

212  
2da.



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

# **Evolución Playera al Pie de Estructuras de Protección**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**ingeniero civil**

**p r e s e n t a :**

**MIGUEL ANGEL YAÑEZ MONROY**

MEXICO, D. F.

1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## I N D I C E

1. INTRODUCCION.	1
2. GENERALIDADES SOBRE PROCESOS COSTEROS.	4
2.1 Terminologia de las Costas.	4
2.2 Fenomeno del Transporte Litoral.	5
2.3 Formaciones Costeras.	9
2.4 Erosion y Acumulacion.	14
2.5 Fuente y Deposito.	16
2.6 Influencia de una Estructura Perpendicular a la Costa en el Desarrollo Morfologico Costero.	18
2.6.1 Barreras naturales y barreras artificiales.	18
2.6.2 Desarrollo costero posterior a la construccion de una estructura perpendicular a la costa.	18
2.7 Eleccion de la Alternativa mas Adecuada: Incremento de Escollera - Dragado de Material no Retenido.	22
3. CONCEPTOS TEORICOS DE LA INTERACCION MAR-PLAYA BAJO LA PRESENCIA DE UNA ESTRUCTURA DE PROTECCION.	24
3.1 Cuantificacion del Transporte Litoral.	25
3.1.1 Formula de Larras.	25
3.1.2 Formula del C.E.R.C.	28
3.2 Teoria de Pernald-Considere.	29
3.2.1 Deduccion de la ecuacion de Pernald-Considere.	29
3.2.2 Solucion de la ecuacion de Pernald-Considere. Caso de barrera total.	33
3.2.3 Solucion de la ecuacion de Pernald-Considere. Caso de barrera parcial.	37

3.3 Evaluacion de la Decision: Prolongacion de Escollera VS. Dragado Continuo.	44
4. DISEÑO DE UN ALGORITMO DE CALCULO PARA LA EVOLUCION DE LA PLAYA.	47
4.1 Metodologia de Calculo.	47
4.2 Diagrama de Flujo.	50
4.3 Programa para la Evolucion de la Playa.	55
5. APLICACION DEL ALGORITMO PROPUESTO A UN CASO PRACTICO.	61
5.1 Antecedentes.	61
5.2 Situacion Actual.	63
5.3 Determinacion del Transporte Litoral.	66
5.3.1 Condiciones equivalentes.	70
5.4 Determinacion de la Vida Util de la Estructura y Evolucion de la Playa para Distintos Tiempos.	73
5.5 Determinacion de la Longitud Adecuada.	89
5.6 Analisis de Costos sobre Prolongacion de Escollera VS. Dragado de Mantenimiento Anual.	91
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	100
7. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.	102
ANEXO 1	104

## 1. INTRODUCCION.

En Ingenieria Maritima, uno de los fenomenos mas dificiles de estudiar ha sido el del arrastre de sedimentos del fondo marino, inducido por el oleaje, que ocasiona lo que posteriormente denominaremos como transporte litoral. En el fenomeno intervienen una gran variedad de parametros, los cuales se presentan de diferente manera en cada zona costera. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, las características del oleaje (periodo, altura de ola y direccion), las características físicas del lugar (como batimetria de la zona, la existencia de la desembocadura de algun rio cercana al punto de interes, tamaño y densidad del material de la zona) y otros mas.

Sin embargo, el conocimiento al que se ha llegado a la fecha sobre el fenomeno, ha sido a traves de numerosas observaciones en campo del continuo cambio de las costas y en gran cantidad de experiencias obtenidas en modelos hidraulicos. Asi, quienes se han especializado en la materia y han participado en el estudio del transporte litoral, han obtenido diversas expresiones numericas que permiten valuar los volúmenes material que son arrastrados, pero cada una de ellas difieren en sus resultados ya que fueron desarrolladas para un caso en especial, a la vez de que es muy dificil incluir en tales expresiones todos los parametros que intervienen en tal fenomeno.

De la misma forma, con base en hipotesis sencillas, pero a su vez fundamentadas en la experiencia de quienes han estado relacionados con los procesos costeros, han surgido varias teorias que dan como resultado modelos matematicos que permiten conocer la evolucion de las costas bajo la presencia de estructuras de proteccion, entre las que se encuentran, los espigones, las escolleras y los rompeolas, o bien, obstaculos naturales como los promontorios rocosos. Entre estas y como base de posteriores teorias que se desarrollaron, se encuentra la teoria de Pernald-Considerere, la cual es una teoria de tipo lineal que permite conocer la configuracion de la playa con el transcurso del tiempo, en la que se construye una estructura de proteccion perpendicular a ella. El analisis y aplicacion de dicha teoria es el objeto de este trabajo.

El conocimiento de la teoria de Pernald-Considere es de vital importancia, ya que la mayoria de las estructuras de proteccion tienden a ser perpendiculares a la costa. Ademas, cuando se trata de un puerto ubicado en una costa, donde el transporte litoral es intenso, las estructuras de proteccion no solo tienen que funcionar como disipadoras de la energia del oleaje, sino que tambien deben bloquear el paso del material arrastrado por el transporte litoral, para mantener las profundidades adecuadas tanto en el canal de navegacion como en el interior del puerto. Por consiguiente, es por demas interesante saber por cuanto tiempo una estructura de proteccion, como son las escolleras o rompeolas, puede bloquear totalmente el paso de material transportado y en que momento deja de funcionar como una barrera total, que impide el transporte litoral; tambien sera interesante saber hasta donde una playa puede ganarle terreno al mar, o bien el mar erosionar a la playa. Por otra parte, cuando la estructura ha dejado de retener al sedimento transportado, debido a que se ha azolvado en toda su longitud, surge la inquietud por saber si seria conveniente prolongarla de manera que permita a la estructura seguir bloqueando el arrastre de material, o bien podria comenzarse a dragar aquel material que ya no es retenido y que se sedimenta en el interior del puerto. Todos estos aspectos son estudiados en este trabajo.

