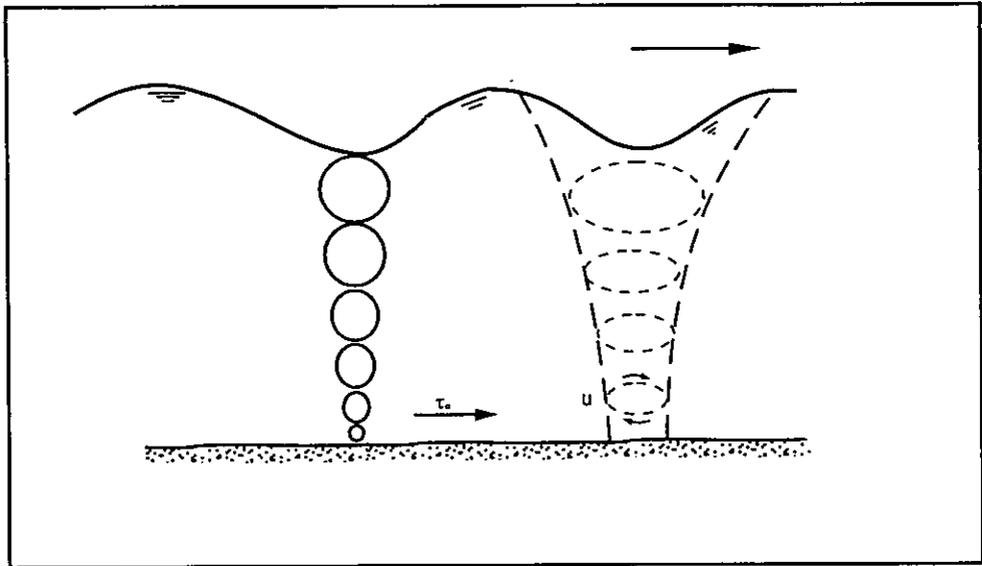


Fig. 11. Movimiento orbital de las partículas de agua cerca del fondo.

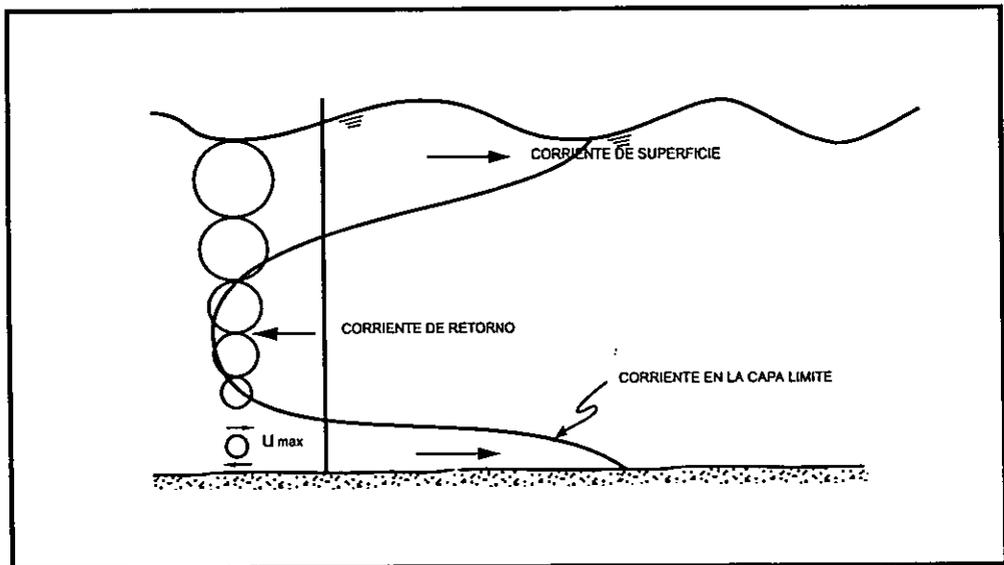


Fig. 12 Corriente en la capa límite y de compensación.

Por otra parte, la velocidad de corte U^* en el fondo se expresa como:

$$U^* = \left(\frac{8 \nu U_{\max}}{\pi T} \right)^{1/4} \quad (3.8)$$

sustituyendo U_{\max} en esta ecuación queda:

$$U^* = 0.07 \left(\frac{H^2}{T^3 \sin 2h \frac{2\pi d}{L}} \right)^{1/4} \quad (3.9)$$

siendo:

ν = viscosidad cinemática del agua = 10^{-6} m²/seg a 20 ° C.

Por otra parte el esfuerzo cortante en el fondo τ_0 queda expresado como:

$$\tau_0 = \rho U^{*2} \quad (\tau_0 \text{ en Newton/m}^2, \text{ si } U^* \text{ en m/seg}) \quad (3.10)$$

3.3.2 Mecánica del transporte de sedimentos bajo la acción del oleaje.

El movimiento de sedimentos que se produce en la costa se realiza generalmente en dos zonas que son: la parte INTERIOR (ONSHORE) y la parte EXTERIOR (OFFSHORE). La parte interna se subdivide, a su vez, en dos zonas que se conocen como: zona de rompientes y zona de estrán (Fig. 13). Paralelamente, tomando en cuenta el sentido de movimiento de los sedimentos bajo la acción del oleaje tiene dos tipos: transversal y longitudinal. El movimiento longitudinal, conocido también como transporte litoral, es más importante que el transversal en problemas de azolvamiento de los accesos portuarios.

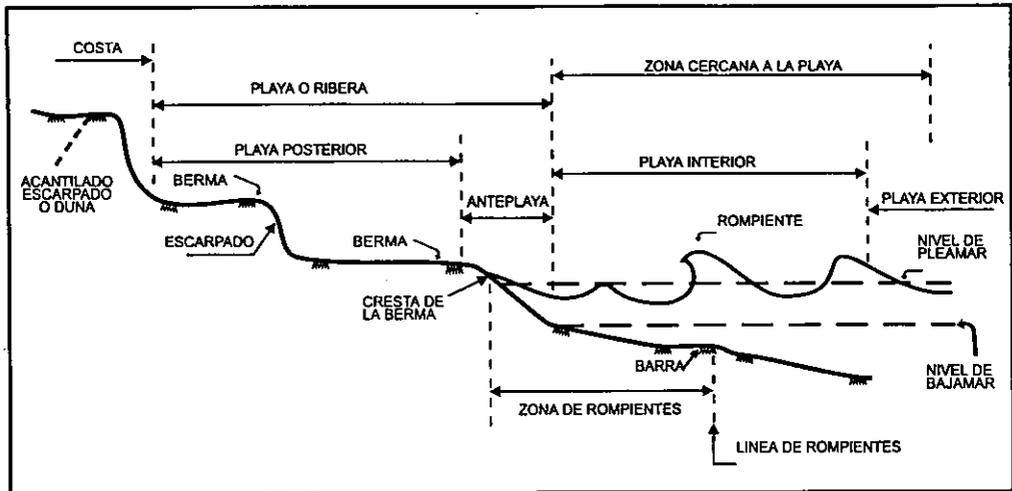


Fig. 13. Perfil de una playa arenosa.

Cuando la ola llega a la costa con un cierto ángulo, la supuesta componente de la energía paralela a la costa produce una corriente litoral y por consiguiente un transporte de sedimentos a lo largo de la misma. (Fig. 14b).

El transporte litoral se efectúa siguiendo dos procesos:

1. Por el efecto de la ola al precipitarse sobre la parte alta de la playa; la ascendente transporta sedimentos en dirección de la ola y desciende por la línea de mayor pendiente produciendo un transporte en diente de sierra (Fig. 14a).
2. Debido al rompimiento de la ola y a la corriente longitudinal; el sedimento en esa zona (rompiente) sigue un camino análogo al que se tiene en lo alto de la playa y la corriente longitudinal acarrea los sedimentos como si fuera una corriente permanente llamándose corriente en la rompiente (Fig. 14b).

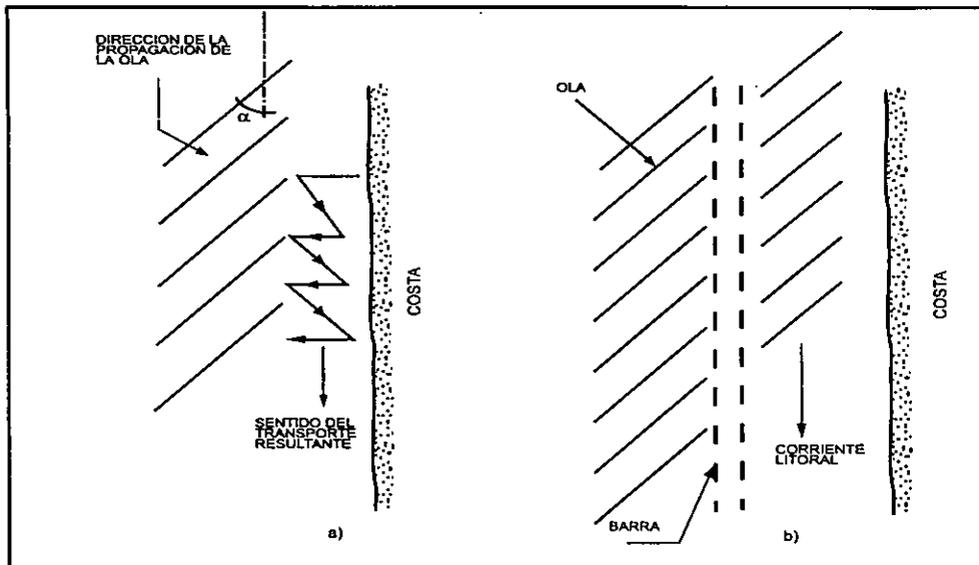


Fig. 14. Corrientes inducidas por el oleaje.

La parte exterior de la playa se extiende mar adentro desde la zona de rompientes hasta la distancia en que la superficie del fondo deja de ser agitada por la acción de la ola. En esa parte el inicio y sentido del movimiento puede realizarse por los siguientes procesos, ver Fig. 15.

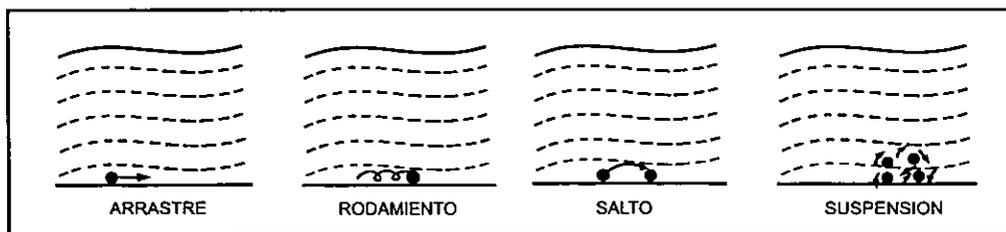


Fig. 15. Proceso de inicio del movimiento.

El transporte en la zona exterior es el resultado de la interacción del movimiento oscilatorio de las moléculas de agua y las partículas del fondo. Este movimiento somete a los granos a fuerzas hidrodinámicas que tienen que ser equilibradas por su propio peso. De este movimiento resulta la formación de rizos en el lecho, cuyo conjunto se orienta paralelamente a las crestas de las olas (Fig. 16).

3.3.3 Acción de la corriente.

Cuando la intensidad de una corriente aumenta progresivamente, y ésta fluye sobre un fondo de material susceptible de ser movido y de un mismo diámetro, se observa un ligero movimiento de los granos y después algunos empiezan a desplazarse; ésto es lo que se denomina inicio de movimiento. Si el material es fino se originan ondas de perfil asimétrico que generan un flujo turbulento cerca del fondo, que lo modifica. Singularmente estas ondas (dunas) se orientan según el sentido de la corriente (Fig. 17). Entre más grande sea la corriente estas ondas desaparecen y posteriormente se tiene la presencia nuevamente de ondas conocidas como antidunas.

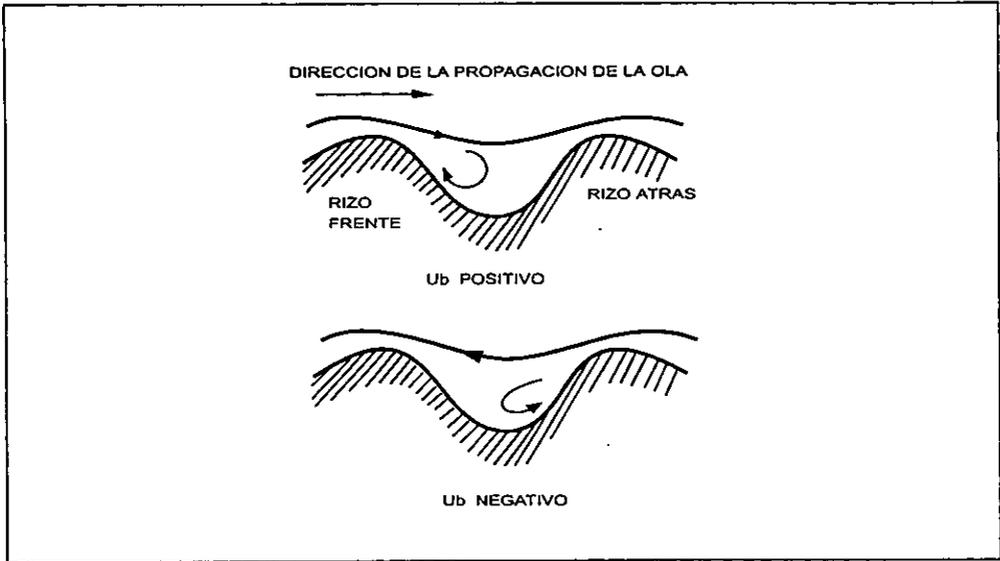


Fig. 16. Formación de vórtices cerca del fondo.

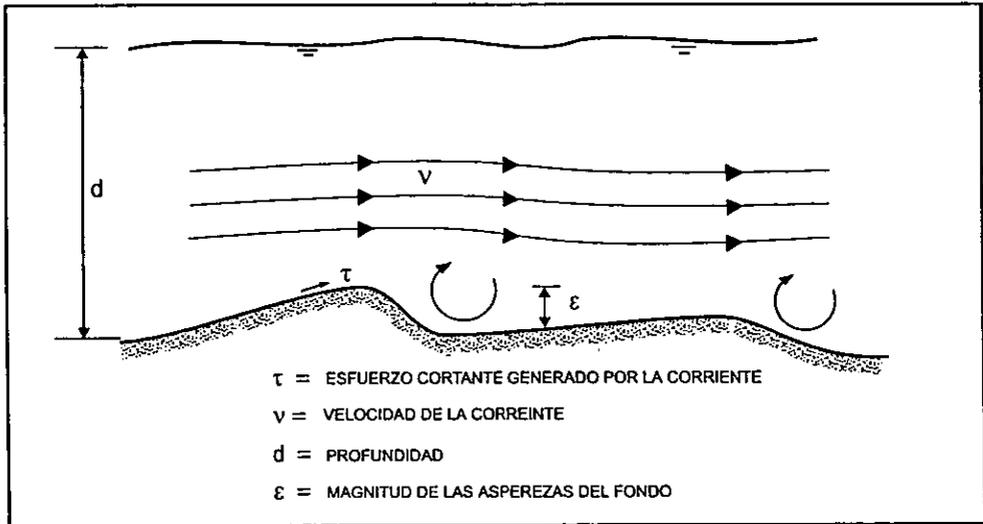


Fig. 17. Formación de dunas.

Las etapas de inicio del movimiento producido por el oleaje son:

a) Iniciación del movimiento de los granos.

para un cierto valor de la velocidad, llamado velocidad crítica, bajo la cual se producirá el movimiento de la arena del fondo; normalmente puede asociarse al valor de la velocidad crítica el de la profundidad crítica.

b) Movimiento general.

En la etapa anterior solo algunos granos han iniciado el movimiento, en tanto que en esta etapa prácticamente la totalidad de las partículas participan en el movimiento a base de rodamientos, deslizamientos o saltos cortos.

c) Formación de rizos.

A medida que el movimiento se acentúa, el fondo empieza a deformarse adquiriendo un aspecto ondulado. Las características de estas ondulaciones, longitud y altura dependen de que tan cerca estén las condiciones de flujo de la etapa anterior a la siguiente.

d) Transporte masivo.

Finalmente cuando la acción del oleaje en el sentido de propagación ha alcanzado su efecto máximo, el movimiento en el fondo es un movimiento como un "tapete", es decir, es un transporte masivo hacia la costa.

3.4 PERFILES DE EQUILIBRIO DE LA PLAYA.

El perfil de una playa está fuertemente influenciado por la acción del oleaje; en general, los factores que determinan la forma de la playa son: las propiedades del material tales como: densidad, resistencia a la erosión, tamaño y forma de la partícula; condiciones del oleaje, condiciones del oleaje y corrientes, así como la geografía y batimetría de la costa.

Fuera de la zona de rompientes, la acción del oleaje usualmente causa un efecto menor en el transporte de arena; este pequeño suministro de material a la barra compensa al depositado en la anteplaya, de esta manera se mantiene el equilibrio de la barra (Fig. 18). La erosión más allá de la barra es un proceso lento y disperso, de tal forma que la pérdida de material en esta zona no tiene mayores consecuencias para la estabilidad de una playa. Esta pérdida se compensa durante las tormentas.

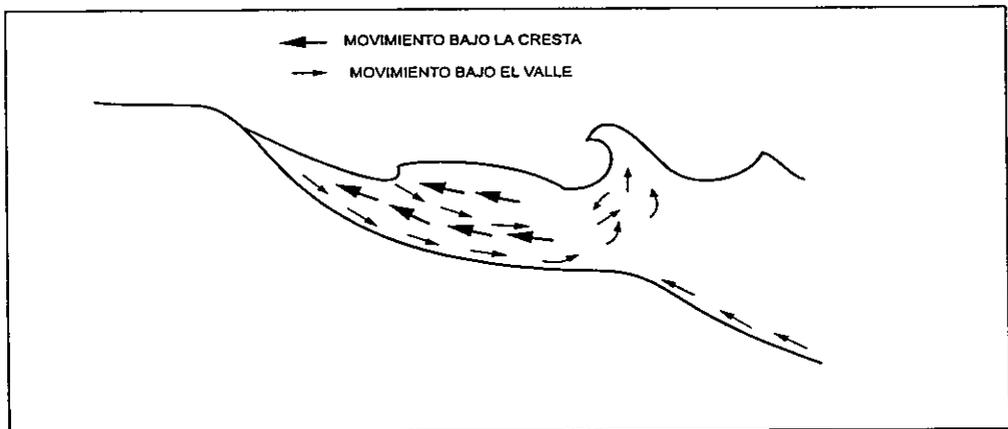


Fig. 18. Movimiento de arena y agua durante condiciones de calma en la zona de rompientes.

Generalmente se distinguen dos tipos clásicos de perfiles de equilibrio que son: el perfil de verano o de buen tiempo y el de invierno o de tormenta. Para su definición es determinante la relación de esbeltez de la ola. Así, por ejemplo el perfil de verano se presenta para relaciones de esbeltez $\gamma = H_o / L_o < 0.025$ y el de invierno para $\gamma = H_o / L_o > 0.025$, (Fig. 19).