Asi pues, primeramente en el capitulo 2, con el fin de hacer una introduccion a los procesos costeros, se describe en forma general el fenomeno de arrastre de material provocado por el oleaje y se presenta la manera en que una estructura de proteccion, como son las escolleras, espigones y rompeolas, alteran el proceso natural de evolucion de una playa.

Con base en la ecuacion de continuidad y la de movimiento y bajo ciertas hipotesis, en el capitulo 3 se da a conocer la teoria de Pernald-Considere para determinar la evolucion de una playa bajo la presencia de una estructura de proteccion. A su vez, se presentan dos expresiones muy comunes para evaluar los volúmenes de material debidos al transporte litoral. Finalmente, se hace ver como con expresiones derivadas de la solucion de la ecuacion de Pernald-Considere, se puede llegar a determinar la vida util de una estructura de proteccion, y como decidir cuando prolongar su longitud una vez que a llegado al fin de su vida util.

En el capitulo 4, para calcular la evolucion playera se propone un algoritmo que, entre otras cosas, considera la manera en que la teoria expuesta en el capitulo 3 debe ajustarse a datos que describan fielmente el fenomeno real.

La aplicacion en forma conjunta de todos los conceptos teoricos descritos anteriormente, se hace al elegir como caso particular Puerto Madero, ubicado en el Estado de Chiapas, ya que tal puerto ha presentado grandes problemas de azolve debido al transporte litoral local, y a la vez se ajusta en gran parte a las condiciones en las que se desarrolla el modelo matematico de Pernald-Considere. Con base en

un analisis comparativo de costos de dragado contra los de construccion de escollera se analiza en forma general la posibilidad de incrementar la longitud de una de sus estructuras de proteccion, como medida para rehabilitar fisicamente al puerto. Todo esto se desarrolla en el capitulo 5.

Finalmente en el capitulo 6 se dan a conocer las conclusiones generales mas importantes del trabajo presentado.

## 2. GENERALIDADES SOBRE PROCESOS COSTEROS.

Debido a la constante accion del oleaje sobre las costas, en la naturaleza se presentan fenomenos relacionados con los procesos costeros, cuyos efectos son necesarios de considerar cuando se piensa construir una estructura perpendicular a la linea de costa. Entre estos fenomenos se encuentra la forma de evolucion de la costa despues de que se ha construido una estructura, y los problemas a los que se enfrenta el Ingeniero Civil, cuando este elemento estructural tiene como finalidad dar proteccion y abrigo, como es el caso de un rompeolas o escollera, el cual se ha saturado del sedimento que transportan las corrientes del mar.

Para comprender los procesos de desarrollo de una costa una vez modificadas las condiciones de la misma, es indispensable conocer el fenomeno de transporte litoral y las formaciones costeras que son producidas, asi como los procesos de erosion y acumulacion, y los conceptos de fuente y deposito. Todos ellos se describiran mas adelante, planteando primeramente una terminologia basica que proporcione el lenguaje comunmente utilizado en dichos problemas.

### 2.1 Terminologia de las Costas.

La costa se define como la franja de tierra en la que incide un cuerpo de agua y que esta expuesta a la accion de la mareas y del oleaje.

Una costa de material no consolidado se le conoce generalmente como playa. Algunos autores llaman a la costa como la frontera que separa el agua de la tierra. Si se trata de aguas dulces se le denomina ribera; si la parte terrestre es constituida por arena se define como playa; y si existe un manto rocoso se le llama acantilado.

Por otro lado las playas se encuentran en continuo cambio y en el mejor de los casos, bajo un equilibrio dinamico, con sedimentos



moviéndose hacia el mar y regresando hacia la orilla. Con lo anterior es posible definir una nomenclatura asociada a un perfil playero, como se muestra en la Fig. 2.1.

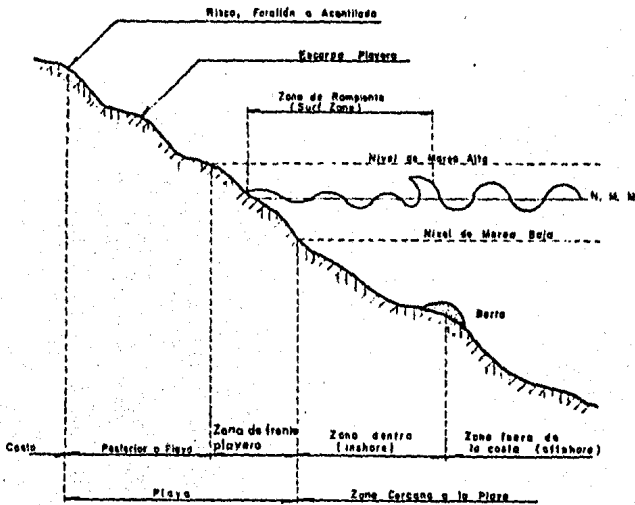


Fig. 2.1 Terminología de un perfil playero.

## 2.2 Fenomeno de Transporte Litoral.

El transporte litoral es el movimiento de material sedimentario que se presenta en el litoral, provocado por la acción del oleaje y las corrientes. El litoral se extiende desde la línea de costa, formada por la intersección del plano del agua y el de la playa, hasta una distancia posterior a la línea de rompientes, en que el fondo deja de ser agitado por las olas. Al material que es movido por el transporte litoral, se le denomina arrastre litoral.

El transporte litoral es clasificado de dos maneras, una se conoce como transporte costa dentro-costa fuera (onshore-offshore transport) y la otra es el transporte a lo largo de la costa (longshore transport). El primero tiene una dirección promedio perpendicular a la línea de costa y el segundo una dirección promedio paralela a la costa. En un instante dado, las partículas sedimentarias tienen ambas componentes de dirección de movimiento. En la zona fuera de la costa, el transporte costa dentro-costa fuera es más significativo, mientras que en la zona de rompientes (surf zone) ambos tipos de transporte son importantes.