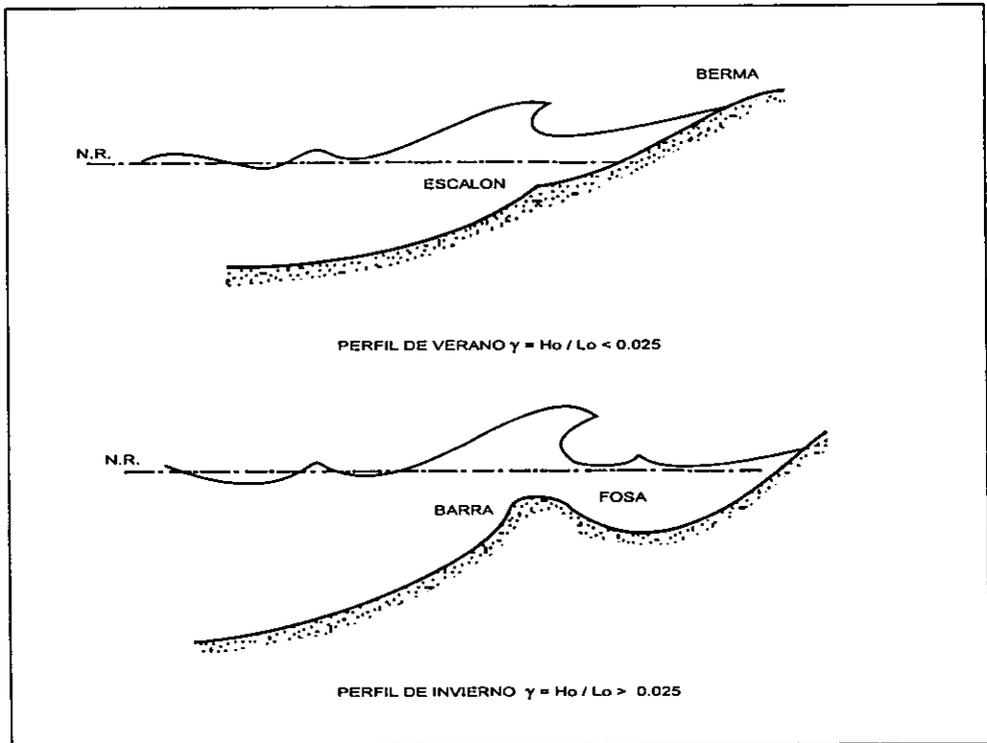


Fig. 19 Perfiles de equilibrio de una playa.

Por definición, una playa puede referirse a una área costera entera teniendo un fondo consistente en partículas cuyo rango

puede variar desde arena hasta grava. De acuerdo a la definición técnica una playa se extiende desde la línea de baja marea hasta el lugar donde se marca un cambio en el material o forma fisiográfica de éste, o hasta la línea de vegetación permanente, como se muestra en la Fig. 13; esta figura muestra un perfil típico de una playa arenosa, estando subdividida en playas posterior y anterior. La frontera entre esas zonas es la berma (punto de máximo alcance de la ola bajo condiciones normales); el lamido de la ola alcanza la frontera entre playa y la costa solamente durante tormentas más severas.

La pendiente promedio de una playa está ampliamente ligada a la forma y tamaño del grano del material playero. Partículas gruesas y de forma irregular forman pendientes más fuertes. Playas a base de gravas o guijarros pueden ser estables con pendientes de hasta 4:1, playas arenosas usualmente tienen pendientes entre 25:1 a 150:1 playas a base de limo o de lodo son usualmente más tendidas, teniendo pendientes tan bajas hasta 5000:1.

3.4.1 Equilibrio dinámico transversal de una playa.

Cuando las olas rompen, ya sea en rompiente progresiva o de colapso (los dos tipos de rompiente más comúnmente encontrados), su energía es disipada en gran parte por turbulencia; los granos de arena son arrancados del fondo y puestos en suspensión temporalmente por esta turbulencia. Una porción de la masa de agua de la cresta de la ola se derrama enfrente de la costa en las capas superiores de la zona de

rompiente, transportando arena con ella; esta agua disipa su energía restante por el efecto del lamido sobre la playa. Parte de esta agua producto del lamido regresa a el mar por filtración, pero la mayoría lo hace por la superficie. Aparte, debido a que el regreso del agua es menos turbulento, una menor cantidad de arena se regresa hacia el exterior de la playa en comparación con la que fue transportada hacia el interior; la anteplaya por tanto, crece ligeramente durante estas condiciones de calma. El flujo de regreso del agua y arena continua a lo largo del fondo hacia la barra en la zona exterior de la zona de rompientes completando de esta manera el ciclo.

3.5 CUANTIFICACION DEL TRANSPORTE LITORAL.

Entre otros factores, las corrientes y el oleaje mueven continuamente el material de las playas, formando y modificando bajos, tómbolos y bahías. A veces este movimiento alcanza una especie de equilibrio periódico, que puede ser alterado por las obras que se construyen en la costa. 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 como esto no siempre es posible, teniendo en cuenta que por la variabilidad de los factores que intervienen en estos procesos, las mediciones requieren de lapsos de bastante consideración, en contraste con la urgencia con que son requeridas las obras.

A pesar del avance que ha tenido la Hidráulica Marítima en los últimos 30 años, en predicción de oleaje, en el conocimiento de

los procesos costeros y en el de la interacción entre el oleaje y las partículas del fondo, aún no se resuelve en forma completa la evaluación del transporte de arena a lo largo de una playa producido por el oleaje del mar.

Desde un punto de vista exacto queda mucho por hacer, toda vez que aún no es conocida la forma como el material del fondo es arrastrado en cada instante, mientras la ola pasa sobre el. Sin embargo, desde un punto de vista ingenieril existen varios procedimientos y fórmulas para cuantificar el arrastre litoral.

Los métodos para valuar el arrastre litoral se pueden subdividir de la siguiente manera.

3.5.1 Medición Directa

a). Obras marítimas de calibración o prueba.

Las obras marítimas de calibración o prueba se construyen perpendiculares a una playa y permiten detener en forma total el material arrastrado, con lo que es posible conocer el volumen que el oleaje ha movido en un determinado tiempo; generalmente un año.

Dentro de esta clasificación se consideran a los espigones de prueba y a los dragados de prueba.

1.- Espigones de prueba.

Los espigones de prueba son estructuras impermeables que se construyen perpendicularmente a la costa y abarcan desde la berma hasta antes de la rompiente e impiden el paso del material arrastrado; se hacen de una longitud tal que se

garantice que frente al morro del mismo no haya intercambio de arena de un lado al otro. Son estructuras que se construyen con una permeabilidad muy baja y deben tener una altura para que la arena no pase por arriba, durante las tormentas. Se debe conocer la batimetría del sitio antes de la construcción del espigón, la cual se compara con levantamientos periódicos que se efectúan durante la construcción y vida útil del mismo (mientras no pase arena frente al morro). Esto permite conocer los volúmenes de arena que se acumulan de un lado del espigón en determinados períodos de tiempo.

Como las direcciones del oleaje varían a lo largo de un año y con ello las direcciones del arrastre litoral, un espigón con una vida útil mayor de un año permite estimar los volúmenes arrastrados a lo largo de una costa en ambas direcciones en un período de tiempo así como el volumen resultante.

2. Dragados de prueba.

Los dragados de prueba son excavaciones que se hacen también perpendiculares a la playa, generalmente a la entrada de puertos o bahías. Al terminar el dragado se levanta la primera batimetría y posteriormente se levantan otras, para ver la forma como la excavación se llena y conocer los volúmenes arrastrados en diferentes épocas. Debido a que en estas excavaciones se detiene el material que proviene de diferentes direcciones no se utilizan con frecuencia, y son preferidos los espigones de prueba. Sin

embargo cuando existe una única dirección de donde proviene el material y se cuenta con un equipo de dragado, puede ser la solución más económica.

Generalmente en estas obras se conocen los volúmenes arrastrados durante períodos de tiempo de un mes, 6 meses o un año, etc., pero excepto si se hacen sondeos muy frecuentes y persiste un mismo oleaje entre dos sondeos, no es posible asociar las características de un oleaje en particular con el volumen arrastrado y por lo tanto, la información obtenida, aunque útil localmente, es muy limitada

b). Uso de los trazadores.

Una de las mejores formas de cuantificar el arrastre litoral, es mediante el uso de trazadores, entre los que se cuentan principalmente los radiactivos y los fluorescentes.

Los primeros tienen la ventaja de que las partículas marcadas pueden ser localizadas y contadas con mayor facilidad, aunque infortunadamente requieren de equipo más complejo. Por otra parte, al utilizar estos trazadores se depende de las personas que hacen el marcado y así, no siempre es posible contar con los trazadores cuando se requieren.

Los trazadores fluorescentes son mucho más fáciles de preparar, su manejo es mucho más sencillo y requieren de equipo menos complejo para recogerlo. Presentan la desventaja de que no es posible hacer registros continuos en el sitio y que en ocasiones, se muestrea donde aún no hay material marcado. El conteo de los granos es la operación más compleja y tardada del proceso.

c). Fosa de prueba.

Las fosas de prueba se utilizan cuando se desea conocer el transporte en la zona exterior de la playa, estableciendo las dimensiones de la fosa de antemano para poder cuantificar los depósitos. La desventaja de este método es que representa el transporte en forma cuantitativa, pero no muestra claramente su procedencia.

3.5.2 Fórmulas Empíricas.

Dentro de esta clasificación se agrupan todas las expresiones obtenidas para valuar el arrastre litoral, que tiene una aplicación local ya que al no hacer intervenir a todos los parámetros involucrados en el fenómeno, se pueden aplicar sólo al sitio para el cual fueron obtenidas o bien para lugares muy similares a él . Más ampliamente se hablará al respecto en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA CUANTIFICAR EL TRANSPORTE LITORAL.

Para tratar de predecir la forma futura de la línea costera, la cantidad de transporte litoral debe ser determinado en las direcciones tanto paralelas como perpendiculares de la línea costera en la zona del litoral, sin embargo, nuestros conocimientos presentes del movimiento del sedimento no son aún suficientes para establecer una fórmula apropiada para el cálculo del transporte litoral.

Varios intentos han sido hechos directamente en correlación al flujo de energía de las olas en la dirección a lo largo de la costa, a la velocidad de la corriente, al material playero del lugar, etc.

4.1 FÓRMULAS EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE

Dentro de esta clasificación se agrupan todas las expresiones obtenidas para valuar el arrastre litoral, que tienen una aplicación local ya que al no hacer intervenir a todos los parámetros que intervienen en el fenómeno, se pueden aplicar sólo al sitio para el cual fueron obtenidas o bien para lugares con características similares. Existen expresiones como la de Munck, Petersen y Knapas, que permiten valuar el arrastre litoral en función de la velocidad del viento actuando en la zona de estudio. Esta fórmula

se puede llegar a aplicar cuando el único oleaje que llega a una playa es el producido por ese viento, lo cual puede ocurrir en bahías cerradas o lagos. En el mar, estas expresiones no deben utilizarse ya que no toman en cuenta en forma explícita las características de la playa ni de el material que la constituye; aunque para el lugar en que fueron obtenidas ello es tomado en cuenta en el exponente y constante de la fórmula.

4.1.1 Fórmula de Caldwell.

Este método está basado en resultados obtenidos en la bahía de Anaheim, California. Durante las observaciones, la dirección del oleaje varió entre 9° y 21° , y los diámetros del material playero variaron entre 0.1 y 0.4 mm.

Este autor propuso en 1956 la siguiente expresión, que posteriormente fue probada en la costa de New Jersey .

$$Q = K E_i^{0.8} \quad (4.1)$$

donde :

Q = volumen transportado en pies³/día.

K = factor de proporcionalidad (tentativamente se escogió 210)

E_i = componente a lo largo de la playa, de la energía del oleaje en millones de libras pie, por pie y por día; y es igual a:

$$E_i = E_p \text{ Sen } \alpha \text{ Cos } \alpha$$

en que:

α = ángulo en la zona de rompiente, entre la cresta de la ola y la línea de la playa.

E_p = energía del oleaje debida al desplazamiento de la ola en libras/pie/pie de playa por día, la cual se obtiene con:

$$E_p = E_n C_g \quad (4.2)$$

$$E_n = \frac{\gamma g H_r^2}{8} \quad (4.3)$$

$$C_g = n C = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(\pi d/L)} \right] C \quad (4.4)$$

siendo:

H_r = altura de la ola en la rompiente (ft)

L = longitud de la ola en la rompiente (ft)

γ = peso específico del agua del mar (64 lb/ft³)

C = celeridad en la rompiente (ft/seg)

d = profundidad en la rompiente (ft)

C_g = Celeridad del grupo.

4.1.2 Fórmula del Centro de Investigación de ingeniería de Costas (CERC).

Basada en los estudios de Caldwell, Savage, etc. el Coastal Engineering Research Center propuso la expresión que se indica a continuación, que es del mismo tipo que la de Caldwell y que tampoco toma en cuenta el material del fondo, aunque su rango de aplicación es para arenas finas y medias.

$$Q_s = 913 K_r^2 H_o^2 T \sin 2\alpha \quad (4.5)$$

en donde:

Q_s = gasto sólido en (m³/día)

T = período de la ola en seg.

K_r = coeficiente de refracción

H_o = altura de la ola en aguas profundas.

4.1.3 Fórmula de Savage.

Esta fórmula fue desarrollada en 1959. Las bases de formulación fueron obtenidas en base datos de laboratorio y de campo.

$$Q_x = 0.217 E_x \quad (4.6)$$

4.1.4 Fórmula de Ijima, Sato, Aono e Ishi (1960)

Esta fórmula es válida únicamente para la costa Fukue, Atsumi de Japón, para los siguientes datos:

$d = 1 - 2 \text{ mm}$, $H < 1 \text{ m}$ y $T = 2 - 4 \text{ seg.}$

$$Q_x = 0.130 E_x^{0.54} \quad (4.7)$$

4.1.5 Fórmula de Ichikawa, Ochiai, Tomica y Morobuse (1961).

Esta fórmula es aplicable para Tagonoura y la Bahía de Suruga, Japón, para los valores siguientes:

$$d = 5 - 40 \text{ mm}, \tan \beta = 1/5 - 1/10 \quad (4.8)$$

$$Q_x = 0.131 E_x^{0.3}$$

4.1.6 Fórmula de Manoha (1962).

$$Q_x = 0.786 E_x^{0.91} d^{0.59} \quad (4.9)$$

Las bases de formulación fueron obtenidas de datos de laboratorio y de campo.

4.1.7 Fórmula de Ijima, Sato y Tanaka (1964).

$$Q_x = 0.3 E_x \quad (4.10)$$

Aplicada a la costa de Kashima, Japón.

para valores tales como:

$$d = 0.15 - 0.2 \text{ mm.}, H < 4 \text{ m}$$

4.1.8 Fórmula del Manual de Protección Costera (Shore Protection Manual), (1975)

$$Q_x = 0.401 E_x \quad (4.11)$$

Las bases de su formulación fueron establecidas con datos de campo de Komar, Caldwell y Watts.

4.2 FÓRMULAS EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE Y DEL MATERIAL PLAYERO

Existen varias fórmulas para valuar el arrastre playero en función de la energía del oleaje y que toman en cuenta el diámetro D del material del fondo.

4.2.1. Fórmula de Larras.

La fórmula de Larras expresa que:

$$Q_s = K' g H^2 T \operatorname{sen} \left[\frac{7}{4} \right] \alpha \quad (4.12)$$

donde Q_s está en m^3/seg .

Todas las variables ya se han descrito anteriormente, excepto T que es el período de la ola (en seg) y K' que es función de la esbeltez de la ola y del diámetro medio del material playero (D), en mm. La cual se expresa como:

$$K' = 0.118 \times 10^{-5} D^{-1/2} \left[\frac{L_0}{H_0} \right] \quad (4.13)$$

Haciendo operaciones, la ecuación anterior, expresando Q_s en $\text{m}^3/\text{día}$ se puede escribir como:

$$Q_s = 1.56 \frac{H^2 T^3}{H_0 D^{1/2}} \operatorname{sen} \left[\frac{7}{4} \right] \alpha \quad (4.14)$$

4.2.2. Fórmula de Pichkine.

La expresión propuesta por este autor es la siguiente.

$$Q_s = 1.2 \times 10^{-6} H^2 L \frac{g^{1/2}}{D^{1/2}} \sin 2\alpha \quad (4.15)$$

haciendo operaciones, la ecuación anterior, expresando Q_s en $m^3/día$ es:

$$Q_s = 0.505 \frac{H^2 T^2}{D^{1/2}} \sin 2\alpha \quad (4.16)$$

4.2.3. Fórmula de Springall.

Este criterio fue expuesto en la ponencia presentada en el IV Congreso Nacional de Hidráulica por el Doctor en Ingeniería Rolando Springall Galindo, la base del estudio es el análisis de una serie de trabajos que se llevaron a cabo con el objeto de determinar el arrastre litoral en las costas de la República Mexicana.

$$Q_s = 1.1 \times 10^6 D_m^{7/4} H_b (\text{Sen } 2\alpha/mT)^{1/2} \quad (4.17)$$

en donde:

Q_s = gasto sólido, en $m^3/día$.

D_m = diámetro medio del material, en m.

H_b = altura de la ola en la rompiente, en m.

m = pendiente de la playa.

4.3 FÓRMULAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE LITORAL.

Conocida la velocidad de la corriente producida por el oleaje a lo largo de una playa es posible cuantificar el arrastre producido por ella, utilizando fórmulas que se obtuvieron originalmente para ríos y canales (flujos permanentes) y que han sido modificadas para tomar en cuenta la turbulencia debida al oleaje.

La velocidad de la corriente litoral puede conocerse o bien por mediciones directas efectuadas en la playa de interés o bien utilizando fórmulas que permiten valuarla en función de las características del oleaje.

Conocida la velocidad de la corriente litoral ya sea por observación directa o por cálculo de la misma es posible cuantificar el arrastre con métodos como los de Einstein, Bagnold, Engelund.

Conviene al aplicar estas fórmulas el subdividir la zona, en donde se produce el arrastre, en franjas con profundidad similar y calcular el arrastre en cada una de ellas.

4.3.1 Fórmula de Engelund.

Este método obtenido en canales de laboratorio y probado en condiciones reales da el volumen total arrastrado en el fondo y en suspensión. Su aplicación se limita a fondos arenosos y escurrimiento uniforme.

$$Q_i = \frac{0.04 (HS)^{3/2} V^2 B_i}{\Delta^2 g^{1/2} D_{35}} \quad (4.18)$$

en donde:

B_i = ancho de la franja escogida.

Δ = densidad relativa en los granos del fondo

D_{35} = diámetro 35 de la curva granulométrica

S = pendiente hidráulica la cual puede ser valuada en función de la fórmula de Manning o de Chezy; o bien con la expresión de Brebner y Kamphuis.

$$S = \left[\frac{V}{H} \right]^2 \quad (4.19)$$

4.3.2 Fórmula de Einstein.

Este método fue propuesto originalmente por Einstein en 1950 para el cálculo del arrastre de fondo en ríos. En 1952 se inició un estudio para cuantificar el arrastre litoral y los resultados que aquí se presentan fueron publicados en 1971.

Aunque se hicieron intentos de determinar la cantidad de material puesto en suspensión en la rompiente al paso de cada ola, no se ha llegado a un resultado satisfactorio.

El gasto sólido, por unidad de ancho, arrastrado en el fondo está dado en kg/seg./m.

$$qB = \gamma_s \phi \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right]^{1/2} (gD_{65})^{1/2} \quad (4.20)$$

donde:

γ_s = peso específico del material del fondo

γ = peso específico del agua de mar

ϕ = "intensidad de transporte de fondo" y que está en función de

"la intensidad de la corriente".

$$\psi = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{D_{65}}{R_b S} \xi \quad (4.21)$$

en donde:

ψ = intensidad de la corriente.

R_b = radio hidráulico que se puede considerar como el tirante medio de cada franja en la que se divide la sección transversal de la playa.

S = pendiente hidráulica de la corriente litoral. Como se conoce la velocidad litoral media en función de ella se calcula el valor de S .

ξ = factor de corrección. El valor de q_b en kg/seg/m de ancho, indica el arrastre de sedimentos que una corriente dada produce en el fondo.

4.3.3 Fórmula de Bagnold.

La expresión propuesta por Bagnold para valuar el gasto sólido es:

$$qT = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \gamma R S V \left[\frac{e_b}{\tan \theta} + 0.01 \frac{V}{W_s} \right] \quad (4.22)$$

en donde:

e_b = eficiencia del transporte del fondo en movimiento.

$\tan \theta$ = pendiente de equilibrio del material seco.

Las demás variables se han explicado en los métodos anteriores.

El procedimiento de aplicación de este criterio es enteramente similar a los dos anteriores.

Dentro de este inciso se presentarán algunos criterios para calcular la velocidad media a lo largo de una playa. Tiene el inconveniente de no permitir que se conozca la velocidad real en distintas zonas entre la rompiente y la línea de playa, sino únicamente la velocidad media en toda esa zona.

A continuación se indican algunos métodos para valuar la velocidad de la corriente litoral media.

a). Fórmula de Eagleson.

Este autor obtuvo la expresión siguiente:

$$V_L^2 = \frac{3g}{8} \frac{H_r^2 N_b}{d_r} \frac{\sin \theta \sin \alpha \sin 2\alpha}{f} \quad (4.23)$$

en donde:

V_L = velocidad media de la corriente litoral.

θ = pendiente de la playa.

H_r = altura de la ola en la rompiente

d_r = profundidad media en la rompiente

α = ángulo de incidencia del oleaje con respecto a la playa, en la zona de rompiente.

f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

N_b = relación de la celeridad de grupo a la celeridad de la onda en la rompiente. Se obtiene mediante la fórmula:

$$N_b = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2K d_r}{\sin h_2 k d_r} \right] \quad (4.24)$$

$$f = 2 \text{Log} \frac{d_r}{D_{65}} + 1.74 \quad (4.25)$$

D_{65} = tamaño de los granos en el que 65% de las partículas del conjunto es menor o igual que el.

Si se acepta que $d_r = H_r/0.78$ y haciendo operaciones se puede llegar a:

$$V_L^2 = 2.87 \frac{H_r N_b}{f} \text{sen } \theta \text{sen } \alpha \text{sen } 2\alpha \quad (4.26)$$

Si se acepta que en la playa el oleaje en estudio está en aguas bajas completas; $N_b = 1$ y por lo tanto:

$$V_L = \left(2.87 \frac{H_r}{f} \text{sen } \theta \text{sen } \alpha \text{sen } 2\alpha \right)^{1/2} \quad (4.27)$$

b) Fórmula de Brunn.

La expresión propuesta en 1963 por Brunn para valuar la velocidad media de la corriente a lo largo de una playa es:

$$V_L = C' f \left[H_r^{3/2} \theta \frac{\text{sen } 2\alpha}{T} \right]^{1/2} \quad (4.28)$$

en donde:

$C'f$ = constante que resultó igual a 0.25 (en el laboratorio) y 0.13 (en el campo) veces el coeficiente de Chezy C , generalmente se acepta $C'f = 14.3$.

c) Fórmula de Inman y Quinn.

De todos los métodos empíricos existentes, aquellos que se basan en un análisis de datos conducen a resultados más razonables, en la mayoría de los casos. Entre aquellos autores que han obtenido fórmulas empíricas se tiene a Inman y Quinn quienes proponen la siguiente expresión en sistema inglés.

$$V_L = \left[\left(0.25 R^2 + \sqrt{2.28 g H_r \sin \alpha} \right)^{1/2} - 0.5R^2 \right]^2 \quad (4.29)$$

en donde:

$$R = 108.3 \theta \frac{H_r \cos \alpha}{T} \quad (4.30)$$

las demás variables ya han sido definidas.

4.4 FÓRMULAS EN FUNCIÓN DEL OLAJE Y LA CORRIENTE.

4.4.1 Fórmula de Bijker.

Una de las fórmulas más recientes es la de Bijker (Delft University of Technology), basada en datos de Kalinske - Frijlink, en la cual el transporte litoral es determinado en base al efecto combinado del oleaje y la corriente.

$$S_b = BD \sqrt{g} \frac{V}{C} \exp \left| \frac{-0.27 \Delta D \rho g}{\mu \tau_{cw}} \right| \quad (4.31)$$

donde:

S_b = transporte de sedimentos por el fondo ($m^3/m/seg$)

B = coeficiente adimensional = 5 (1977)

D = diámetro medio de las partículas (m)

g = aceleración de la gravedad (m/seg^2)

V = velocidad media de la corriente ($m/seg.$)

C = coeficiente de Chezy = $18 \log \frac{12h}{r}$ ($m^{1/2} / seg$)

r = rugosidad del fondo (m)

h = profundidad (m)

Δ = densidad relativa del sedimento = $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$

ρ = densidad del agua (kg/m^3)

μ = coeficiente de Rizo = (C/C') ^{3/2}

C' = coeficiente de Chezy = $18 \log \frac{12 h}{D_{90}}$ ($m^{1/2} / seg$)

τ_{cw} = velocidad de corte, bajo los efectos combinados del oleaje y la corriente.

$$\tau_{cw} = \tau_c \left| 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi \bar{U}_b}{V} \right)^2 \right| \quad (4.32)$$

τ_c = velocidad de corte debida a la corriente (N/m^2)

$$\tau_c = \frac{V \sqrt{g}}{C} \quad (4.33)$$

$$\xi = \frac{C f_w}{2g} \quad (4.34)$$

$$f_w = \text{Coeficiente de friccion} = \exp \left| -5.977 + 5.213 \left(\frac{ab}{r} \right)^{-0.194} \right|$$

$$ab = \frac{\gamma}{4\pi} L: \quad 1.47 < \frac{ab}{r} < 300 \quad \text{Si } \frac{ab}{r} < 1.47, \quad f_w = 0.32$$

γ = índice de rompiente , según Bijker $\gamma = 0.6$ a 0.8

L = longitud de la ola.

\ddot{U}_b = velocidad orbital máxima en el fondo (m/seg).

$$\ddot{U}_b = \frac{\pi H}{T} \frac{2\pi h}{L} \quad (4.35)$$

H = altura de la ola (m)

4.4.2 Fórmula calibrada por Petróleos Mexicanos.

Para la determinación del transporte de sedimentos generados por las corrientes de fondo, Petróleos Mexicanos calibró una expresión para las costas mexicanas, en base a los estudios realizados para el puerto petrolero de Dos Bocas, Tabasco; misma que se basa en la siguiente expresión:

$$Q_s = \frac{b D_{50} \bar{V} \sqrt{2}}{C} \exp \left| \frac{-0.27 \Delta D_{50} g}{V_{cw}} \right| \quad (4.36)$$

en donde:

$Q_s = S_b$, $b = B$, $\bar{V} = V$ y corresponde a lo indicado en la expresión de Bijker.

$$C = 10 \log \frac{12h}{r} \quad (\text{m}^{1/2} / \text{seg}) \quad (4.37)$$

V_{cw} = velocidad de corte (m/seg), bajo los efectos combinados del oleaje, evaluada con la expresión:

$$V_{cw} = V_c \left| 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\xi \ddot{U}_b}{V^2} \right)^2 \right|^{1/2} \quad (4.38)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (4.39)$$

V_c = velocidad de corte debida a la corriente (m/seg).

4.4.3 Fórmula realizada por el Laboratorio Central de Hidráulica de Francia.

El Laboratorio Central de Hidráulica de Francia, calcula el volumen de sedimentos, por medio de la siguiente expresión:

$$Q_s = H^2 T f(\alpha) t \left(\frac{K g}{C} \right) \quad (4.40)$$

donde:

Q_s = volumen de sedimentos transportados (m³)

H = altura de la ola (m)

T = período de la ola (seg)

α = oblicuidad del oleaje con la línea de rompiente (grados)

t = tiempo de acción del oleaje

g = aceleración de la gravedad (m/seg²)

C = relación de esbeltez $H/L > 1\%$

L = longitud de la ola (m)

$K = 3 \times 10^{-6}$ para arenas de 0.2 mm de diámetro

$K = 4.5 \times 10^{-6}$ para arenas de 0.3 mm de diámetro

$K = 1.8 \times 10^{-6} D^{-1/2}$ para arenas de diámetro mayor de 0.3 mm

D = diámetro medio (mm)

$f(\alpha) = \sin 2\alpha$

CAPÍTULO 5

ESTUDIO DE TRANSPORTE LITORAL EN LA COSTA OESTE DEL PUERTO DE SALINA CRUZ, OAXACA.

5.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Cuando se construye un obra para protección de costas, su vida útil va a depender de la cantidad de material que es transportado por el oleaje en el sitio de la obra, por tal motivo es de vital importancia cuantificar correctamente el transporte de sedimentos ya sea por métodos directos o por fórmulas empíricas.

Las fórmulas empíricas que se conocen utilizan coeficientes relacionados con el sitio donde fueron calibradas por lo que muchas veces si estas expresiones se aplican a otros lugares pueden conducir a valores erróneos.

Por tal motivo el estudio se concretará a la costa oeste del puerto de Salina Cruz Oaxaca, por presentar esta zona problemas de acarreo litoral, por lo cual en este trabajo se pretende analizar fórmulas existentes para valuar el transporte, comparando los resultados que arroja cada una de ellas con las mediciones de transporte litoral realizadas en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca, ya que la dificultad de conocer analíticamente el fenómeno de transporte litoral ha provocado la aparición de muy diversas

ecuaciones que arrojan diferentes resultados y por ello es conveniente determinar cual de estas es la que más se apega a la realidad, ya que las condiciones en cada sitio son diferentes puesto que los oleajes, configuración batimétrica, características del material playero, etc., varían considerablemente de un lugar a otro.

5.2 HIPÓTESIS.

Si para realizar la cuantificación de transporte litoral se considera en la fórmula el oleaje, configuración batimétrica, características del material playero, etc., entonces se podrán obtener resultados más confiables de este fenómeno en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca y en particular en la costa Oeste, comparando los resultados teóricos con las mediciones directas que se han realizado en el sitio.

5.3 OBJETIVOS.

Encontrar las diversas fórmulas que permitan cuantificar el transporte litoral.

Relacionar la interacción de los elementos que contribuyan al transporte litoral.

Determinar las ventajas y desventajas de cada una de las fórmulas.

Obtener dentro de las fórmulas teóricas la que más se acerque a los valores de transporte litoral medidos en la zona.

5.4 MATERIAL.

Para la realización de este trabajo se emplearán portulanos, cartas geográficas, gráficas de análisis granulométrico, tablas de resultados de oleaje medidos en el sitio, planos de refracción, resultados de las características del oleaje rompiente y mediciones de transporte litoral en el sitio en cuestión, los cuales se obtuvieron de la bibliografía consultada para este trabajo, y que se presenta en la lista de referencias.

CAPÍTULO 6

DESARROLLO DEL ESTUDIO

6.1 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL TRANSPORTE LITORAL.

6.1.1 Características sedimentológicas.

Estos datos fueron obtenidos del estudio para el Puerto Industrial de Salina Cruz, Oaxaca.

El frente playero de la zona en estudio se dividió en cuatro tramos de 1,500 metros cada uno de tal forma que cubrieran todo el frente de la zona, por cada tramo se analizó una sección hasta la profundidad de 5.0 metros, las muestras analizadas corresponden a las zonas denominadas: duna, berma y estrán; y a 1, 5 y 10 metros de profundidad en el mar.

La localización de los tramos y de las secciones se presentan en el Plano No. 2.

El análisis granulométrico de densidad se efectuó a las muestras recolectadas, con objeto de establecer las características físicas de las mismas. Los resultados anuales del estudio se presentan en la Tabla 6.

SECCIÓN	ZONA	DIÁMETRO D_{50} (mm)	DESVIACIÓN STANDARD σ	DENSIDAD S_s	PORCENTAJE		
					GRAVA	ARENA	FINOS
A	DUNA	—	—	—	—	—	—
	BERMA	0.39	2.1967	2.41	3	96	1
	ESTRAN	0.32	1.6922	2.62	—	99	1
	-1 m	0.45	1.7522	2.62	—	98	2
	-5 m	0.19	1.5179	2.53	—	97	3
	-10 m	0.14	1.3716	2.6	—	97	3
B	DUNA	0.56	2	2.52	0	98	2
	BERMA	1.3	1.71	2.64	0	99	1
	ESTRAN	0.32	1.63	2.61	0	99	1
	-1 m	1.5	3.23	2.59	6	91	3
	-5 m	0.12	1.38	2.57	0	96	4
	-10 m	0.11	1.34	2.57	0	98	2
C	DUNA	0.32	1.79	2.6	0	99	1
	BERMA	0.23	1.42	2.4	0	99	1
	ESTRAN	0.33	1.57	2.62	0	99	1
	-1 m	0.27	1.81	2.51	0	95	5
	-5 m	0.15	1.36	2.64	0	98	2
	-10 m	0.16	1.44	2.55	0	97	3
D	DUNA	0.21	1.43	2.5	0	99	1
	BERMA	0.21	1.39	2.55	0	99	1
	ESTRAN	0.21	1.59	2.54	0	99	1
	-1 m	0.19	1.46	2.55	0	85	—
	-5 m	0.17	1.51	—	0	99	1
	-10 m	0.1	—	2.54	0	99	1

TABLA 6. Resultados granulométricos anuales (período 1980- 1981)

6.1.2 Batimetrías.

Los levantamientos batimétricos se determinan mediante sondeos, a fin de obtener la configuración del fondo del mar.

En la actualidad los modernos equipos de sondeo por eco, llamados ecosondas, permiten que los levantamientos batimétricos se lleven a cabo con mayor precisión y rapidez. La localización de la lancha en la cual está instalado el ecosonda se logra mediante triangulación utilizando dos tránsitos.

Las ecosondas determinan el intervalo de tiempo con que las ondas sonoras viajan con velocidades conocidas desde un determinado punto en la superficie del agua através del medio acuático; es decir, lo que se hace es medir el tiempo que transcurre entre el instante en que se emite un sonido y aquel en el que se recibe su eco, y como es conocida la velocidad de la onda, el aparato indica directamente la distancia que recorre dicho sonido.

La batimetría nos va a servir para elaborar los planos de refracción del oleaje y determinar los perfiles de la playa para cada sección.

El plano batimétrico corresponde al levantamiento topohidrográfico realizado por la Comisión Franco Mexicana en el año de 1956 .

Esta batimetría se redujo presentando únicamente la zona de estudio (Bahía Salina del Marqués).

La batimetría corresponde al Plano No. 3.

6.1.3 Características del oleaje.

La información fue obtenida de la estación oceanográfica que se instaló frente a la población de Reforma. Para lo cual establecieron una campaña de registro continuo con un ológrafo autónomo de presión marca Interocean, modelo WG/7500; el aparato se instaló a una profundidad de 10 metros.

Los resultados se muestran en la Tabla No. 7.

TABLA 7a. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS POR ALTURA

DIRECCIÓN (m) INTERVALO	SE-S	S-S-E	S	S-SW	SW-S	SW	W	GENERAL
0.00 - 0.20	0.349	7.279	12.3690	4.3900	0.4200	0.001	0.3160	26.0000
0.20 - 0.40	0.692	10.207	11.8410	5.7320	0.6250	1.259	0.4650	30.0410
0.40 - 0.60	0.496	6.963	7.0970	3.7990	0.4200	1.171	0.4100	20.2640
0.60 - 0.80	0.303	3.017	3.1350	2.2490	0.2240	0.066	0.2800	10.8730
0.80 - 1.00	0.177	1.566	1.3740	1.3320	0.1340	0.496	0.1300	5.2090
1.00 - 1.20	0.125	0.914	0.6010	0.8590	0.0820	0.334	0.0530	2.9180
1.20 - 1.40	0.085	0.240	0.4030	0.6190	0.0300	0.119	0.0240	1.7370
1.40 - 1.60	0.040	0.130	0.1000	0.2940	0.0030	0.026	0.0020	0.0403
1.60 - 2.00	0.020	0.080	0.0950	0.1970	0.0040	0.010	0.0010	0.4230
2.00 - 2.20	0.010	0.043	0.0670	0.0910	-	0.001	-	0.3000
2.20 - 2.40	0.004	0.007	0.0310	0.0580	-	0.001	-	0.2200
2.40 - 2.60	0.004	0.007	0.0250	0.0230	-	0.001	-	0.1010
2.60 - 2.80	0.004	0.006	0.0100	0.0170	-	0.001	-	0.0650
2.80 - 3.00	-	0.007	0.0150	0.0320	-	-	-	0.0540
3.00 - 3.50	-	0.006	-	0.0070	-	-	-	0.0130
3.50 - 4.00	-	0.003	-	0.0030	-	-	-	0.0050
4.00 - 4.50	-	0.003	-	-	-	-	-	0.0050
4.50 - 5.00	-	0.003	-	-	-	-	-	0.0050
FRECUENCIA TOTAL %	2.434	30.937	37.6350	20.2500	5.1020	5.102	1.7030	100.0000
H _m (m)	0.692	0.044	0.3838	0.3408	0.0519	0.519	0.4712	0.4484
H _{rms} (m)	0.876	0.546	0.5120	0.7190	0.0615	0.615	0.5560	0.5870
H _s (m)	1.304	0.789	1.0520	1.0520	0.9010	0.901	0.0000	0.6399
H _{max} (m)	2.800	5.000	3.5000	4.5000	2.8000	2.800	2.0000	5.0000

TABLA 7b. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS POR PERÍODOS.

DIRECCIÓN (seg) PERÍODO	SE-S	S-S-E	S	S-SW	SW-S	SW	W	GENERAL
6 - 8	0.056	1.689	1.608	6.925	0.007	0.171	0.118	4.574
8 - 10	0.105	2.963	3.175	1.025	0.115	0.302	0.246	6.891
10 - 12	0.272	4.735	4.946	2.999	0.204	0.730	0.245	14.131
12 - 14	0.495	6.561	8.228	4.395	0.462	1.088	0.246	21.453
14 - 16	0.689	7.769	10.570	5.119	0.551	1.220	0.404	28.322
16 - 18	0.314	2.695	3.237	1.797	0.246	0.506	0.147	8.942
18 - 20	0.198	1.902	2.075	1.249	0.167	0.367	0.132	6.090
20 - 24	0.219	2.535	3.676	1.867	0.189	0.560	0.165	9.329
24 - 26	-	0.031	0.040	0.019	-	-	-	0.090
26 - 28	0.004	0.007	0.020	0.008	-	-	-	0.039
28 - 32	0.002	0.005	0.054	0.027	-	-	-	0.133
FRECUENCIA TOTAL %	2.434	30.937	37.635	20.250	1.941	5.102	1.763	100.000
T _m (seg)	14.751	13.963	14.306	14.178	14.990	14.601	13.876	14.220
T _s (seg)	18.738	18.092	10.351	18.332	18.040	19.166	16.402	18.327
T _{max} (seg)	32.000	32.000	32.000	24.000	24.000	24.000	24.000	32.000

TABLA 7. RESUMEN ANUAL DE OLEAJE (PERÍODO 1980-1981)

6.1.4 Diagramas de refracción del oleaje.

Como se indicó en el inciso anterior, la información del oleaje disponible y analizada para el puerto de Salina Cruz, Oaxaca, se refiere a las características que éste tiene en aguas profundas. Como se requiere utilizar esta información en la costa o sea en aguas bajas, se necesita conocer las modificaciones que sufren las características del oleaje por efecto de la disminución de la profundidad, con excepción del período de oleaje, el cual permanece constante durante todo el proceso.