Ademas, el transporte litoral se realiza de dos formas, una como transporte de fondo, en el cual, los granos de material se mueven rodando por el fondo, debido a un esfuerzo cortante producido por el agua en movimiento sobre la capa sedimentada, y la otra como el transporte en suspension, en el que los granos han sido levantados del fondo, debido a la turbulencia y al poco peso de los mismos.

Ambas formas de transporte se presentan al mismo tiempo, sin embargo es dificil distinguir donde termina el transporte de fondo y donde comienza el transporte en suspension, por lo que es mas practico identificar dos zonas de transporte con base en la manera como el agua del mar presenta su movimiento que a la vez mueve el sedimento. Asi pues, se tiene que en la zona fuera de la costa, el transporte es iniciado por el movimiento inducido del oleaje sobre los rizos (ripples) que anteriormente se han formado en el fondo, y la zona de rompientes, la cual es parte de la zona dentro de la costa donde el transporte neto de sedimento es el resultado de dos procesos, uno que corresponde al movimiento periodico del agua inducido por las olas y el otro son las corrientes superpuestas (generalmente debiles).

En la zona fuera de la costa, las olas viajan hacia aguas poco profundas, donde el movimiento del agua comienza a afectar al del sedimento en el fondo. Al principio, solo el material de baja densidad como son por ejemplo, el plancton, alguna materia organica y material muy fino, se mueven oscilando hacia atras y hacia adelante con las olas formandose rizos en el fondo paralelos a las crestas de las olas. Como la profundidad va disminuyendo, el movimiento del agua sobre el fondo va siendo cada vez mayor, produciendo un esfuerzo cortante que llega a exceder al de movimiento de las particulas de sedimento. La arena se mueve de una cresta a otra de los rizos con el paso de cada ola.

Como la velocidad del agua hacia la costa asociada con la cresta de la ola disminuye, el material comienza a invertir su direccion de movimiento sobre un rizo provocando una nube de arena que brota hacia arriba por la parte de la cresta del rizo que da hacia tierra. Esta nube se dirige hacia el mar, al pasar un valle. La aproximacion de la siguiente cresta invierte la direccion de la arena en suspension. Asi mismo, el flujo hacia tierra tambien arrastra material hacia la costa como material de fondo. El proceso anterior se muestra en la Fig. 2.2.

Para un perfil en la zona cercana a la playa el cual esta en equilibrio, lo cual quiere decir que no existe ninguna erosion o acumulacion netas, el valor promedio de arena la cual es llevada de un punto en el fondo debe ser balanceado por el valor promedio de arena adicionada. Cualquier cambio neto sera determinado por las corrientes residuales cercanas al fondo las cuales tambien transportan sedimento. Estas incluyen corrientes a lo largo de la costa y corrientes de transporte de masa con direccion hacia costa dentro-costa fuera. Es posible tener formas de rizos con material moviendose hacia la costa, mientras las corrientes residuales llevan nubes de sedimento sobre los rizos en una direccion neta en la zona fuera de la costa.



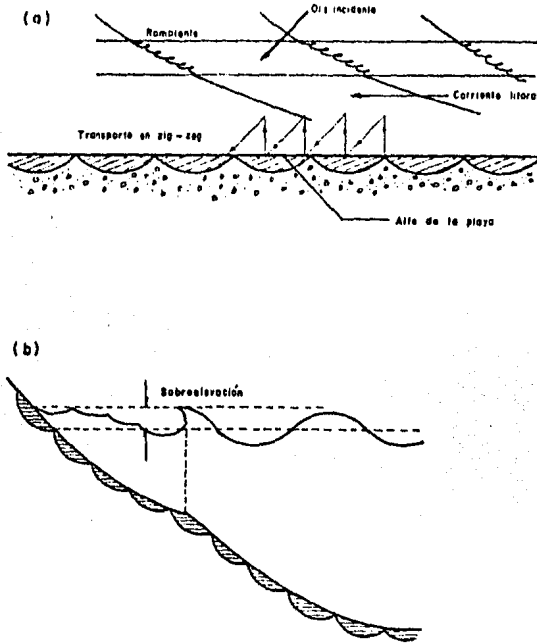


Fig. 2.3 Desarrollo del transporte litoral en la zona de rompientes.

Como se menciona, en la zona de rompientes los dos tipos de transporte litoral, tanto el transporte costa dentro-costa fuera, como el transporte a lo largo de la costa son notables, sin embargo el transporte a lo largo de la costa es mas importante para los problemas portuarios.

Asi pues, la direccion del transporte a lo largo de la costa esta relacionado directamente con la direccion del oleaje que se aproxima y con el angulo que los frentes de las olas forman con la linea de costa, ya que comunmente el oleaje no incide en forma perpendicular a la costa (ver Fig. 2.4). De este modo, debido a la variabilidad del oleaje que se acerca, la direccion del transporte a lo largo de la costa puede variar de una temporada a otra, dia a dia, o bien hora con hora.

El valor del transporte a lo largo de la costa depende del angulo de incidencia del oleaje y de la energia del oleaje. Por consiguiente, las olas altas de tormentas generalmente moveran mas material por unidad de tiempo que las bajas. Sin embargo, si las olas bajas actuan durante un tiempo mayor que el de las olas altas, ellas pueden llegar a ser mas significativas en cuanto a movimiento de arena que el de las olas altas.



Fig. 2.4 El oleaje que rompe en un angulo con la playa genera las corrientes a lo largo de la costa, causantes del transporte a lo largo de la costa.

En el siguiente capitulo, se presentan dos criterios para cuantificar el transporte a lo largo de la costa, que junto con otros criterios no descritos aqui, difieren entre si, debido a la dificultad que se tiene para tomar en cuenta, todos los aspectos que estan involucrados en un fenomeno tan complejo como es el transporte litoral.

### 2.3 Formaciones Costeras.

El arrastre de sedimentos debido al transporte litoral, es un movimiento natural que puede mantenerse mientras no exista algun elemento que lo modifique. Asi, por ejemplo, los sedimentos que llegan al litoral se pueden depositar cuando se encuentran en zonas bajas o frente a formaciones rocosas. Dependiendo de las características físicas del sedimento, de la energía y dirección del oleaje, y de las corrientes producidas por el oleaje y las mareas, se pueden presentar las siguientes formaciones: playas, flechas, barreras, tombolos, playas triangulares (cusplate), barras y bajos.