Para definir las características cambiantes del oleaje a diferentes profundidades, es necesario trazar los planos de refracción, por cualquiera de los diversos criterios que existen para ello.

El método gráfico empleado para elaborar los planos de refracción fue el propuesto por el Laboratorio de Hidráulica Marítima de Francia, descrito en el capítulo 2, dichos planos comprenden los de refracción general y los de detalle en toda la zona en estudio, para períodos de 8 y 14 segundos en tres direcciones de incidencia: Suroeste, Sur y Sureste, los cuales se muestran en los Planos del No. 4 al No. 15.

6.1.5 Características del oleaje rompiente.

Las características del oleaje rompiente fueron establecidas de acuerdo a los estudios y observaciones realizadas por Goda, quien establece que H_b/H_o' y H_o'/H_b dependen de la pendiente de la playa (ver Plano No. 2) y de la esbeltez de la ola incidente. La Fig. 20 muestra las relaciones empíricas obtenidas por Goda entre H_b/H_o' y H_o'/gT^2 para varias pendientes de la playa. En la Fig. 21 se

muestrán relaciones empíricas entre d_b/H_b y H_b/gT^2 para varias pendientes de la playa.

Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla No. 8.

6.2 CUANTIFICACIÓN DEL TRANSPORTE LITORAL.

Este tema es sin duda el más importante de este capítulo, ya que en él se evalúa tanto cualitativa como cuantitativamente el transporte litoral.

Existen en la zona bastantes elementos que permiten asegurar que el flujo del transporte litoral es predominante de oeste a este; estos elementos abarcan una gama muy amplia, que va desde una serie de estudios realizados en la zona hasta el análisis de los testigos de la misma; específicamente del Espigón Cola de Pato, cuya construcción fue realizada con el objeto de cuantificar el volumen de acarreo, el cual se determinó periódicamente.

6.2.1 Aplicación de las fórmulas

De acuerdo con los datos obtenidos en el inciso anterior, de la Tabla 9 a la Tabla 23 se presentan los resultados producto de la aplicación de las fórmulas.

Los parámetros utilizados en las fórmulas corresponden a los arrojados del análisis de la dirección Sur y con un período de 14 segundos, por ser éstos los que se presentaron con mayor frecuencia, los ángulos de incidencia del oleaje sobre la costa se midieron a la línea batimétrica de -5 metros de profundidad.

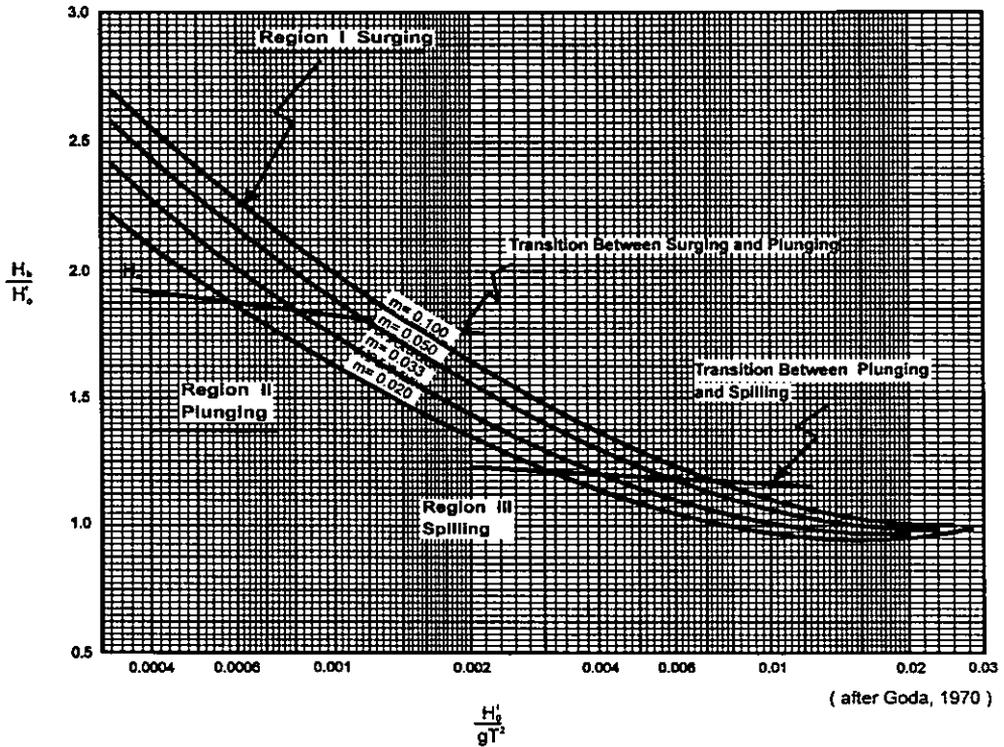


Fig. 20. Índice de la altura contra la esbeltez de la ola en la rompiente en aguas profundas.

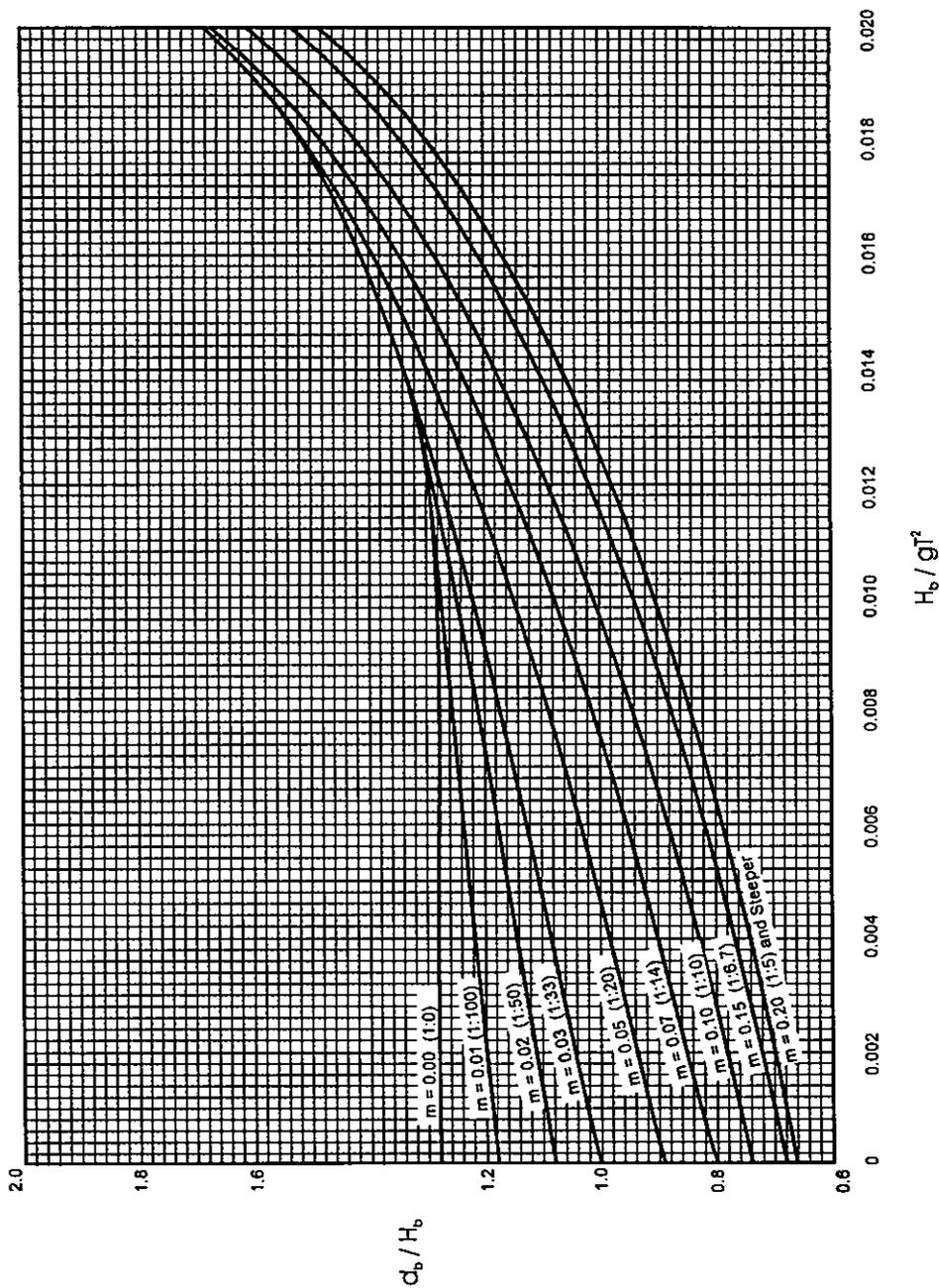


Fig. 21. Profundidad contra esbeltez de la rompiente

DIRECCIÓN: SUR $T = 14 \text{ Seg.}$ $L_o = 305.76 \text{ m}$ $H_o = 0.7340 \text{ m (2.41 ft)}$

SECCIÓN	m	K_r	H'_o (ft)	$\frac{H'_o}{gT^2}$	$\frac{H_b}{H'_o}$	H_b		$\frac{H_b}{gT^2}$	$\frac{d_b}{H_b}$	
						(ft)	(m)		(ft)	(m)
A	1:16	1.23	2.96	0.00047	2.35	6.96	2.12	0.0011	0.857	1.81
B	1:18	1.82	1.98	0.00031	2.49	4.93	1.5	0.00078	0.872	1.31
C	1:20	0.66	1.59	0.00025	2.48	3.94	1.2	0.00062	0.901	1.00
D	1:44	0.72	1.74	0.00028	2.19	3.81	1.16	0.0006	1.547	1.00

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DEL OLEAJE ROMPIENTE

6.2.2 Obtención de los volúmenes de transporte litoral medidos en el sitio.

Para realizar la cubicación se generaron tres zonas, las cuales se dividieron en tramos y éstos a su vez en secciones de 100 metros cada una.

Los resultados de las mediciones correspondientes a la Bahía Salina del Marqués se muestran en la Tabla 24.

$$Q_s = K E_i^{0.8}$$

SECCIÓN	L (ft)	C (ft/m)	d _b (ft)	C _g (ft/s)	H _r (ft)	E _r	α	E _i	Q _s	
									(yd ³ /dia)	(m ³ /dia)
A	37.47	2.68	5.96	2.08	6.96	25,943.34	10°	0.00444	2.755	2.106
B	27.04	1.93	4.30	1.50	4.93	9,387.05	4°	0.00065	0.592	0.453
C	22.32	1.59	3.55	1.23	3.94	4,916.33	12°	0.00099	0.829	0.634
D	37.03	2.65	5.89	2.06	3.81	7,699.48	38°	0.00374	2.402	1.836

TABLA 9. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE CALDWELL

$$Q_s = 913 K_r^2 H_0^2 T \text{ sen } 2\alpha$$

SECCIÓN	K_r	α	Q_s (m ³ /día)
A	1.23	100	3,563.30
B	0.82	40	644.43
C	0.66	120	1,220.09
D	0.72	380	3,463.86

TABLA 10. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE CERC.

$$Q_x = 0.217 E_x$$

SECCIÓN	L (m)	n	H _r (m)	α	E _x	Q _s (m ³ /día)
A	11.42	0.777	2.12	10°	720.41	156.33
B	0.24	0.776	1.5	4°	105.75	22.95
C	6.8	0.776	1.2	12°	163.24	35.42
D	11.29	0.775	1.16	38°	603.37	130.93

TABLA 11. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE SAVAGE.

$$Q_s = 0.130 E_x^{0.54}$$

SECCIÓN	L (m)	n	H _r (m)	α	E _x	Q _s (m ³ /día)
A	11.42	0.777	2.12	10°	720.41	4.54
B	8.24	0.776	1.50	4°	105.75	4.61
C	6.80	0.776	1.20	12°	163.24	2.04
D	11.29	0.775	1.16	38°	603.37	4.13

TABLA 12. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE IJIMA, SATO, AONO E ISHI.

$$Q_s = 0.131 E_x^{0.3}$$

SECCIÓN	L (m)	n	H _r (m)	α	E _x	Q _s (m ³ /día)
A	11.42	0.777	2.12	10°	720.41	0.943
B	8.24	0.776	1.50	4°	105.75	0.530
C	6.80	0.776	1.20	12°	163.24	0.604
D	11.29	0.775	1.16	38°	603.37	0.890

TABLA 13. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE ICHIKAWA, OCHIALI, TOMICA Y MOROBUSE.

$$Q_s = 0.786 E_x^{0.91} d^{0.59}$$

SECCIÓN	L (m)	n	H _r (m)	α	E _x	Q _s (m ³ /día)
A	11.42	0.777	2.12	10°	720.41	195.530
B	8.24	0.776	1.50	4°	105.75	69.410
C	6.80	0.776	1.20	12°	163.24	37.460
D	11.29	0.775	1.16	38°	603.37	100.050

TABLA 14. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE MANOHA.

$$Q_s = 0.3 E_x$$

SECCIÓN	L (m)	n	H _r (m)	α	E _x	Q _s (m ³ / día)
A	11.42	0.777	2.12	10°	720.41	216.12
B	8.24	0.776	1.50	4°	105.75	31.73
C	6.80	0.776	1.20	12°	163.24	48.97
D	11.29	0.775	1.16	38°	603.37	181.01

TABLA 15. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE IJIMA,
SATO Y TANAKA.

$$Q_s = 0.401 E_x$$

SECCIÓN	L (m)	n	H _r (m)	α	E _x	Q _s (m ³ /día)
A	11.42	0.777	2.12	10°	720.41	288.88
B	8.24	0.776	1.50	4°	105.75	42.41
C	6.80	0.776	1.20	12°	163.24	65.46
D	11.29	0.775	1.16	38°	603.37	241.95

TABLA 16. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DEL
SHORE PROTECTION MANUAL.

$$Q_s = 1.56 \frac{H^2 T^3}{H_0 D^{1/2}} \text{sen } \frac{Z}{4} \alpha$$

SECCIÓN	H _r (m)	D ₅₀ (mm)	α	Q _s (m ³ / día)
A	11.42	0.45	100	11,749.51
B	8.24	1.5	40	1,305.70
C	6.80	0.27	120	5,791.92
D	11.29	0.19	380	16,510.10

TABLA 17. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE LARRAS.

$$Q_s = 0.505 \frac{H^2 I^3}{D^{1/2}} \text{ sen } 2\alpha$$

SECCIÓN	H _r (m)	D ₅₀ (mm)	α	Q _s (m ³ / día)
A	11.42	0.45	10°	226.01
B	8.24	1.50	4°	25.31
C	6.80	0.27	12°	111.57
D	11.29	0.19	38°	296.48

TABLA 18. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE PLYCHKINE.

$$Q_s = \frac{0.04 (HS)^{3/2} V^2 B_i}{\Delta^2 g^{1/2} D_{50}}$$

SECCIÓN	D ₃₅ (m)	V (m/seg)	H (m)	θ	Δ	S	α	Q _s (m ³ /seg)
A	0.00045	0.982	2.12	0.0625	0.6084	0.215	10°	34.13
B	0.00150	0.456	1.50	0.0556	0.6039	0.09	4°	0.37
C	0.00027	0.625	1.20	0.5912	0.5912	0.271	12°	14.31
D	0.00019	0.634	1.16	0.5602	0.5602	0.299	38°	26.38

TABLA 19. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE ENGELUND

$$Q_s = BD \sqrt{g} \frac{V}{C} \exp \left| \frac{-0.27 \Delta D \rho g}{\mu \tau_{cw}} \right|$$

SECCIÓN	D ₅₀ (m)	V (m / seg)	C (m ^{1/2} /seg)	Δ	μ	τ _{cw} (N / m ²)	Q _s (m ³ / seg)
A	0.00045	0.982	84.31	0.6084	4.64	4.25x10 ⁻²	5.36
B	0.00150	0.456	72.37	0.6039	7.02	2.51x10 ⁻²	62,115.00
C	0.00027	0.625	84.26	0.5912	4.65	2.61x10 ⁻²	1.67
D	0.00019	0.634	91.00	0.5602	3.86	2.47x10 ⁻²	6,460.50

TABLA 20. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE BIJKER.

$$Q_s = \frac{b D_{50} \bar{V} \sqrt{2}}{C} \exp \left| \frac{-0.27 \Delta D_{50} g}{V_{cw}} \right|$$

SECCIÓN	D_{50} (m)	\bar{V} (m/seg)	C (m ^{1/2} /seg)	Δ	V_{cw} (m/seg)	Q_s (m ³ /seg)
A	0.00045	0.982	84.31	0.6084	3.66×10^{-2}	0.0563
B	0.00150	0.456	72.37	0.6039	1.99×10^{-2}	0.1131
C	0.00027	0.625	84.26	0.5912	2.33×10^{-2}	0.0216
D	0.00019	0.634	91.00	0.5602	2.19×10^{-2}	0.0142

TABLA 21. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA CALIBRADA POR PEMEX.

$$Q_s = H^2 T f(\alpha) t \frac{(K.g)}{C}$$

SECCIÓN	H_r (m)	α	$f()$	L (m)	C	K	Q_s (m ³)
A	0.00045	0.982	84.31	0.6084	18.56	2.68×10^{-2}	263.38
B	0.00150	0.456	72.37	0.6039	18.2	1.47×10^{-2}	30.01
C	0.00027	0.625	84.26	0.5912	17.65	4.5×10^{-2}	177.20
D	0.00019	0.634	91	0.5602	10.27	3.0×10^{-2}	452.57

TABLA 22. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA CALIBRADA POR EL LABORATORIO CENTRAL DE HIDRAULICA DE FRANCIA.

$$Q_s = 1.1 \times 10^4 D_m^{7/4} H_r (\sin 2\alpha)^{1/2} \text{ m T}$$

SECCIÓN	D (m)	H _r (m)	α	m	Q _s (m ³ /día)
A	0.00045	2.12	10°	0.0625	156.33
B	0.00150	1.50	4°	0.0556	22.95
C	0.00027	1.20	12°	0.0500	35.42
D	0.00019	1.16	38°	0.0227	130.93

TABLA 23. TRANSPORTE LITORAL CALCULADO CON LA FÓRMULA DE SPRINGALL.