Fuera de los dos últimos tipos de formaciones, el resto de ellas, es

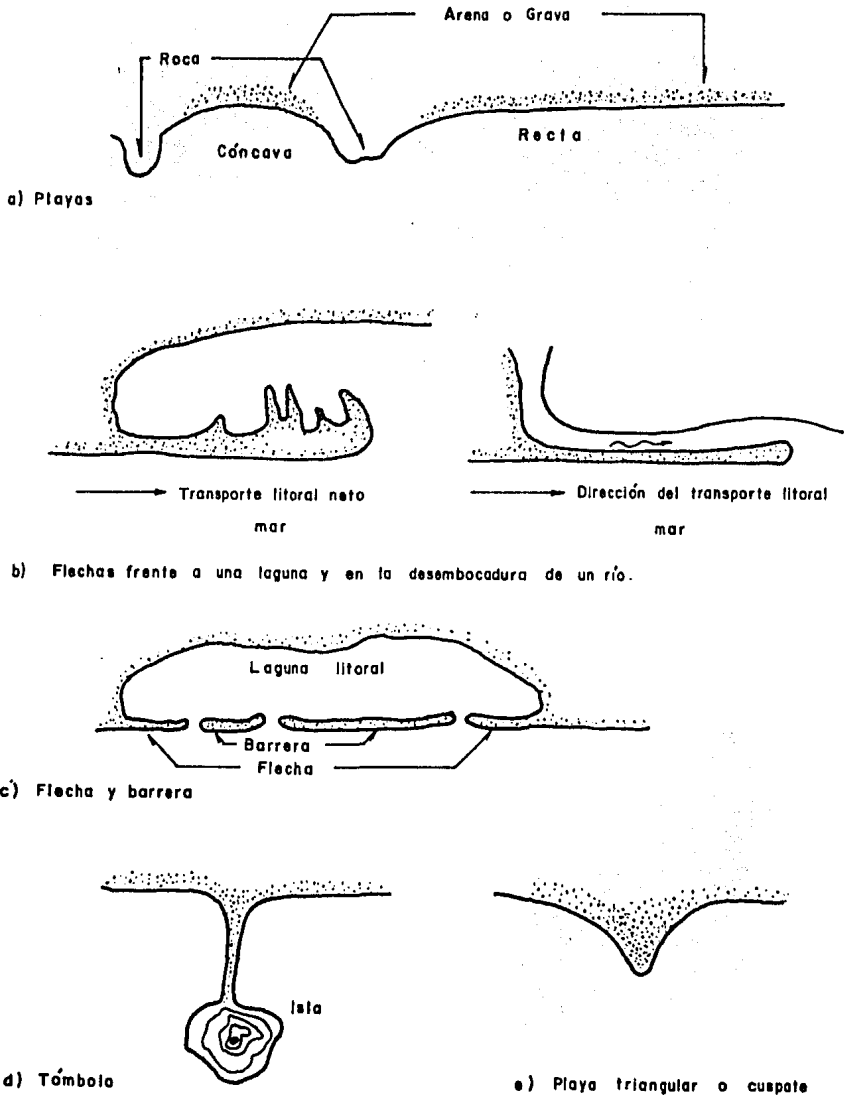


Fig. 2.5 Formaciones litorales

posible observarlas a simple vista ya que los depositos de material quedan permanentemente sobre la superficie de agua, como se muestra en la Fig. 2.5.

#### Playas.

Generalmente son rectas o tienen una curvatura concava hacia el mar. Esa geometria depende del oleaje, sobre todo de la direccion de que procede, de la refraccion que sufre al acercarse a la costa y de las corrientes que genera cuando no incide normal a la linea de costa.

#### Flechas.

Son depositos que se forman en puntos extremos de playas o discontinuidades de la costa, cuando existe un transporte litoral muy fuerte y las aguas son poco profundas. Se originan tambien en la entrada de lagunas y desembocaduras de rios, aunque estas ultimas solo en epocas de estiaje, y llegan a prolongarse hasta unirse a la otra orilla y pueden cerrar la desembocadura, cuando el rio tiene un gasto casi nulo (Fig. 2.6).

La direccion de avance de la flecha indica la direccion neta que lleva el transporte litoral.

Otros agentes como mareas, vientos y vegetacion, aparte de los sedimentos que lleven arroyos cercanos que descargan atras de las flechas, pueden hacer que estas aumenten en altura, y se ensanchen o simplemente se estabilicen. Si las flechas son muy largas, se pueden romper durante una tormenta para volverse a cerrar posteriormente.

#### Barreras.

Son depositos de material muy semejante a las flechas que se presentan frente a las lagunas costeras, pero que no se unen a tierra firme; es decir, en ambos extremos se tiene una boca o comunicacion entre la laguna y el mar.

Su formacion inicial es como la de una flecha que forma una sola boca en el extremo. Posteriormente en una tormenta se rompe la flecha y se forma una segunda boca y permanece como barrera si las bocas son estables. Puede presentarse el caso en que el transporte litoral es muy intenso y las corrientes en el canal sean de velocidad muy baja, por lo que se formara de nuevo una flecha. La franja sobre el agua o descubierta de las flechas y barreras se le denomina cordón litoral. Un caso real se puede observar en la Fig. 2.7

En el inciso 2.6 se vera otro concepto para Ingenieria Portuaria relacionado con problemas de sedimentacion, y se observara que las formaciones costeras aqui descritas, son parte de lo que se denominara como barreras naturales.



Fig. 2.6 Flecha formada en la desembocadura de un rio.