PERÍODO DE OBSERVACIÓN		VOLUMEN OBSERVADO		VOL. TOTAL
		AZOLVE	EROSIÓN	AZOLVE
AGOSTO 1978-ABRIL 1979	PERÍODO	294,719.64	105,559.33	
	ACUMULADO	294,719.64	105,559.33	189,160.31
ABRIL 1979-JUNIO 1979	PERÍODO	191,411.60	258,298.35	
	ACUMULADO	486,131.24	363,857.68	122,273.56
JUNIO 1979-JULIO 1979	PERÍODO	583,791.94	83,605.84	
	ACUMULADO	1,069,923.18	447,463.52	622,459.66
JULIO 1979-AGOSTO 1979	PERÍODO	277,285.52	548,414.28	
	ACUMULADO	1,347,208.70	965,877.80	381,330.90
AGOSTO 1979-SEPTIEMBRE 1979	PERÍODO	324,718.62	641,712.22	
	ACUMULADO	1,671,927.32	1,607,590.00	64,337.32
SEPTIEMBRE DE 1979-OCTUBRE 1979	PERÍODO	734,457.63	2,135,042.83	
	ACUMULADO	2,406,384.95	1,742,632.83	663,752.12
OCTUBRE 1979-NOVIEMBRE 1979	PERÍODO	796,394.86	192,872.57	
	ACUMULADO	3,202,779.81	1,935,505.40	1,267,274.41
NOVIEMBRE DE 1979-ENERO 1980	PERÍODO	43,196.96	159,161.05	
	ACUMULADO	3,245,976.77	2,094,667.25	1,151,309.52
ENERO 1980-FEBRERO 1980	PERÍODO	60,132.50	135,348.71	
	ACUMULADO	3,306,109.27	2,230,015.96	1,076,093.31
FEBRERO 1980-MARZO 1980	PERÍODO	160,277.92	43,471.01	
	ACUMULADO	3,466,387.19	2,273,486.97	1,192,900.22
MARZO 1980-ABRIL 1980	PERÍODO	47,023.70	121,732.48	
	ACUMULADO	3,513,410.89	2,395,219.45	1,118,191.44
ABRIL 1980-MAYO 1980	PERÍODO	74,972.58	70,527.43	
	ACUMULADO	3,588,383.47	2,465,746.88	1,122,636.59
MAYO 1980-JULIO 1980	PERÍODO	76,505.51	40,121.15	
	ACUMULADO	3,664,888.88	2,505,868.03	1,159,020.85
JULIO 1980-NOVIEMBRE 1980	PERÍODO	214,335.39	56,242.24	
	ACUMULADO	3,879,224.37	2,562,110.27	1,317,114.10
NOVIEMBRE 1980-FEBRERO 1981	PERÍODO	95,728.57	56,563.22	
	ACUMULADO	3,974,952.94	2,618,673.49	1,356,279.45
FEBRERO DE 1981-JULIO 1981	PERÍODO	107,367.34	46,683.06	
	ACUMULADO	4,082,320.28	2,665,356.55	1,416,963.73
JULIO 1981-NOVIEMBRE 1981	PERÍODO	52,871.05	67,368.37	
	ACUMULADO	4,135,191.33	2,732,724.92	1,402,466.41

Tabla 24. Mediciones directas de transporte litoral

CAPÍTULO 7

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

7.1 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE TRANSPORTE LITORAL.

A continuación se presentan los resultados obtenidos empíricamente en las cuatro secciones en que se dividió el tema en estudio, ver Tabla 25.

7.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

La Tabla 26 nos muestra las fórmulas cuyos resultados de volúmenes de material transportado en la costa Oeste del puerto de Salina Cruz, Oaxaca, se asemejan más a la cuantificación del volumen del material realizado en el sitio, el cual fue de 1,182 m³/día. para el período 1980-1981.

AUTOR	FÓRMULA	Q = (M ³ / DÍA)			
		A	B	C	D
CALDWELL	$Q_s = K E^{0.6}$	2.11	0.453	0.634	1.836
CERC	$Q_s = 913 K^2 H_0^2 T \text{ sen } 2\alpha$	3,563.30	644.43	1,220.09	3,463.86
SAVAGE	$Q_s = 0.217 E_x$	156.33	22.95	35.42	130.93
IJIMA, SATO, AONO E ISHI	$Q_s = 0.130 E_x^{0.54}$	4.54	1.61	2.04	4.13
ICHIKAWA, OCHIAI	$Q_s = 0.131 E_x^{0.3}$	0.943	0.530	0.604	0.890
TOMICA Y MOROBISE	$Q_s = 0.786 E_x^{0.91} \rho^{0.59}$	195.53	69.41	37.46	100.05
MANOHA	$Q_s = 0.3 E_x$	216.12	31.73	48.97	181.01
IJIMA, SATO Y TANAKA	$Q_s = 0.401 E_x$	288.88	42.41	65.46	241.95
SHORE PROTECTION MANUAL	$Q_s = 1.56 \frac{H^2 T^3 \text{ sen } (7/4)\alpha}{H_0 D^{1/2}}$	11,749.51	1,305.70	5,791.92	16,510.10
LARRAS	$Q_s = 0.505 \frac{H^2 T^2 \text{ sen } 2\alpha}{D^{1/2}}$	226.81	25.31	111.57	296.48
PICHKINE	$Q_s = \frac{0.04 (HS)^{3/2} V^2 B_1}{\Delta^2 g^{1/2} D_{3s}}$	34.13	0.37	14.31	26.38
ENGELUND.	$Q_s = B D \frac{\sqrt{g} V}{C} \exp \left[\frac{-0.27 \Delta D p g}{\mu T_{cw}} \right]$	5.355	62,115.00	1.665	6,460.50
BIJKER	$Q_s = b \frac{D_{50} V \sqrt{2}}{C} \exp \left[\frac{-0.27 \Delta D_{50} g}{V_{cw}} \right]$	0.0563	0.1131	0.0216	0.0142
PEMEX	$Q_s = H^2 T f(\alpha) t \left[\frac{\text{kg}}{C} \right]$	263.38	30.01	177.20	452.57
LABORATORIO CENTRAL DE HIDRAULICA DE FRANCIA	$Q_s = 1.1 \times 10^6 D m^{7/4} H_0 (\text{sen } 2\alpha / mT)^{1/2}$	156.33	22.95	35.42	130.93

Tabla 25. RESULTADOS EMPÍRICOS DE TRANSPORTE LITORAL.

AUTOR	Q_s CALCULADO (m^3 / día)	Q_s MEDIDO (m^3 / día)
CERC	1,220.09	1,182.00
LARRAS	1,305.70	

TABLA 26. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES.

Todas las fórmulas empíricas dan diversos resultados de transporte litoral ya que sus coeficientes fueron calibrados para una zona en particular.

Las fórmulas que dieron los resultados más aproximados de acuerdo con las mediciones directas en el sitio, fueron:

- 1.- Fórmula de CERC, que arrojó un transporte litoral de 1,220.09 m³/día.
- 2.- Fórmula de LARRAS, con un volumen de acarreo de 1,305.70 m³/día.

Las demás fórmulas no se consideran aplicables a la zona en estudio, ya que las cifras arrojadas por los cálculos resultan muy diferentes a las obtenidas en las mediciones directas.

Las fórmulas empíricas no contemplan todos los parámetros que tienen influencia en el fenómeno de transporte litoral.

8.2 RECOMENDACIONES.

Existen varios criterios que permiten valorar analíticamente el volumen de arena arrastrada por el oleaje, sin embargo, todos los métodos tienen algún inconveniente que limita y reduce su aplicación.

Cuando se desea conocer el volumen que se mueve durante un año se debe recurrir al uso de las fórmulas indicadas. Por medio de mediciones directas y conocidas las características del oleaje durante la medición del arrastre, se puede conocer cual de los métodos analíticos que se han presentado, permite encontrar un valor más cercano a lo observado. La fórmula con la cual se obtiene el resultado más congruente con lo medido, es la que conviene aplicar para determinar analíticamente, el volumen de material arrastrado por los diferentes oleajes que se presentan a lo largo del año en el sitio en estudio.

Hay factores como la forma de la playa, número de rompientes, distribución del tamaño de los materiales, influencia del viento local, etc., que no son tomados en cuenta en las fórmulas, por lo que es indispensable medir el arrastre durante un período mínimo de un año y seleccionar la mejor fórmula para ser aplicada en ese lugar. Para que las fórmulas empíricas establecidas den resultados confiables del transporte litoral en una zona, deberán calcularse los coeficientes que en ella intervienen.

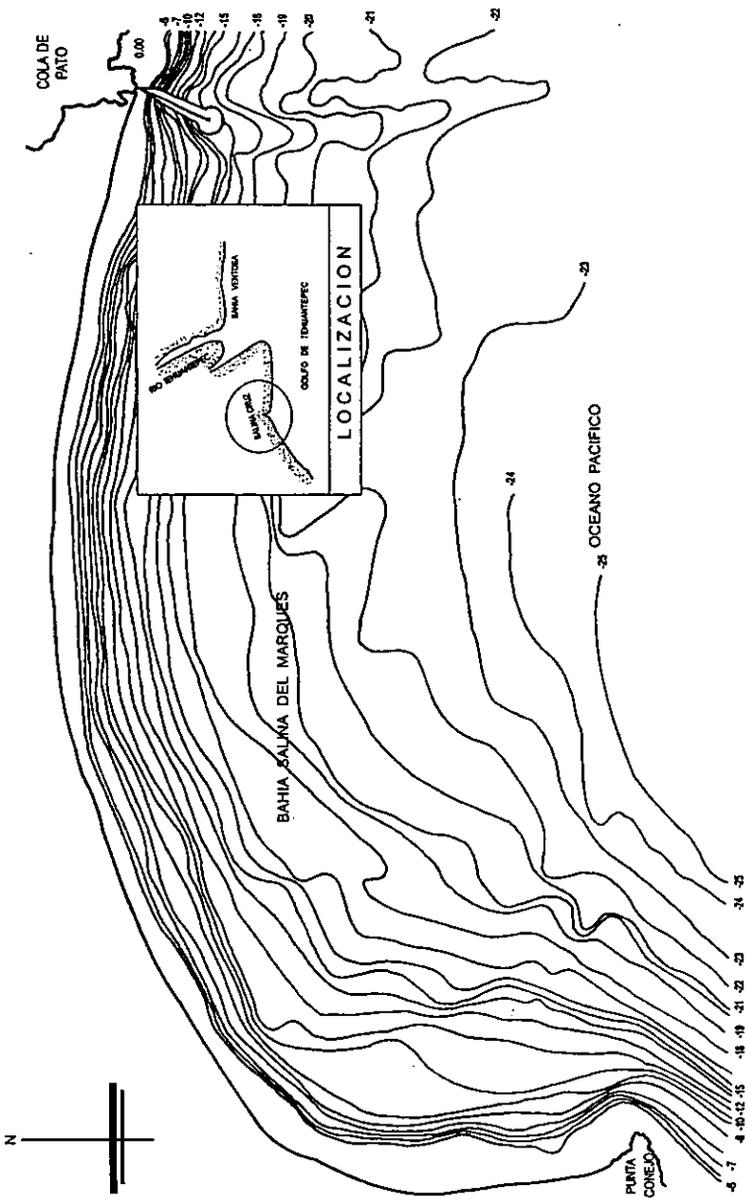
Para tener conocimiento real del transporte litoral en las costas, lo más indicado es cuantificarlo directamente.

Cuando se utilice alguna fórmula de transporte litoral, los parámetros que intervengan en ella deberán evaluarse correctamente en el sitio.

En los anteproyectos de cualquier obra marítima donde se involucra el transporte litoral podrá utilizarse la fórmula empírica que más se apegue a las condiciones del sitio, de acuerdo con los fenómenos oceanográficos observados.

APÉNDICES.

- 1.- Plano general.
- 2.- Perfil playero.
- 3.- Batimetría.
- 4.- Diagrama de refracción (General). Dirección Sureste, $T = 8$ seg.
- 5.- Diagrama de refracción (General). Dirección Sur, $T = 8$ seg.
- 6.- Diagrama de refracción (General). Dirección Suroeste, $T = 8$ seg.
- 7.- Diagrama de refracción (General). Dirección Sureste, $T = 14$ seg.
- 8.- Diagrama de refracción (General). Dirección Sur, $T = 14$ seg.
- 9.- Diagrama de refracción (General). Dirección Suroeste, $T = 14$ seg.
- 10.- Diagrama de refracción (Detalle). Dirección Sureste, $T = 8$ seg.
- 11.- Diagrama de refracción (Detalle). Dirección Sur, $T = 8$ seg.
- 12.- Diagrama de refracción (Detalle). Dirección Suroeste, $T = 8$ seg.
- 13.- Diagrama de refracción (Detalle). Dirección Sureste, $T = 14$ seg.
- 14.- Diagrama de refracción (Detalle). Dirección Sur, $T = 14$ seg.
- 15.- Diagrama de refracción (Detalle). Dirección Suroeste, $T = 14$ seg.

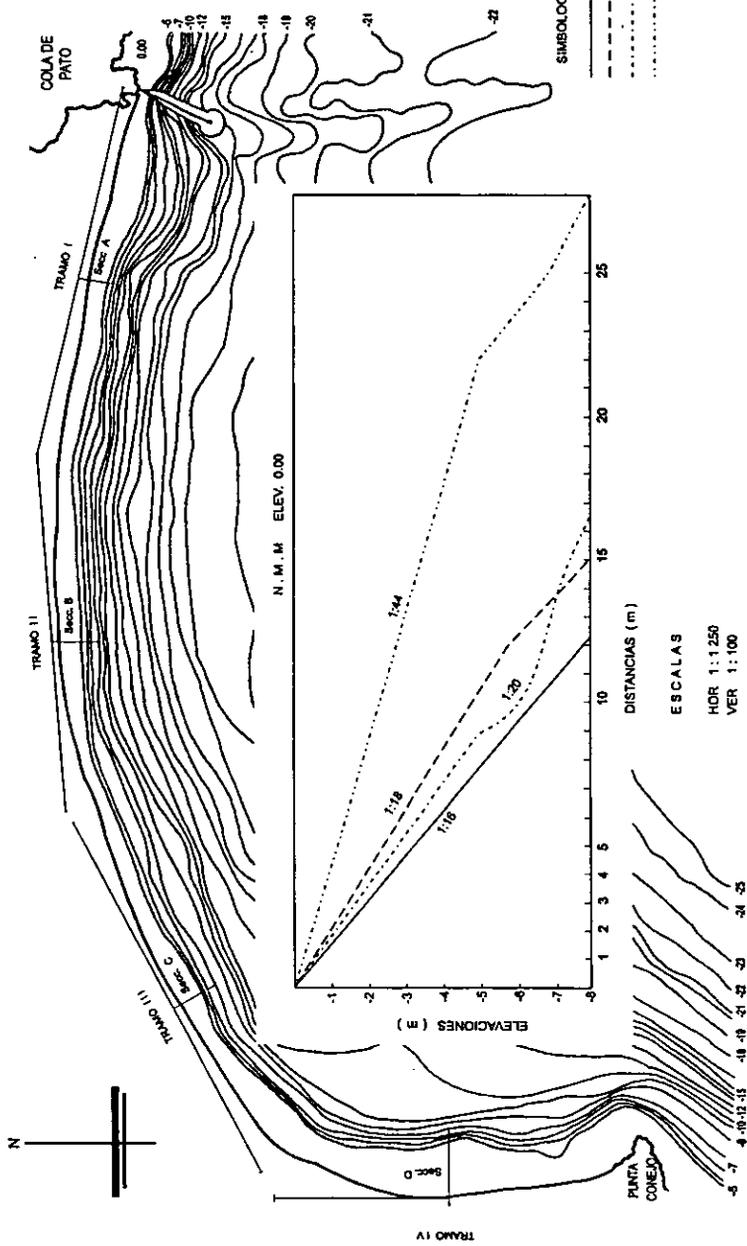


NOTAS :

- El norte considerado es el astronómico.
- Las elevaciones están referidas al nivel de bajamar media inferior con elev. 0.00
- La batimetría es una ampliación del levantamiento de 1956.
- La batimetría está dada en metros.



U. N. A. M. E. N. E. P. Aragón	TESIS PROFESIONAL	
	PLANO GENERAL	
	DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ REVISOR: EL ASESOR ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ	
SIN. JUAN DE ARAGON, MEX. FEBRERO DE 1958		ESC. 1 : 10 000 PLANO No. 1



SIMBOLOGIA

— SECC. A
 - - - SECC. B
 SECC. C
 - · - · - SECC. D

DISTANCIAS (m)

ESCALAS

HOR 1:1250
 VER 1:100

NOTAS:

El norte considerado es el astronómico.

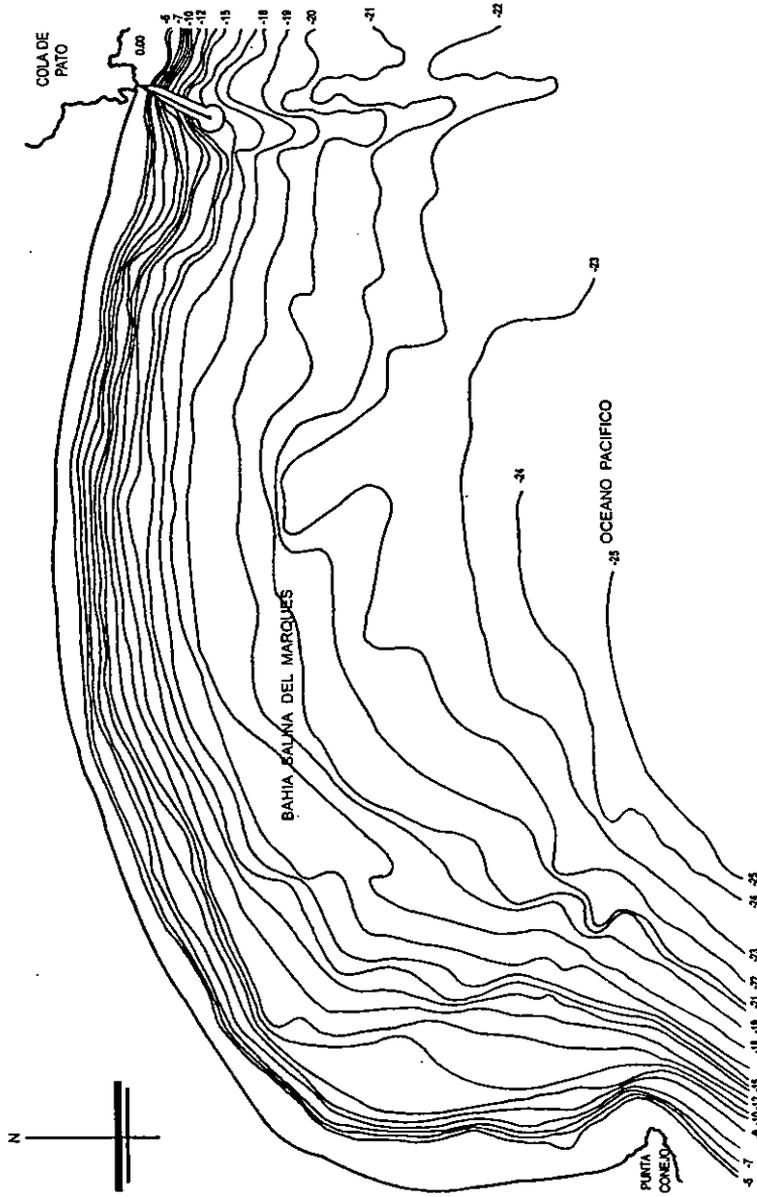
Las elevaciones están referidas al nivel de bajamar media inferior con elev. 0.00

La batimetría es una ampliación del levantamiento de 1956.

La batimetría está dada en metros.



U. N. A. M.		TESIS PROFESIONAL	
E. N. E. P. Aragón		PERFIL PLAYERO	
DIBUJO: MARIO JIMÉNEZ GÓMEZ		ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ	
REVISOR: EL ASESOR		SN. JUAN DE ARAGON, MEX. FEBRERO DE 1998	
ESC. INGENIEROS		PLANO No. 2	



NOTAS :

- El norte considerado es el astronómico.
- Las elevaciones están referidas al nivel de bajamar media inferior con elev. 0.00
- La batimetría es una ampliación del levantamiento de 1956.
- La batimetría está dada en metros.