**Tombolos.**

Es un istmo formado por material granular transportado por el oleaje, que se desarrolla desde la costa y se dirige a una isla u obstaculo frente a ella, al cual generalmente se llega a unir. Inicialmente tiene forma triangular para despues asemejarse a una flecha, dependiendo de las direcciones del oleaje, ancho de la isla y de su



Fig. 2.7 Barrera y barra con forma de luneta.



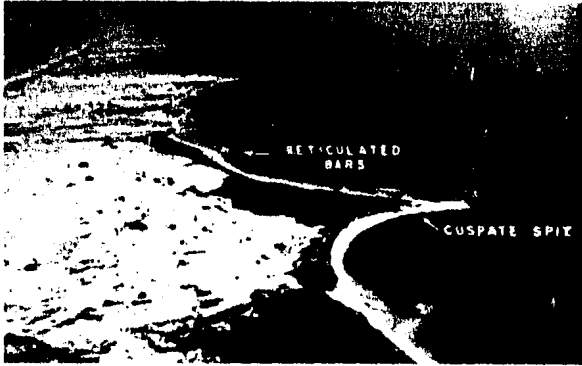


Fig. 2.8 Playa triangular.



Fig. 2.9 Tombolo natural.

separacion de la costa. La Fig 2.9 muestra un tombolo natural.

A veces con objeto de proteger y conservar las playas se construyen espigones separados de las costas, paralelos a ellas o con un cierto angulo de inclinacion. Estas estructuras tambien propician la formacion de tombolos, como se ilustra en la Fig. 2.10, con lo que se aumenta el ancho y la longitud de la playa para la recreacion.

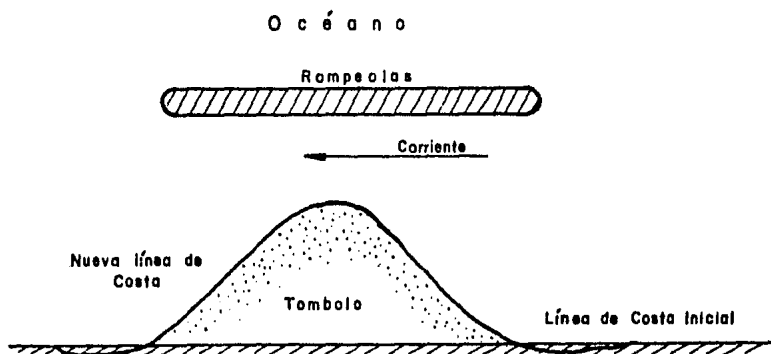


Fig. 2.10 Configuración de la costa bajo un Rompeolas paralelo a ella.

#### Playas Triangulares.

Son originadas por el encuentro en una zona de dos corrientes de dirección contraria, en la cual se deposita el sedimento arrastrado por ambas, con lo que se inicia la formación de una playa triangular, con su vertice dentro del mar mas o menos redondeado. Se parecen al tombolo en su fase inicial aunque nunca llegan a desarrollar la flecha, que en su parte final y cerca del obstaculo que lo forma es característica de un tombolo largo (Fig. 2.8).

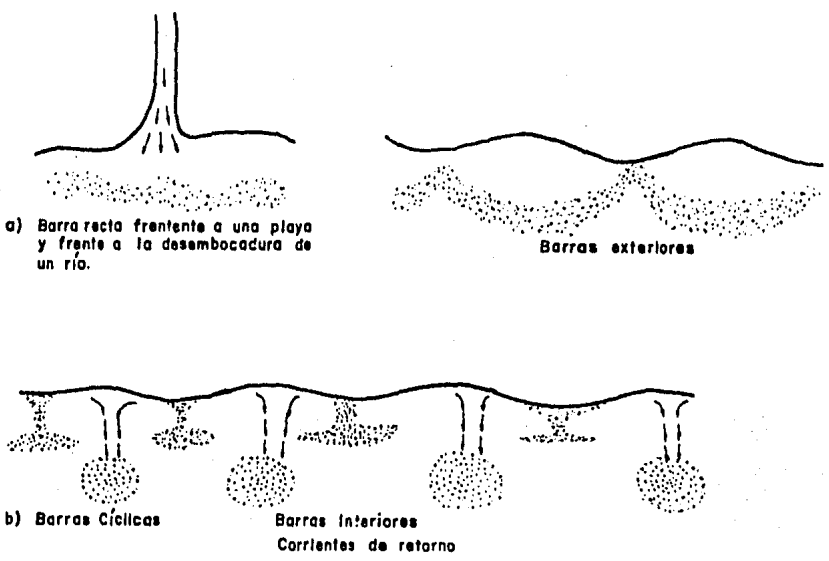
Se pueden formar por la presencia de grandes islas frente a la costa, aunque bastante separadas de ella, o bien por la batimetría del fondo.

#### Barras.

Son depositos 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 ellas puede ocurrir un transporte intenso de sedimentos. En la Fig. 2.11 se puede apreciar la forma que pueden adquirir esos depositos, los cuales siempre quedan debajo del nivel de marea baja.

**Bancos.**

Son acumulaciones de arena generalmente alejadas de la costa y bajo la superficie del agua. Se forman por condiciones locales de oleaje y corriente que transportan material de esas zonas para que no lo puedan mover de ahí fácilmente.



**Fig. 2.11 Representación esquemática de las barras.**

**2.4 Erosion y Acumulacion.**

Las olas son generadas por la transferencia de energía del viento al agua por medio de esfuerzos cortantes interfaciales, y estas actúan de manera dinámica sobre las costas, para causar tanto el fenómeno de erosión, como el de acumulación.