U. N. A. M.		TESIS PROFESIONAL	
E.N.E.P. Aragón		BATIMETRIA	
DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ			
REVISOR: EL ASESOR			
ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ			
SN. JUAN DE ARAGON, MEX.		FEBRERO DE 1988	
		ESC. 1 : 10 000	
		PLANO No. 3	

DIAGRAMA DE REFRACCION (GENERAL)

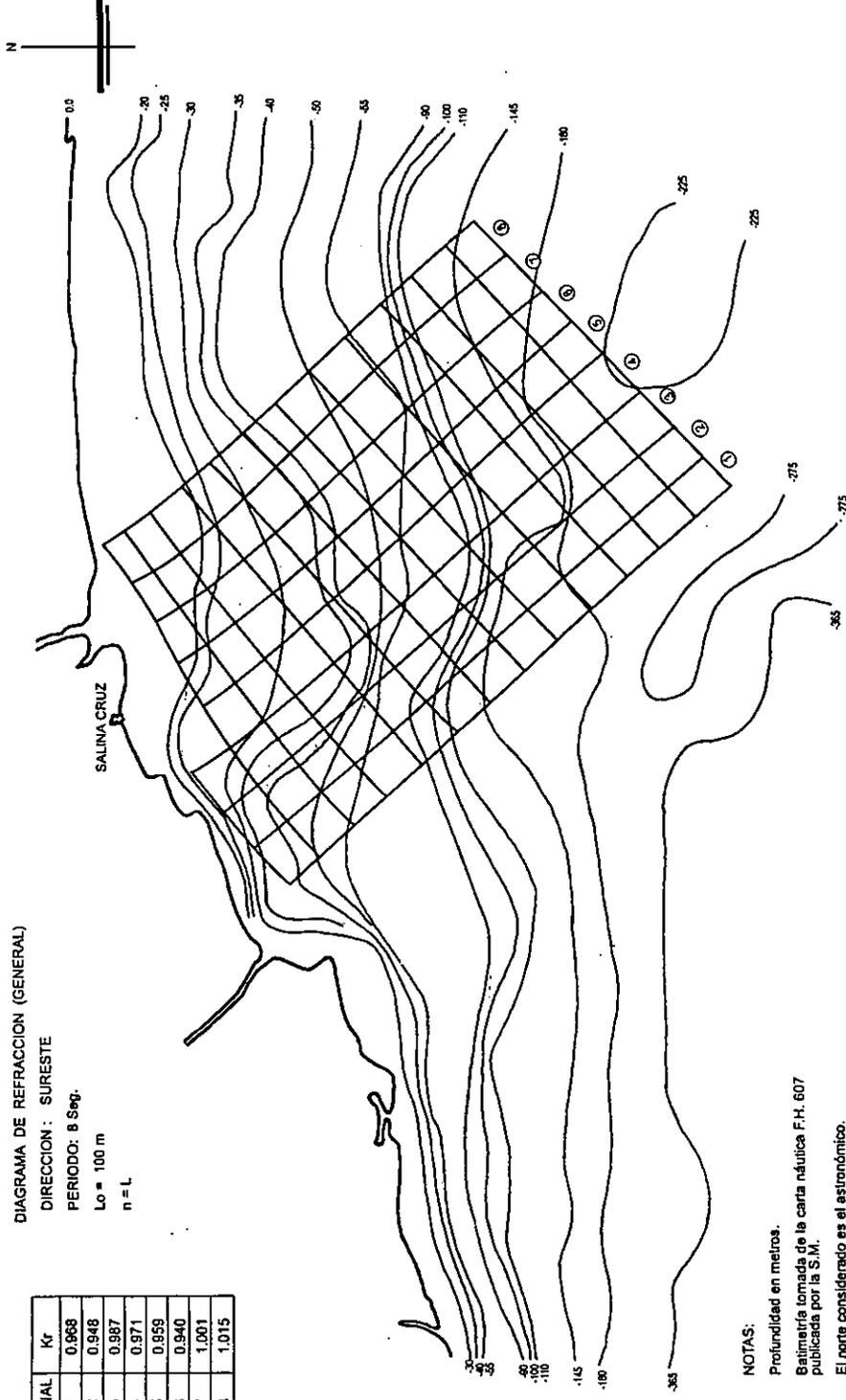
DIRECCION: SURESTE

PERIODO: 8 Seg.

Lo = 100 m

n = L

CANAL	Kr
1	0.968
2	0.948
3	0.987
4	0.971
5	0.859
6	0.940
7	1.001
8	1.015



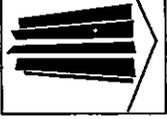
NOTAS:

Profundidad en metros.

Batimetría tomada de la carta náutica F.H. 607 publicada por la S.M.

El norte considerado es el astronómico.

El nivel cero está referido al nivel medio del mar.



U. N. A. M.

E.N.E.P. Aragón

DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ

REVISO: EL ASESOR

ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ

TESIS PROFESIONAL

SALINA CRUZ, OAX.

BAHIA SALINA DEL MARQUES

DIAGRAMA DE REFRACCION

(GENERAL)

SN. JUAN DE ARAGON, MEX. | FEBRERO DE 1998 | ESC. 1:150 000 | PLANO No. 4

DIAGRAMA DE REFRACCION (GENERAL)

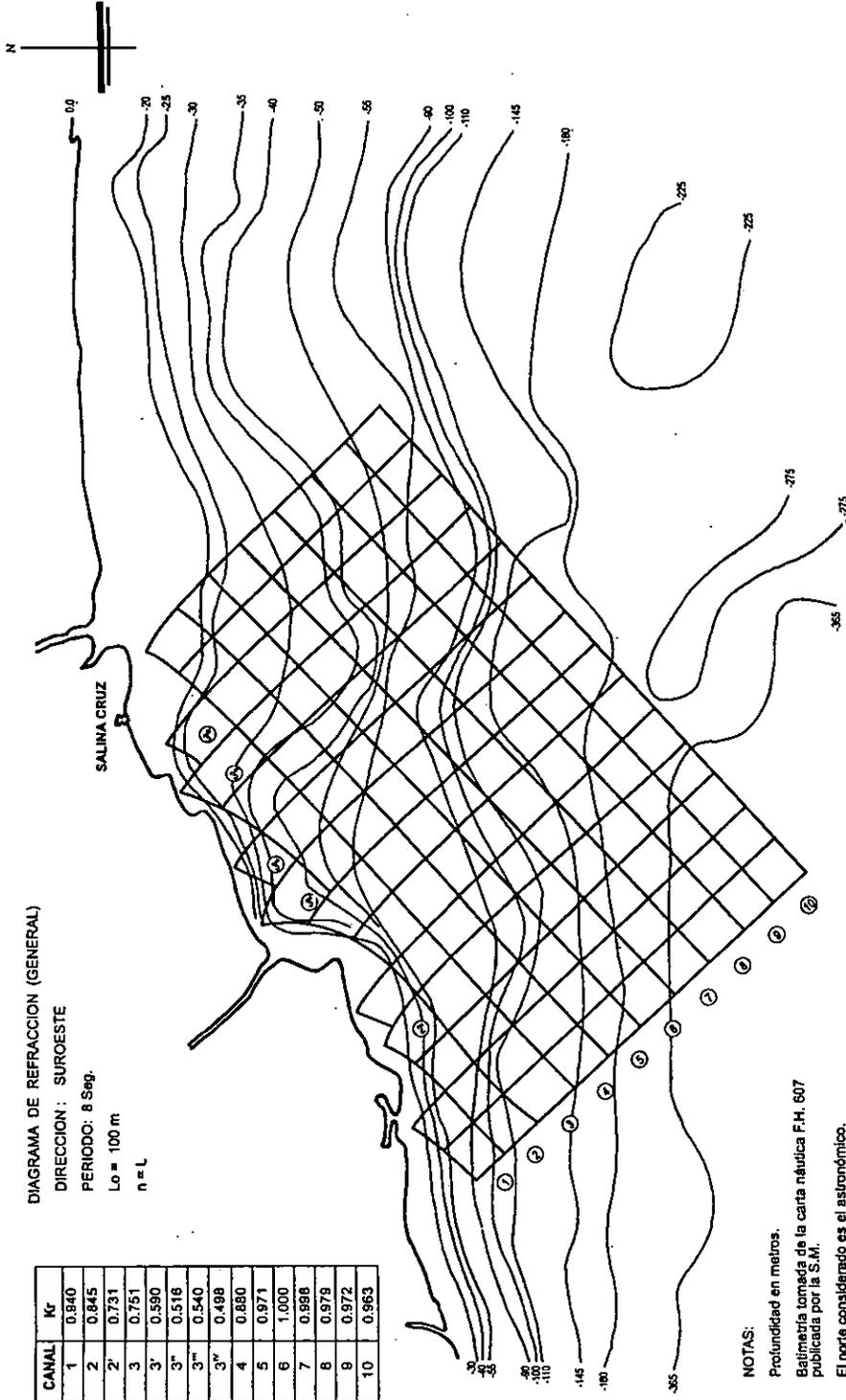
DIRECCION: SUROESTE

PERIODO: 8 Seg.

Lo = 100 m

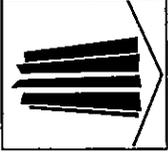
n = L

CANAL	Rf
1	0.840
2	0.845
2'	0.731
3	0.751
3'	0.590
3''	0.518
3'''	0.540
3''''	0.488
4	0.880
5	0.971
6	1.000
7	0.998
8	0.978
9	0.972
10	0.963



NOTAS:

- Profundidad en metros.
- Batimetría tomada de la carta náutica F.H. 607 publicada por la S.M.
- El norte considerado es el astronómico.
- El nivel cero está referido al nivel medio del mar.

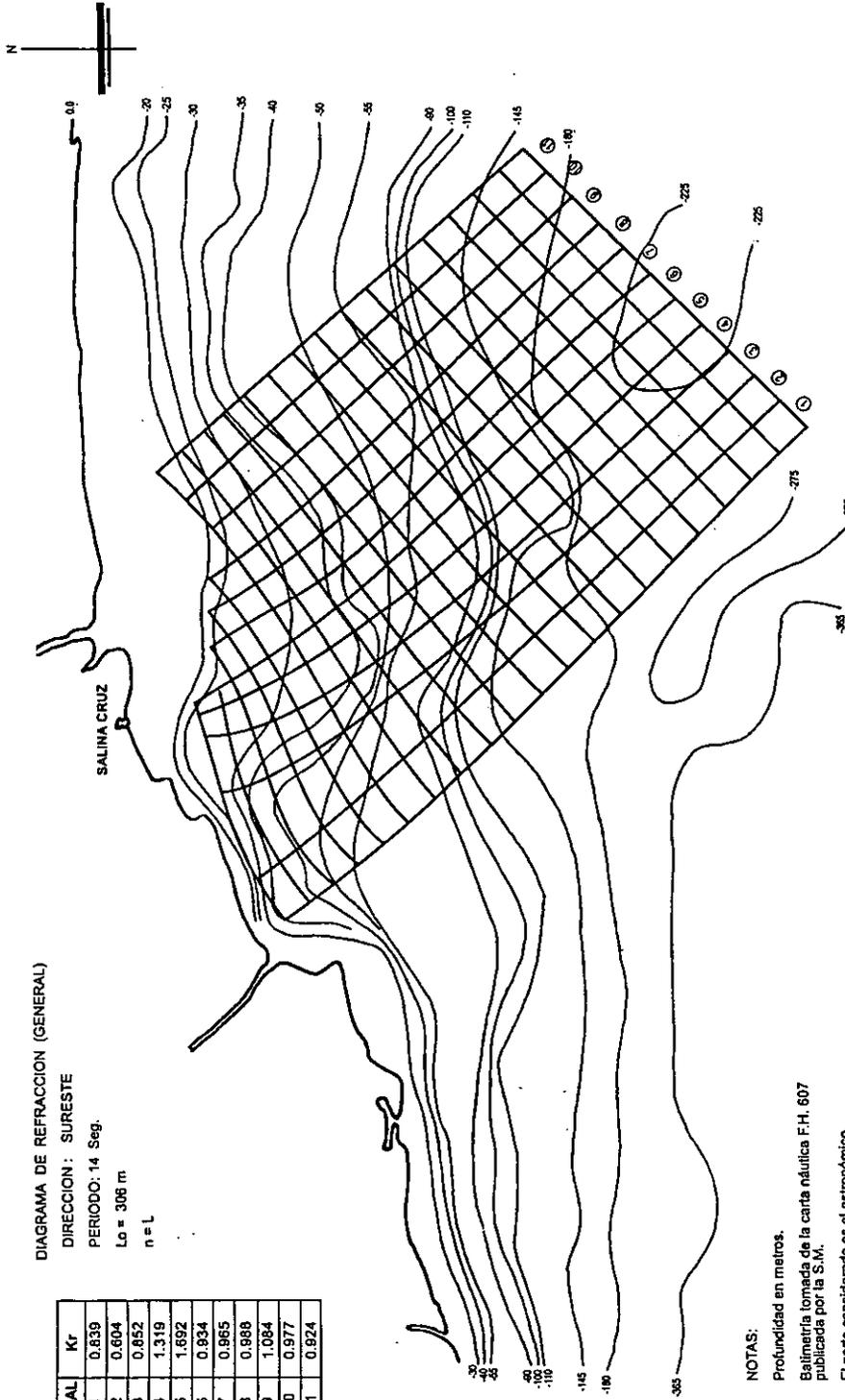


U. N. A. M.		TESIS PROFESIONAL	
E.N.E.P. Aragón		SALINA CRUZ, OAX.	
DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ		BAHIA SALINA DEL MARQUES	
REVISO: EL ASESOR		DIAGRAMA DE REFRACCION	
ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ		(GENERAL)	
SN. JUAN DE ARAGON, MEX FEBRERO DE 1968		ESC. 1:150 000 PLANO No. 6	

DIAGRAMA DE REFRACCION (GENERAL)

DIRECCION : SURESTE
 PERIODO: 14 Seg.
 Lo = 308 m
 n = L

CANAL	Kr
1	0.839
2	0.604
3	0.652
4	1.319
5	1.692
6	0.934
7	0.965
8	0.980
9	1.084
10	0.977
11	0.924



NOTAS:

Profundidad en metros.

Batimetría tomada de la carta náutica F.H. 607 publicada por la S.M.

El norte considerado es el astronómico.

El nivel cero esta referido al nivel medio del mar.

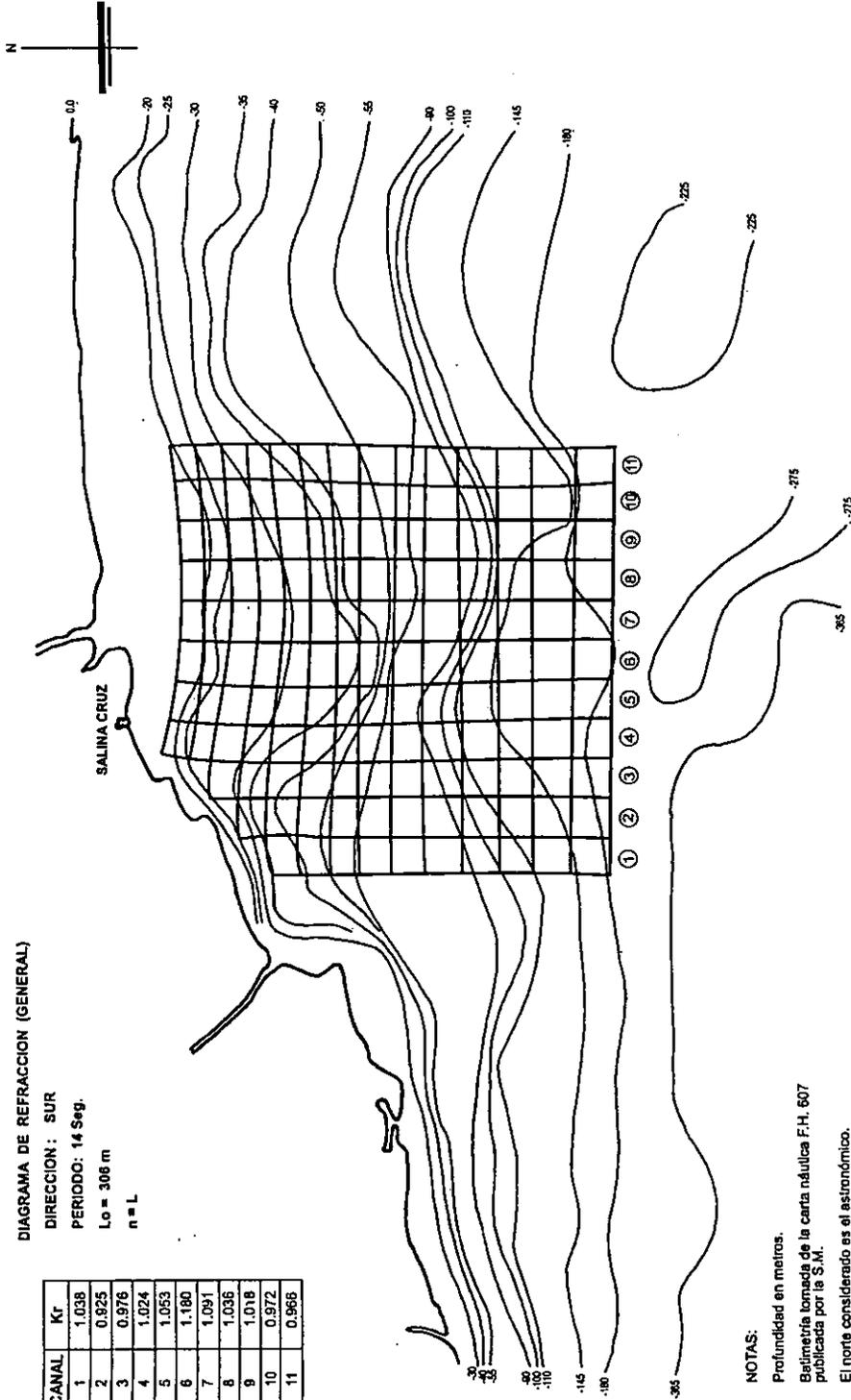


U. N. A. M.	TESIS PROFESIONAL
E.N.E.P. Aragón	SALINA CRUZ, OAX.
DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ	BAHIA SALINA DEL MARQUES
REVISO: EL ASSOR	DIAGRAMA DE REFRACCION
ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ	(GENERAL)
SN. JUAN DE ARAGON, MEX. FEBRERO DE 1998	ESC. 1:50 000
	PLANO No. 7

DIAGRAMA DE REFRACCION (GENERAL)

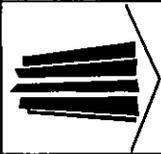
DIRECCION: SUR
 PERIODO: 14 Seg.
 Lo = 300 m
 n = L

CANAL	Kr
1	1.038
2	0.925
3	0.976
4	1.024
5	1.053
6	1.180
7	1.091
8	1.036
9	1.018
10	0.972
11	0.966



NOTAS:

Profundidad en metros.
 Batimetría tomada de la carta náutica F.H. 607
 publicada por la S.M.
 El norte considerado es el astronómico.
 El nivel cero está referido al nivel medio del mar.