El fenómeno de erosión en una costa, es debido a que se tiene una mayor cantidad de material erosionado que la del depositado. Las costas pueden ser de dos tipos, rocosas y arenosas. En el primero no se tiene ningún problema de erosión. Sin embargo en las otras existe

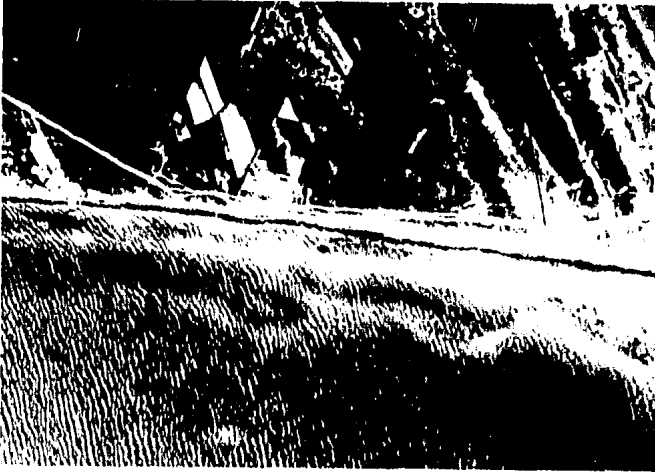


Fig 2.12 Movimiento de arena en el fondo de una playa (Skagen, Dinamarca).

constantemente un movimiento transicional de la linea de costa, por lo que se deben proteger contra la erosion.

Usualmente existen dos formas de erosion; una es la erosion natural la cual es provocada por fenomenos naturales como son, por ejemplo, las tormentas, mareas y elevaciones del nivel del mar; la segunda es la causada por la accion del hombre, resultado del diseno erroneo y la incorrecta localizacion de estructuras costeras, o bien por canales de entrada, o tambien por estrechos que comunican con bahias y lagunas. En ambas existe una modificacion del equilibrio natural entre el material que se pierde y el que se provee.

La erosion natural es un proceso comunmente geologico y climatologico, aunque tambien puede ser un proceso repentino originado por grandes tormentas y fuertes mareas, mostrando una apariencia de devastacion sobre la costa.

Este tipo de erosion provoca un retroceso en la linea de costa, que en promedio tiene algunos metros por ano (Fig 2.13), sin embargo grandes variaciones se pueden presentar debido a los cambios de la situacion climatologica de un momento dado.

La causada por el hombre es, un proceso de interferencia artificial sobre los procesos costeros naturales. Como ejemplo tenemos, la improvisacion de accesos por medio del dragado y de la construccion de escolleras y muros, asi como otras estructuras de proteccion costera, las cuales modifican el movimiento natural de sedimento a lo largo de

la costa.

El fenómeno de acumulación es contrario al de erosión y se origina cuando el depósito de material es mayor que el de erosión (ver Fig. 2.13). Las formas de equilibrio de una costa asociadas con la acumulación, pueden ser calculadas en base a suposiciones referentes a las hechas con respecto al movimiento de material y el de la configuración de equilibrio. Por otro lado las estructuras hechas por el hombre influyen considerablemente en la configuración de la costa. Todo esto se vera de manera detallada posteriormente, dado que este fenómeno es el que mas interesa para este caso.

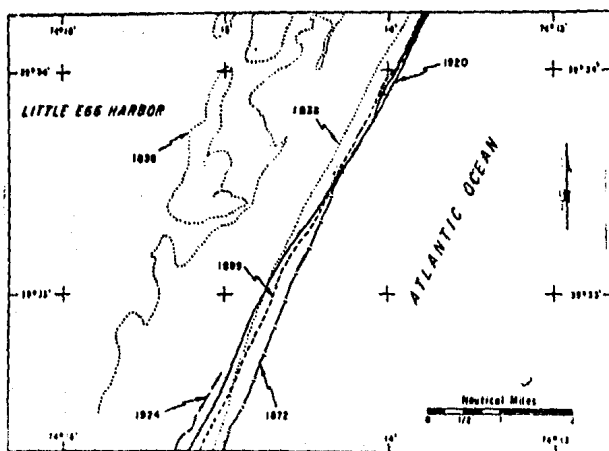


Fig. 2.13 Acumulación y erosión en una playa (Haven, New Jersey).

### 2.5 Fuente y Deposito.

Los problemas de transporte de sedimento de una costa y su relacion con las estructuras que el hombre realiza, pueden ser explicados de manera casi convencional y comunmente por medio de los terminos de fuente y deposito.

Una fuente de materiales es una zona costera sumergida, que libera materiales hacia otras areas costeras. Una fuente se presenta por ejemplo, en un area donde actua el fenomeno de erosión, en una barra en el mar, localizada en el lado de arrastre abajo de una escollera que se construye en algun acceso, en un rio que transporta material arenoso hacia la zona litoral; o por el arrastre de arena de las dunas sumergidas hacia la playa. Tambien queda comprendido dentro de lo que es una fuente, el abastecimiento artificial de material a una playa.

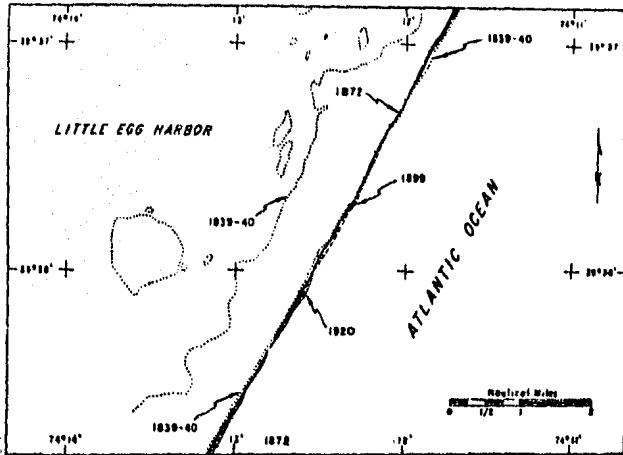


Fig. 2.14 Línea de costa estable (Peahala New Jersey).

Un depósito de materiales es una zona, donde los materiales son sedimentados. Dentro de los depósitos naturales se encuentran los cabos marinos de cualquier tipo, como son las formaciones rocosas, tombolos, playas triangulares redondeadas y pronunciadas, etc. Así mismo, un depósito puede ser una bahía, una entrada o acceso, o una barra formada en la desembocadura de un río. Ahora bien, como depósitos artificiales se encuentran las construcciones hechas por el hombre, como son las escolleras, espigones, trampas de arena, diseños y construcciones portuarias inadecuadas, etc.

En relación con estos dos conceptos, Per Brunn [1] propone dos reglas para aplicar en Ingeniería de Costas, lo cual está relacionado con la tecnología del transporte litoral.

- 1.- Una protección costera se debe construir, solo si esta funciona como depósito. Por lo tanto debe tenerse una fuente, pero no un depósito a distancia en el lado de arrastre arriba, ya que si existe un depósito, dicha protección no funcionaría adecuadamente al no tener quien le proporcione el material, a menos que exista un abastecimiento artificial en la costa.
- 2.- Un puerto (o una entrada improvisada), que se encuentra en una zona donde el transporte litoral es significativo, no debe actuar como un depósito. Es deseable por lo tanto, no tener ningún área de fuente, o bien solo una área limitada en el lado de arrastre arriba, o también en el lado de arrastre abajo. Es mejor si la entrada o acceso tiene un depósito en el lado de arrastre abajo o bien en ambos lados.

Así, si estas reglas se tienen siempre presentes en la planeación de puertos y costas con arrastre litoral, se pueden evitar muchos problemas de sedimentación.

## 2.6 Influencia de una Estructura Perpendicular a la Costa en el Desarrollo Morfológico Costero.

### 2.6.1 Barreras naturales y barreras artificiales.

Como se ha visto anteriormente, en la zona litoral existe un movimiento constante de sedimento, que provoca que en la línea de costa, también exista un movimiento, pero dentro de él no varía la forma geométrica de dicha línea, con lo que se tiene una forma de equilibrio. Esto se puede ejemplificar con un círculo, en el cual se puede variar su diámetro y centro pero siempre permanece su forma de círculo. Así, la forma de una línea de costa, no varía mientras no exista algún elemento que modifique la naturaleza del movimiento de sedimento creando un problema de interferencia. Un elemento perturbador puede ser cualquier estructura formada por el arrastre litoral, como son las formaciones costeras, las cuales ya fueron descritas, o cualquier otra relacionada con el transporte litoral.

Por consiguiente, se puede definir a una estructura como "barrera litoral completa", si esta bloquea totalmente el transporte litoral en una costa, y una "barrera litoral parcial", solo bloquea parcialmente el transporte litoral.

Ahora bien, una "barrera natural" puede ser cualquier formación creada por algún proceso natural, como porciones de tierra dentro de aguas profundas las cuales pueden ser entre otras, formaciones rocosas. Además, se ha estudiado que existen tres zonas de movimiento de sedimento bien definidas: la playa y la zona de rompientes, una zona activa a una profundidad de alrededor de 10 m, y una zona intermedia, que se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 20 m. Los mecanismos de movimiento son distintos en cada zona, pero su movimiento en todas, existe. Los promontorios solo afectan al arrastre litoral en la zona activa definida en los 10 m de profundidad.

Por otra parte, las barreras artificiales son interferencias construidas por el hombre, ellas son los espigones y escolleras, los cuales pueden ser perpendiculares a la costa, o bien paralelos a esta. Ello da como resultado un desarrollo de la línea de costa similar al realizado de manera natural. A continuación se describe la manera en que una estructura perpendicular a la costa, como es el caso de una escollera, influye en el desarrollo de la línea de costa.

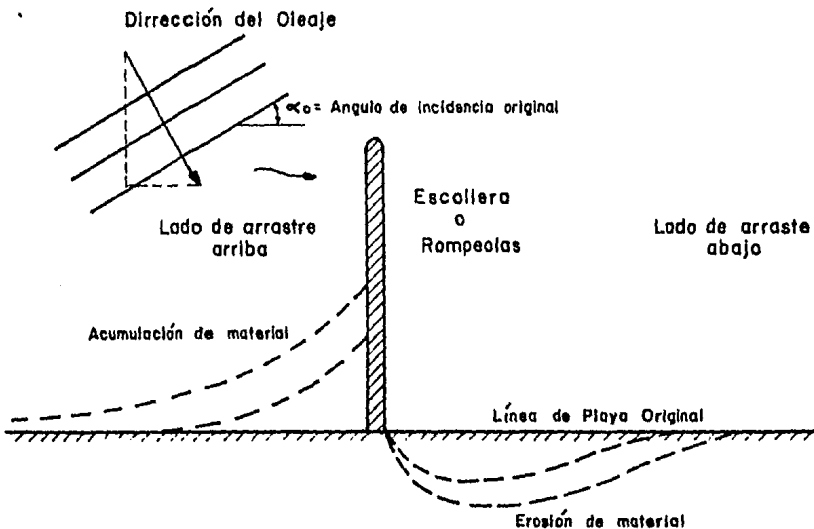
### 2.6.2 Desarrollo costero posterior a la construcción de una estructura perpendicular a la costa.

Muchas veces cuando se trata de la entrada a una bahía o a una laguna,

o bien cuando se tiene un canal de acceso a un puerto, es necesario mantener la entrada con una profundidad considerable, para que el tránsito de las embarcaciones se realice con libertad.

Como ya se sabe, el oleaje no siempre incide perpendicularmente a la costa, sino que por lo general llega con un cierto ángulo de incidencia, por lo que la componente de energía del oleaje que es paralela a la costa provoca un transporte litoral paralelo a ella. Si este transporte existe sobre alguna entrada o canal de acceso, cuando exista una corriente de flujo por marea hacia el interior de la bahía o puerto, creará una barra interna; así mismo, si la corriente es de reflujo y por consiguiente va hacia el mar, se formará una barra afuera de dicho acceso o entrada. Por lo tanto dichas barras formarán un impedimento al paso de algún tipo de embarcaciones.

Es por esto que es necesario construir una estructura que sea perpendicular a la costa, que provoque zonas de calma sobre el puerto y canal de acceso o entrada, y que a su vez impida el paso del transporte litoral paralelo a la costa, atrapando la arena que es transportada, por el lado de arrastre arriba. Esta estructura puede ser una escollera o rompeolas.