U. N. A. M.		TESIS PROFESIONAL	
E.N.E.P. Aragón		SALINA CRUZ, OAX.	
DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ		BAHIA SALINA DEL MARQUES	
REVISO: EL ASesor		DIAGRAMA DE REFRACCION	
ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ		(GENERAL)	
SR. JUAN DE ARAGON, MEXI		FEBRERO DE 1998	
ESC. 1:150 000		PLANO No. 8	

DIAGRAMA DE REFRACCION (GENERAL)

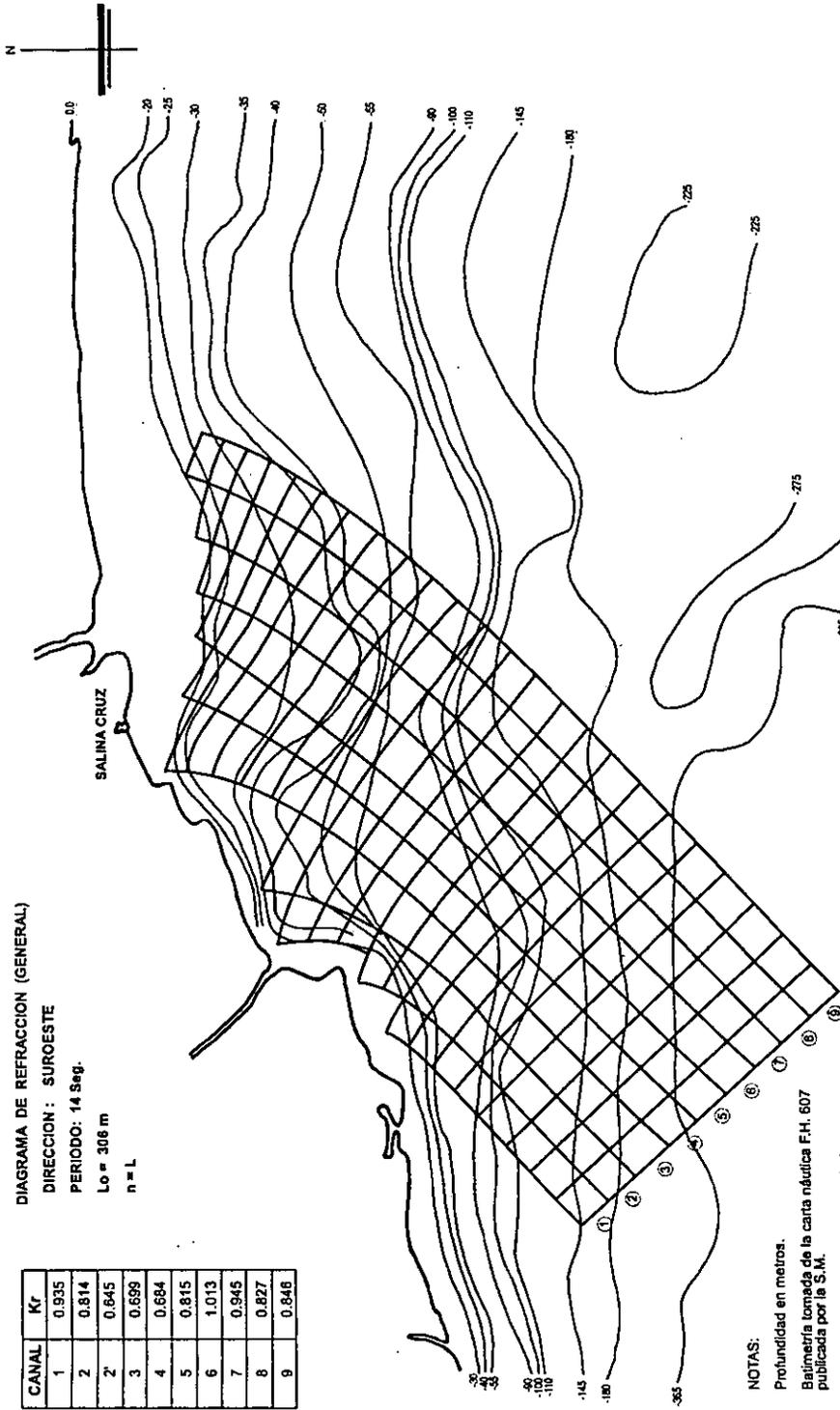
DIRECCION: SUROESTE

PERIODO: 14 Seg.

Lo = 306 m

n = L

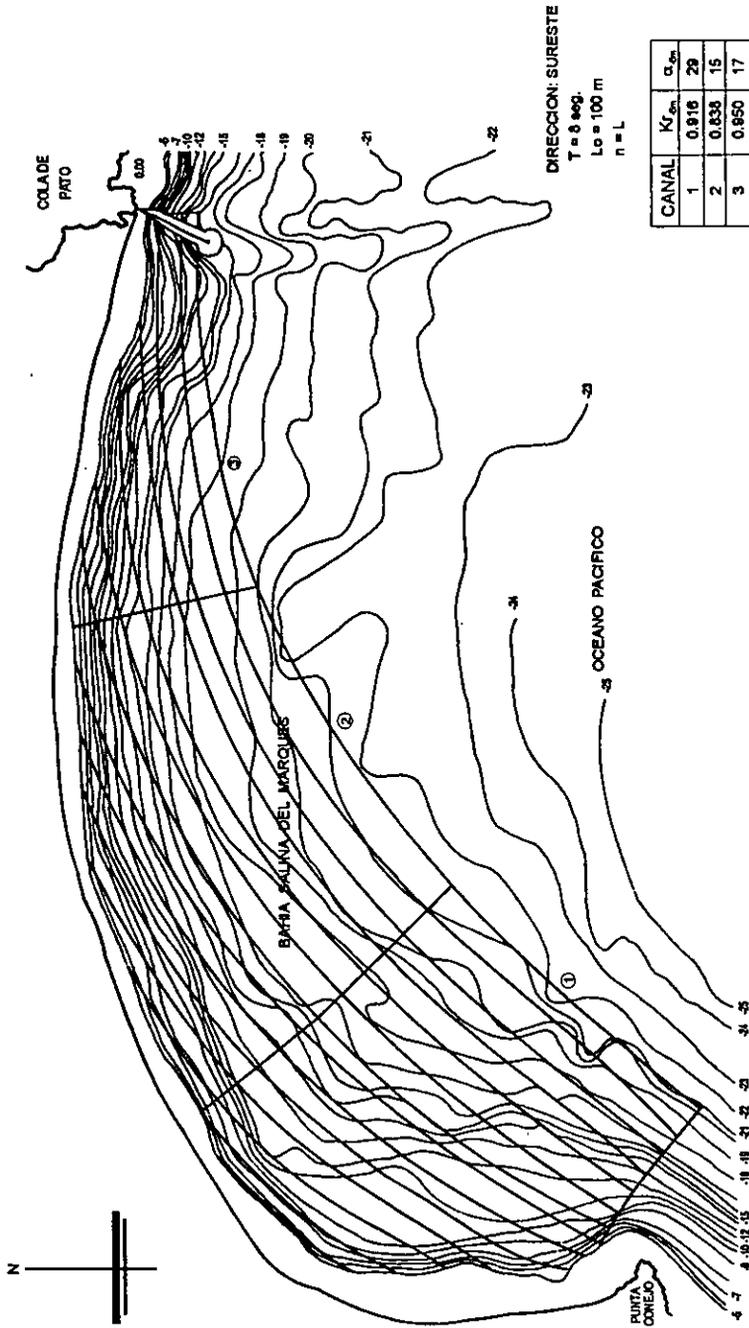
CANAL	Kr
1	0.935
2	0.814
3	0.645
4	0.599
5	0.684
6	0.815
7	1.013
8	0.945
9	0.827
10	0.848



NOTAS:
 Profundidad en metros.
 Batimetría tomada de la carta náutica F.H. 607
 publicada por la S.M.
 El norte considerado es el astronómico.
 El nivel cero está referido al nivel medio del mar.

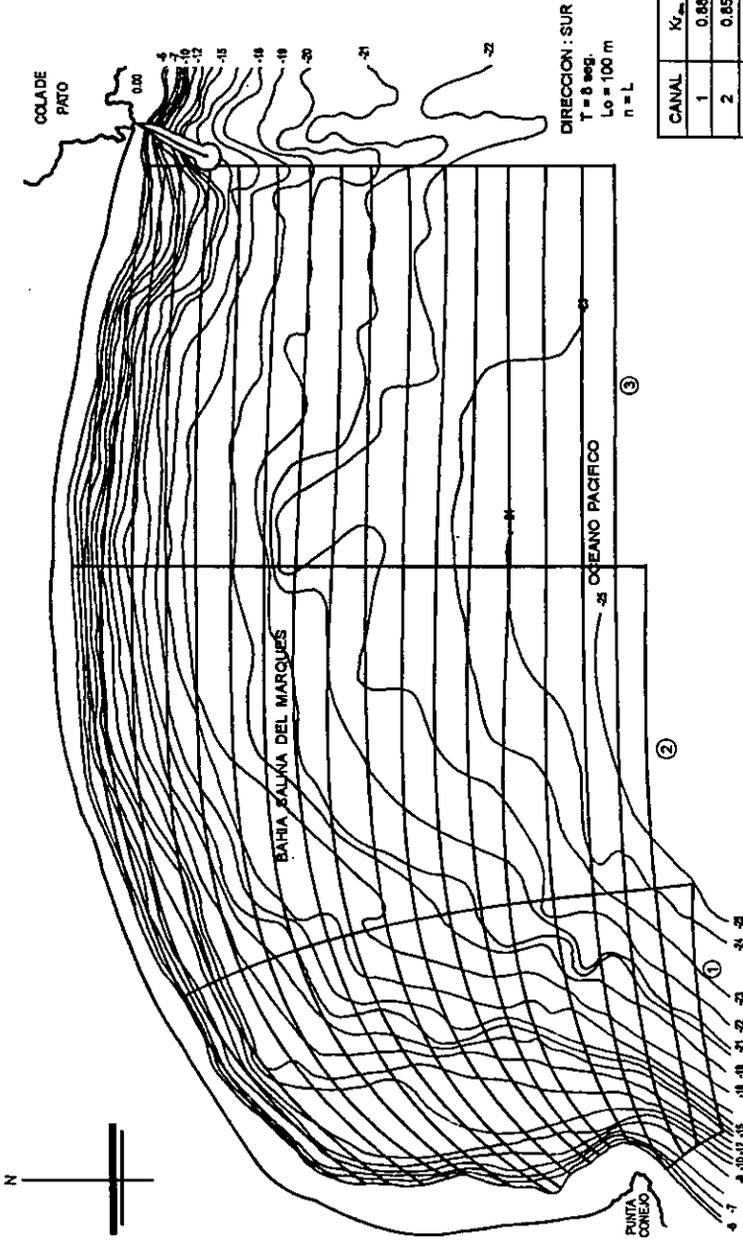


U. N. A. M.		TESIS PROFESIONAL	
E.N.E.P. Aragón		SALINA CRUZ, OAX.	
DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ		BAHIA SALINA DEL MARGUES	
REVISO: EL ASESOR		DIAGRAMA DE REFRACCION	
ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ		(GENERAL)	
SN. JUAN DE ARAGON, MEX.		FEBRERO DE 1998	
ESC. 1:150 000		PLANO No. 9	



U. N. A. M.
 E. N. E. P. Aragón
 DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ
 REVISO: EL ASESOR
 ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ
 TESIS PROFESIONAL
 SALINA CRUZ, OAX
 BAHIA SALINA DEL MARQUES
 DIAGRAMA DE REFRACCION
 (DETALLE)
 SR. JUAN DE ARAGON, MEX., FEBRERO DE 1998 (ESC. 1 : 10 000) PLANO No. 10

NOTAS:
 El norte considerado es el astronómico.
 Las elevaciones están referidas al nivel de
 bajamar media inferior con elev. 0.00
 La batimetría es una ampliación del
 levantamiento de 1956.
 La batimetría está dada en metros.
 El canal de energía No. 4 y 5 fue el que se
 tomó para continuar el trazo.



CANAL	K_{m}	α_m
1	0.852	25
2	0.856	15
3	0.961	5

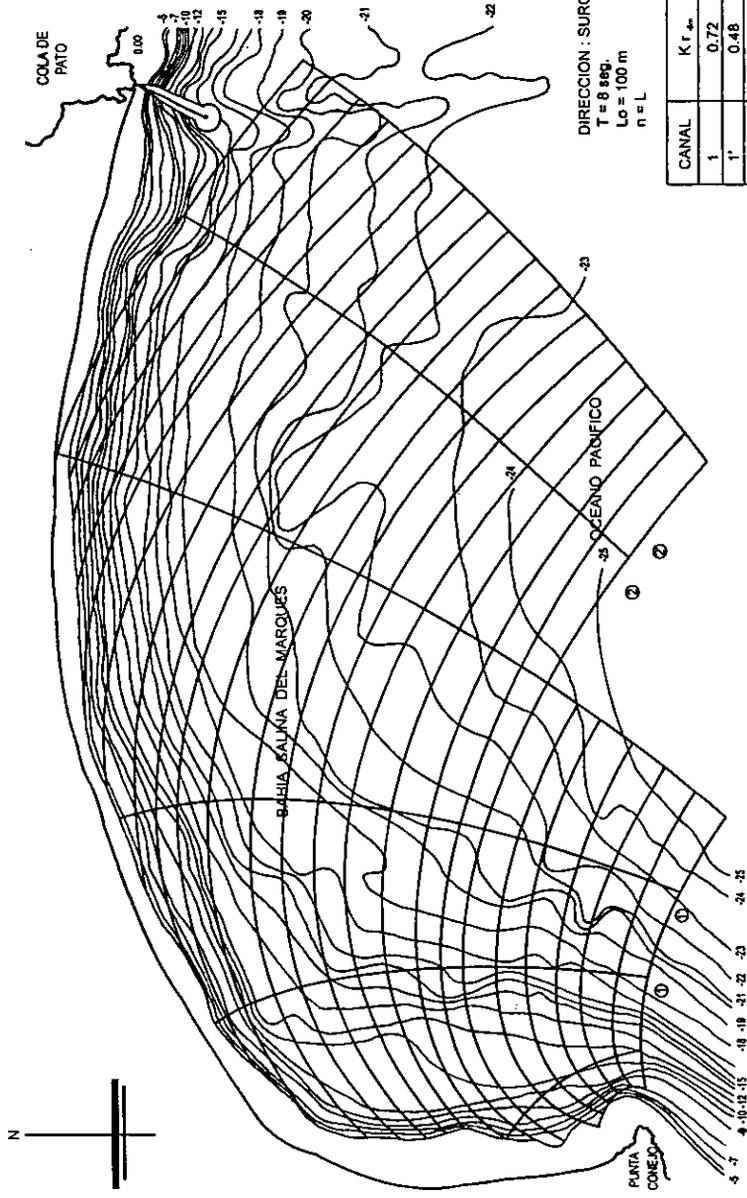


U. N. A. M.
E. N. E. P. Aragón
 DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ
 REVISOR: EL ASESOR
 ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ

TESIS PROFESIONAL
 SALINA CRUZ, OAX.
 BAHIA SALINA DEL MARQUES
 DIAGRAMA DE REFRACCION
 (DETALLE)

SN. JUAN DE ARAGON, MEX | FEBRERO DE 1998 | ESC. 1: 10 000 | PLANO No. 11

NOTAS :
 El norte considerado es el astronómico.
 Las elevaciones están referidas al nivel de
 bajar mar media inferior con elev. 0.00
 La batimetría es una ampliación del
 levantamiento de 1956.
 La batimetría está dada en metros.
 El canal de energía No. 6 fue el que se tomó para
 continuar el trazo



DIRECCION : SUROESTE
 T = 8 86g.
 Lo = 100 m
 n = L

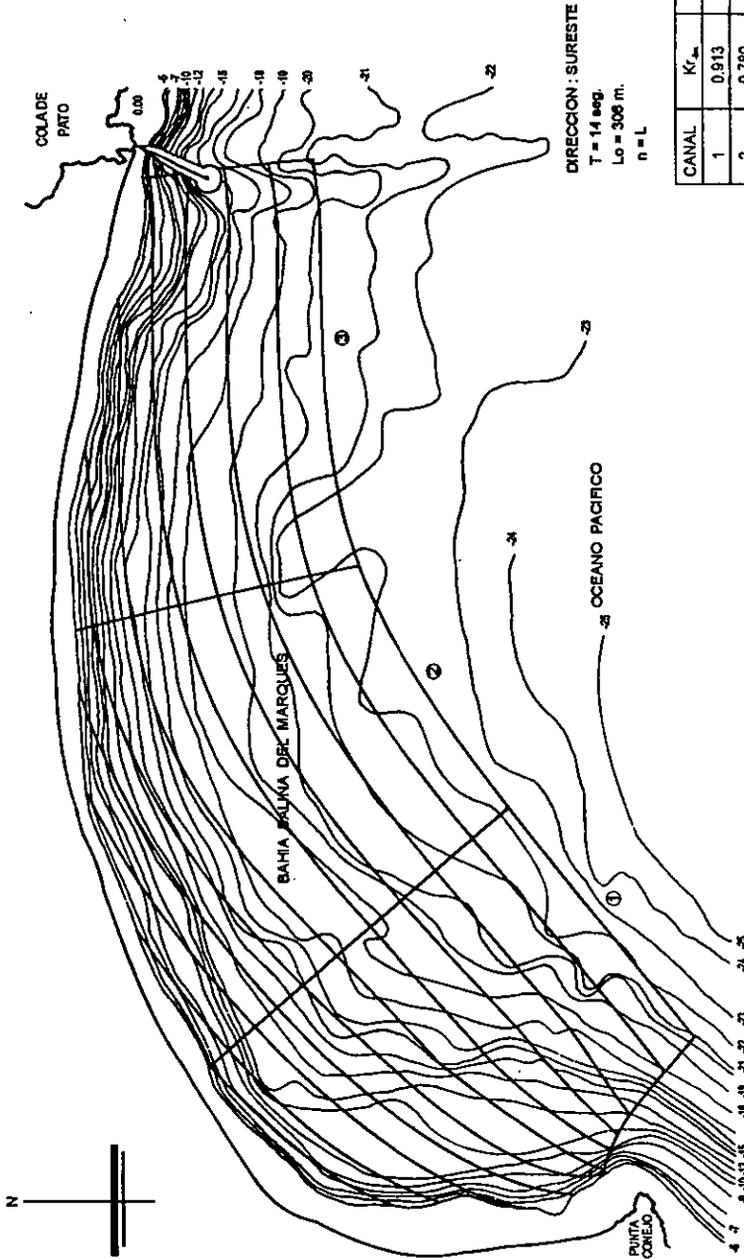
CANAL	K T _{des}	σ _{des}
1	0.72	24
1'	0.48	5
2	0.65	7
2'	0.54	48



U. N. A. M.
 E. N. E. P. Aragón
 DIBUJO: MARIO JIMÉNEZ GÓMEZ
 REVISÓ: EL ASESOR
 ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ
 TESIS PROFESIONAL
 SALINA CRUZ, OAX.
 BAHÍA SALINA DEL MARQUÉS
 DIAGRAMA DE REFRACCION
 (DETALLE)
 SN. JUAN DE ARAGON, MEX. | FEBRERO DE 1956 | ESC. 1 : 10 000 | PLANO No. 12

NOTAS :

- El norte considerado es el astronómico.
- Las elevaciones están referidas al nivel de bajamar media inferior con elev. 0.00
- La balimétrica es una ampliación del levantamiento de 1956.
- La balimétrica está dada en metros.
- El canal de energía no. 3' y 4' fue el que se tomó para continuar el trazo



U. N. A. M.
E. N. E. P. Aragón

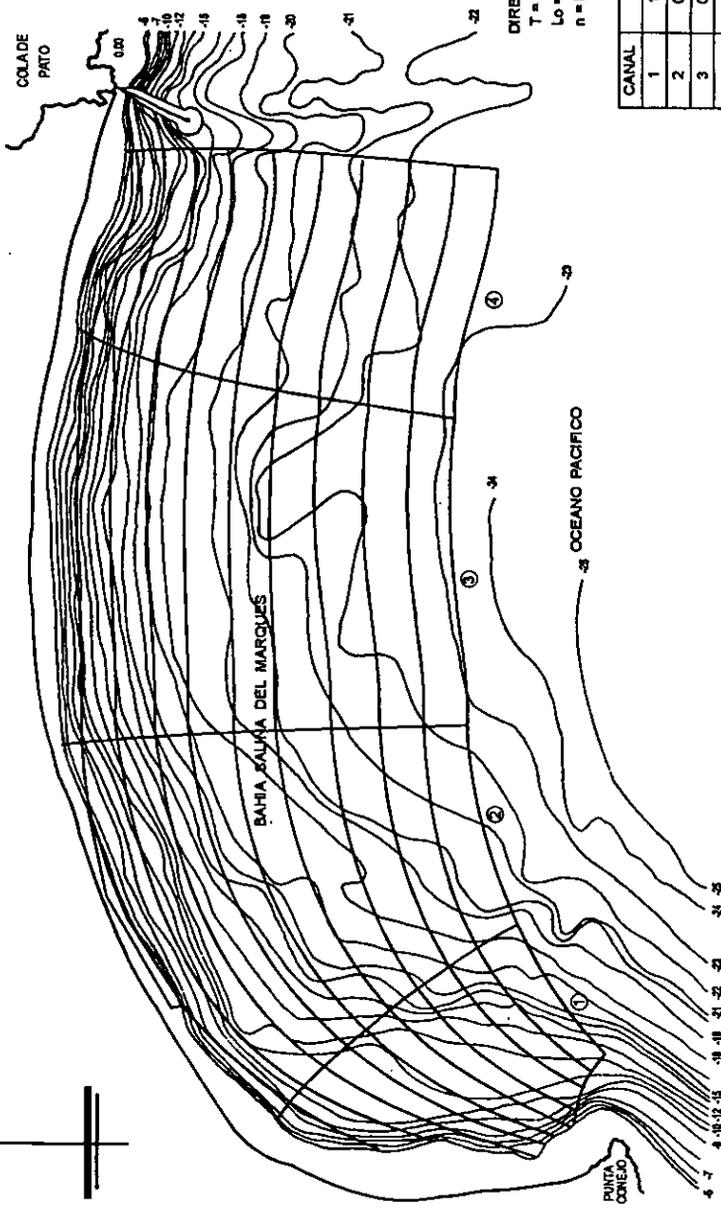
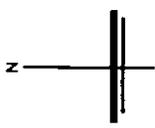
TESIS PROFESIONAL
 SALINA CRUZ, OAX.
 BAHIA SALINA DEL MARQUES
 DIAGRAMA DE REFRACCION
 (DETALLE)

DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ
 REMSC. EL ASESOR
 ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ

SN. JUAN DE ARAGON, MEX. | FEBRERO DE 1998 | ESC. 1:10 000 | PLANO No. 13

NOTAS :

- El norte considerado es el astronómico.
- Las elevaciones están referidas al nivel de bajamar media marea con elev. 0.00
- La batimetría es una ampliación del levantamiento de 1955.
- La batimetría está dada en metros.
- El canal de energía No. 3, 4 y 5 fue el que se tomó para continuar el trazo



DIRECCION : SUR
 T = 14 seg.
 Lo = 300 m
 n = L

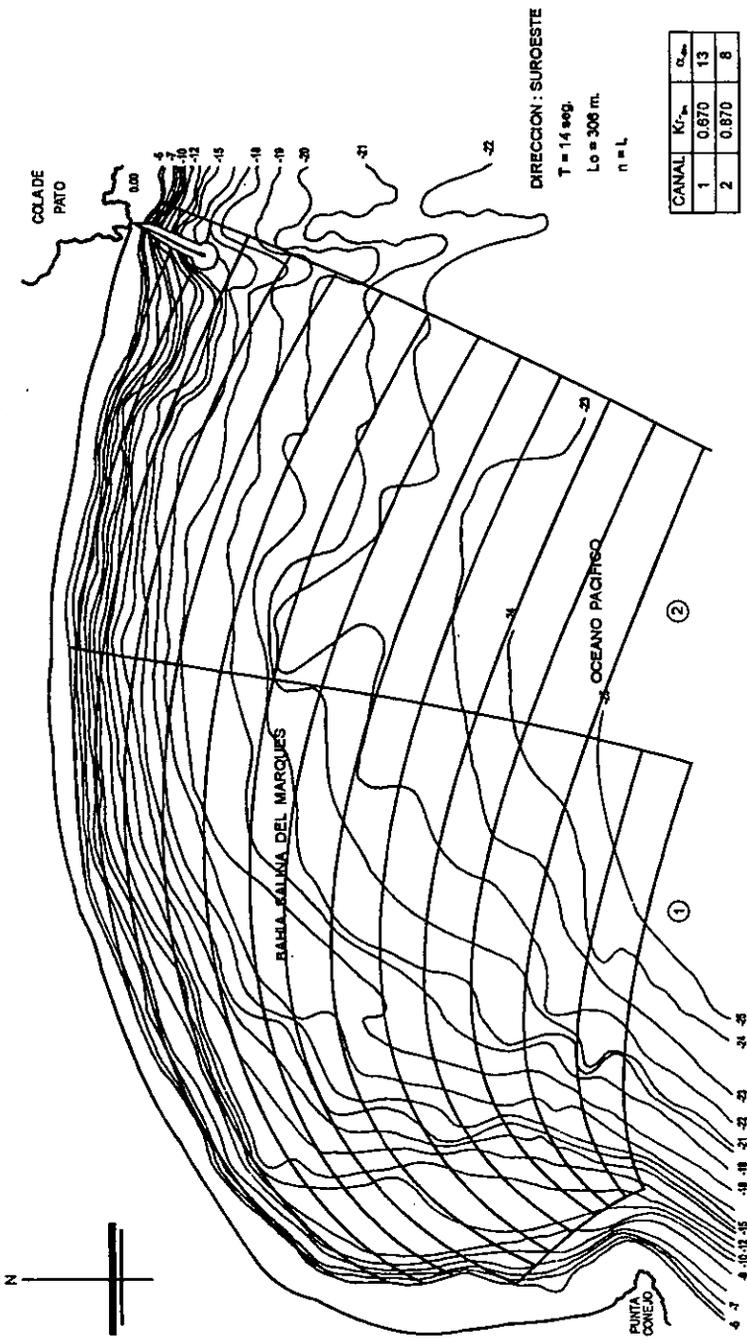
CANAL	K ₂ m	α _m
1	1.230	10
2	0.820	4
3	0.860	12
4	0.720	38

NOTAS :

- El norte considerado es el astronómico.
- Las elevaciones están referidas al nivel de bajamar media inferior con elev. 0.00
- La batimetría es una ampliación del levantamiento de 1958.
- La batimetría está dada en metros
- El canal de energía No. 3 y 4 fue el que se tomó para continuar el trazo.



U. N. A. M.		TESIS PROFESIONAL	
E.N.E.P. Aragón		SALINA CRUZ, OAX.	
DIBUJO: MARIO JIMÉNEZ GÓMEZ		BAHIA SALINA DEL MARQUES	
REVISOR: EL ASESOR		DIAGRAMA DE REFRACCION	
ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ		(DETALLE)	
SR. JUAN DE ARAGON, MEX.		FEBRERO DE 1968	
ESC. 1: 10 000		PLANO No. 14	



NOTAS :

- El norte considerado es el astronómico.
- Las elevaciones están referidas al nivel de bajar media inferior con elev. 0.00
- La batimetría es una ampliación del levantamiento de 1956.
- La batimetría está dada en metros.
- El canal de energía No. 4 fue el que se tomó para constituir el trazo.



U. N. A. M.
E. N. E. P. Aragón
 DIBUJO: MARIO JIMENEZ GOMEZ
 REVISO: EL ASESOR
 ING. CIVIL VALENTE TORRES ORTIZ

TESIS PROFESIONAL
 SALINA CRUZ, OAX.
 BAHIA SALINA DEL MARQUES
 DIAGRAMA DE REFRACCION
 (DETALLE)

SN. JUAN DE ARAGON, MEX. FEBRERO DE 1988 ESC. 1: 10 000 PLANO No. 15

BIBLIOGRAFIA

- BIC, Ingenieros Civiles, S.A. de C.V., Estudios Físicos en la Boca del Mezquital, Tamps. , Dirección General de Obras Marítimas, México 1985.
- Bonefille, R., Hydraulique Maritime , Ecole Nationale des Travaux Publics de L' Etat, París, 1970. Bustamante, R.
- Figueroa C.V., Ingeniería Marítima, Impresiones Selectas, México. 1959.
- Consultores, S.A. Estudios de Acarreos Litorales y Topohidrográficos Laguna Madre, Tamps. Secretaria de Marina, México 1974.
- Ferrero, H. J. Tratado de Hidráulica. Editorial Alhambra Mexicana, S.A., México, D.F. 1982.
- Frías, V.A., Moreno, C. G. , Ingeniería de Costas, (2a. Edición), Limusa, México, 1989.
- Katoh, K., Tanaka, N. Litoral Drift, Ministry of Transport Japan International Cooperation Agency, Tokyo, Jap. 1983.
- Maza Alvarez José A. Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia, Hidráulica Marítima. Comisión Federal de Electricidad. México 1983.

Office, Japan International Cooperation Agency,
Características Generales de las Ondas Progresivas
Regulares. Texto para el Proyecto del Centro Hidráulico
Portuario. Vol. I. México. 1985.

Montoya Rodríguez Miguel, Chavez Amparán Ramón.
Asolvamiento de Puertos. 5º Curso Internacional de
Ingeniería Portuaria. Puertos Mexicanos. 1992.

Montoya Rodríguez Miguel. Características Generales del
Movimiento de Arena. 5º Curso Internacional de
Ingeniería Portuaria. Puertos Mexicanos. 1992.

Sánchez, B. J. L. Manual de Hidráulica Marítima Elemental.
Comisión Federal de Electricidad . México. D.F. 1987.

Secretaría de Marina, Estudio Geográfico de la Región de Salina
Cruz, Oax. Dirección General de Oceanografía y
Señalamiento Marítimo. México, D.F. 1974.

Wiegel, R. L. , Oceanographical Engineering. Prentice Hall,
Englewood Cliffs, U. S. A.. 1964.

GLOSARIO DE TERMINOS

CONCEPTO	DEFINICION
Aguas intermedias o de transición	Condición que se presenta entre aguas someras y profundas, y la celeridad depende del período de la onda y de la profundidad del agua.
Aguas profundas	Se presenta esta condición cuando la celeridad de la onda no es afectada por la profundidad y solo depende de su período. A las variables se les pone subíndice "o".
Aguas someras o poco profundas	La celeridad depende de la profundidad, por tanto es independiente del período de la onda, se les pone subíndice "b".
Altura de la ola	Distancia vertical medida entre la cresta y valle de la onda.
Altura del perfil	Desnivel entre cualquier punto de la superficie de la onda y el nivel de reposo.
Amplitud de la ola	Distancia entre la cresta y el nivel medio de la onda.
Anemómetro	Instrumento que mide la velocidad del viento.
Bajamar	El diario descenso del nivel del mar.
Bancos	Acumulaciones de arena alejadas de la costa y bajo la superficie del agua.
Barras	Depósitos de sedimentos localizados en el litoral que siguen una dirección casi paralela a la costa, se forman en la zona de rompientes cuando el oleaje es muy intenso y a lo largo de ellos puede ocurrir un transporte intenso de sedimentos.
Barreras	Depósitos de sedimentos semejantes a las flechas que se presentan frente a lagunas costeras, pero que no están unidos a tierra firme; es decir, en ambos extremos se tiene una boca o comunicación entre la laguna y el mar.
Berma	Formación de sedimentos casi horizontales que se presentan al ir disminuyendo un oleaje de gran altura (al termino de una tormenta), pueden formarse una o varias bermas escalonadas.
Braza (Fathom)	Unidad de longitud que generalmente se utiliza para expresar la profundidad del terreno en las cartas marítimas=1.8288 m.
Celeridad o velocidad de la ola	Velocidad con que se traslada la onda a través de la superficie del líquido $C = L / T$.

Clapotis (Chapoteo)	Es la interacción de dos trenes de ondas que se propagan en direcciones opuestas.
Costa	Frontera entre el mar y la tierra.
Cresta de la ola	Punto donde el perfil de la onda tiene la mayor altura.
Decaimiento	Al avanzar una onda disminuye su altura debido principalmente a la fricción.
Difracción del oleaje	Cuando el oleaje es interrumpido por la presencia de un obstáculo, las ondas se curvan alrededor de este y penetran dentro de la zona protegida.
Energía de la onda	Es igual a la suma de la energía potencial y la cinética.
Esbeltez de la ola	Relación entre altura y longitud, 1/7 para aguas profundas y 1/10 para las someras.
Escollera o rompeolas	Elementos de piedra o prefabricados cuya función es disipar la energía de la ola al incidir sobre la pendiente de la estructura o bien de reflejar esa onda.
Espigones	Se emplean para estabilizar una playa sujeta a avances y retrocesos intermitentes, para reducir el transporte litoral al reorientar un tramo de línea de costa, para ampliar la playa atrapando material litoral o para prevenir la pérdida del material.
Evaporímetro	Instrumento para medir la evaporación.
Fetch	Tamaño de la zona donde se genera la ola debido a la acción del viento.
Flechas	Depósitos que se forman en puntos extremos de playas o discontinuidades de la costa cuando existe un gran transporte litoral y las aguas son someras o poco profundas.
Frecuencia de la ola	Es el recíproco de su período.
Fuerza Centrípetra	Fuerza debida a la curvatura terrestre.
Fuerza de Coriolis	Fuerza resultante de la rotación de la tierra sobre su eje con velocidad angular.
Fuerza de Presión	Provocada por la diferencia de temperaturas, su dirección es de zonas de alta presión a zonas de baja presión.
Higrómetro	Cabello humano desengrasado para medir la humedad.
Isobaras	Curvas de igual presión atmosférica (trazadas con 3,4 y 5 milibares de separación).
Línea batimétrica	Contornos del fondo.
Limnógrafo	Instrumento que registra las variaciones del nivel del agua (mareas).

Litoral	Abarca la playa o costa y se extiende a la región cubierta permanentemente por las aguas hasta la zona donde el transporte de sedimentos debido al oleaje es menos activo, es decir hasta una zona de 20 m. de prof. aprox.
Longitud de la ola	Distancia horizontal entre dos crestas o valles consecutivos.
Métodos de predicción del oleaje.	Sverdrup-Munk-Bretchsneider (SMB) y Pierson, Newmann y James (PNJ).
Métodos para construir diagramas de refracción	Método de los frentes de onda y el de rayos u ortogonales.
Mapa Sinóptico (mapas de superficie)	Elaborado en base a datos climatológicos, observados simultáneamente en diferentes puntos y muestra curvas isobaras.
Marea	Onda de período largo generada por la atracción del sol o la luna, con períodos aprox. de 12 y 24 hrs.
Marea astronómica	Bajamar y pleamar.
Mareas muerta	Ocurren en el primer y tercer cuarto de luna y son de pequeña amplitud.
Mareas vivas	Producidas por el sol o la luna nueva y luna llena, tienen una amplitud mayor que ninguna otra.
Mareografos	Instrumento que registra las variaciones del nivel del agua (mareas).
Milla náutica	Unidad de longitud mas frecuente para expresar medidas = 1.852 km.
Nivel estático o de reposo	Nivel de la superficie del agua antes que pase la onda, es el nivel de la superficie sin ondas. A la distancia entre este nivel y el medio de la onda, se designa como D_y .
Nivel medio de la onda	Nivel que establece que el area de la cresta arriba de este (nivel) sea igual al area del valle bajo ese mismo nivel. En la teoría de Airy (onda senoidal, amplitud pequeña) coincide con el nivel de reposo.
Nudo (knot)	Unidad de velocidad igual a una milla náutica por hora, la velocidad del viento o la celeridad de la onda generalmente se expresa con esta unidad.
Ola significativa	Altura de la ola promedio del tercio de las olas mas altas que hay en una observación.
Oleaje real	Se forma al soplar el viento sobre la superficie del mar.
Onda (ola)	Ondulación de la superficie de un líquido.

Onda de oscilación	Los desplazamientos de las partículas siguen trayectorias cerradas o casi cerradas.
Onda de traslación	Al pasar la onda las partículas se mueven en todo momento en la dirección del avance de ésta.
Onda en aguas intermedias	Onda progresiva donde $d < 0.5 L$.
Onda en aguas someras	Onda progresiva donde $d \leq 0.05 L$.
Onda estacionaria	Cuando se sobreponen dos ondas progresivas idénticas que se desplazan en sentido contrario.
Onda progresiva	La cresta se desplaza horizontalmente.
Onda solitaria	Onda progresiva que se desplaza prácticamente sobre la superficie del agua en reposo, no presenta valle, no es periódica y no tiene definida una longitud de onda.
Ortogonal	Cualquier línea perpendicular al frente de la onda y por tanto paralela a la dirección de propagación de la onda.
Período de la ola	Tiempo que transcurre para que pasen dos crestas o valles consecutivos por la misma sección.
Período significativo	Promedio de los períodos comprendidos del tercio de las olas mas altas que hay en una observación.
Playa	Costa formada por material suelto, no consolidado.
Pleamar	El diario ascenso del nivel del mar.
Pluviómetro y Pluviógrafo	Instrumento para medir la precipitación.
Propagación	Término utilizado para describir el paso de una onda a través de la superficie del líquido.
Reflexión	Cuando un oleaje no rompiente incide sobre una estructura no hay impacto y por ello una parte de la energía es reflejada y la otra se transmite al interior de la estructura si es permeable.
Refracción	Distorsión en los frentes de onda debido a cambios en profundidad en aguas someras.
Rompiente	Al desplazarse las ondas de aguas profundas a someras disminuyen su longitud e incrementan su altura; la pendiente de la onda aumenta y finalmente rompe a una cierta profundidad.
Rompiente	Es la zona a lo largo del litoral donde las olas rompen por primera vez

Rompiente colapsante (Collapsing)	Es una condición extrema de la rompiente ondulante.
Rompiente continua (Spilling)	Cuando una onda se aproxima a la costa sobre un fondo con pendiente muy suave y ondas con esbeltez muy grande.
Rompiente ondulante (Surging)	Ocurre cuando la playa tiene pendiente grande
Rompiente rodante (Plunging)	Ocurre para condiciones intermedias de pendiente del fondo y esbeltez de la onda.
Rosa de los vientos	Esquema que define los puntos cardinales.
Sea	Ondas formadas por el viento.
Sedimento	Material no consolidado que forma la playa.
Seiches	Onda estacionaria formadas por ondas de período largo.
Sicrómetro	Instrumento para medir la humedad.
Swell	Olas en la zona de decaimiento que se trasladan libremente y están libres de la acción del viento.
Tómbolos	Una isla u obstáculo difracta a la ola, esto hace que disminuya el transporte litoral y las partículas se sedimentan. Este depósito aumenta hasta que se une a la isla separando en dos la playa inicial.
Trampas de arena	Dispositivos mediante los cuales se extraen muestras representativas de material en suspensión y de fondo sin alterar las condiciones existentes.
Transmarea	Generada por la atracción del sol o la luna, ondas de período muy largo > 24 hrs.
Transporte litoral	Se produce por efecto de las corrientes litorales, y por la acción directa del oleaje que al poner en suspensión las partículas facilita su desplazamiento dentro del seno de las corrientes.
Trazadores	Partículas de arena de la playa en estudio las cuales se han marcado con pintura o con radioactivantes.
Tren de olas	Conjunto de ondas cuyo período es constante, no así su altura.
Tsunami	Onda de período largo generada por deslizamientos submarinos de tierra debido a movimientos terrestres.
Valle de la ola	Punto donde el perfil de la onda tiene el nivel mas bajo.
Veleta	Instrumento que determina la dirección o sentido del viento.

Viento	El movimiento generado cuando las masas de aire son impulsadas por el efecto de los gradientes a que dan lugar las diferencias de presión entre dos puntos en la atmósfera.
Viento geostrófico	El viento que sopla en dirección paralela a las isobaras, cuando estas son rectas.
Viento real o formativo	Viento que sopla en el mar, para determinar su velocidad se utiliza el equilibrio entre 4 fuerzas, fuerza de presión, de coriolis, centripeta y de fricción.