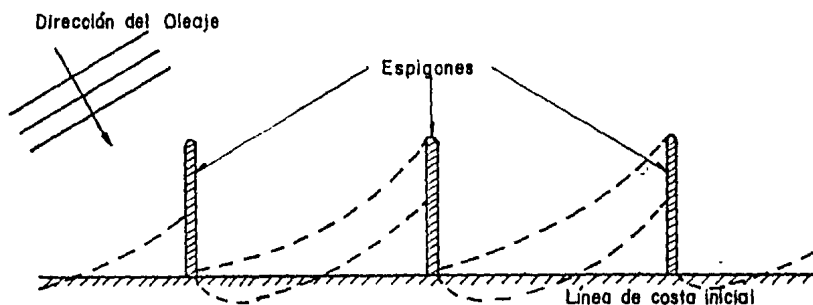


**Fig. 2.15 Efecto sobre el desarrollo morfológico costero de una estructura perpendicular a la costa.**



Ahora bien, si se tiene un elemento estructural cualquiera que sea perpendicular a la costa, en el lado de arrastre arriba se ira acumulando material, por lo que en dicho lado el elemento funcionara como deposito, cumpliendo asi, con la primera de las reglas recomendadas para una estructura de proteccion. Sin embargo, lo mas importante es observar que la acumulacion de material en el lado de arrastre arriba va a provocar un aumento, o mas bien, un movimiento de la linea de costa hacia el mar, y por el lado de arrastre abajo se originara una erosion que dara lugar a un retroceso de la linea de costa (Fig. 2.15).

Teoricamente el volumen de material acumulado por un lado, es igual al volumen de material erosionado por el otro, y el movimiento de la linea de costa hacia el mar, a su vez, hara que el angulo de incidencia del oleaje sobre la linea de costa sea cada vez menor, dando por consiguiente una disminucion del transporte litoral paralelo a la costa. El proceso de movimiento continuara hasta que se alcance una condicion de equilibrio en la cual, la linea de costa quede perpendicular a la direccion del oleaje, y donde el angulo de incidencia sea nulo y el transporte paralelo a la costa tambien lo sea.



**Fig. 2.16 Efecto sobre el desarrollo costero de un sistema de espigones en una playa.**

Por otro lado, en el lado de arrastre abajo, la erosion se puede disminuir al proporcionar artificialmente un abastecimiento de material, al bombear arena del lado de arrastre arriba, formando un sistema de "by-passing", o bien colocando otro obstaculo a una determinada distancia del primero, que provocara un nuevo crecimiento de la playa. Esto es lo que da lugar a un sistema de espigones que se coloca en una playa (Fig. 2.16). De otra manera, el crecimiento que se tiene de la playa en el lado de arrastre arriba, es similar al retroceso que se crea en el lado de arrastre abajo, y que si llega a ser significativo puede poner en peligro la estabilidad de la estructura de proteccion, al tener menos terreno de apoyo en la zona

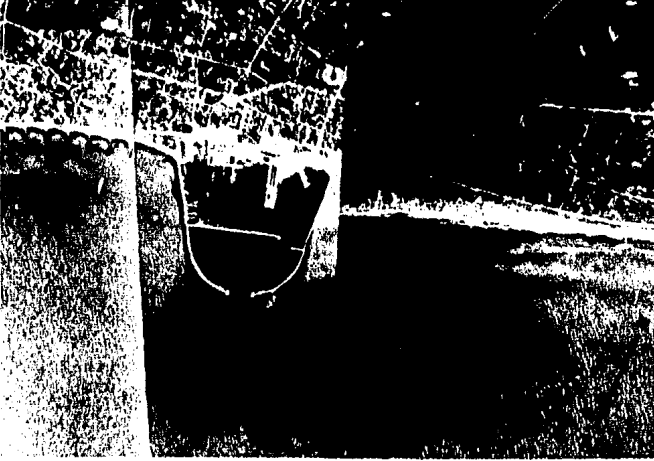


Fig. 2.17. Puerto de Skagen en Dinamarca (1930). Se puede observar el crecimiento de la playa en el lado derecho y erosion en el izquierdo, originando la construccion de espigones de proteccion.

de la playa, como se observa esquematicamente en la Fig. 2.16.

Volviendo al caso en que el elemento estructural es una escollera o rompeolas, un problema muy serio se puede presentar cuando la linea de costa en el lado de arrastre arriba (zona de acumulacion) ha alcanzado el extremo de la escollera y aun no se tiene una condicion de equilibrio. Para esta condicion, una porcion del gasto de sedimentos es detenida, pero otra parte rodea y pasa la estructura de proteccion, funcionando ahora como barrera parcial y disminuyendo la profundidad del canal de acceso o de la entrada. En cuanto a la linea de costa, solo crece hacia el lado de arrastre arriba, pero hacia el mar solo llega hasta una distancia igual a la longitud del rompeolas o escollera.

En esta ultima condicion de barrera parcial, el ingeniero se enfrenta a un nuevo problema de decision sobre si se deben prolongar las escolleras, todavia una longitud mayor hacia el mar, o bien, comenzar a dragar sobre la entrada o canal de acceso los volúmenes de material que estan pasando por el extremo de la estructura de proteccion.

## 2.7 Eleccion de la Alternativa mas Adecuada: Incremento de Escollera - Dragado de Material no Retenido

Cuando se ha tomado la decision de construir una obra maritima que va a requerir de una estructura de proteccion ya sea para protegerla de la accion de oleaje o del transporte litoral, o mas bien, de ambos, ademas de considerar las características estructurales y geometricas de tal estructura, surge la inquietud por determinar cual sera la longitud y orientacion adecuada de esta. Si bien es cierto que para encontrar la solucion, se requiere de obtener datos de campo como en laboratorio, tambien podemos auxiliarnos de modelos matematicos que bajo ciertas suposiciones nos permitan reproducir el proceso que en este caso nos interesa, la evolucion de la linea de costa. La veracidad de los resultados que el modelo arroje, dependeran en gran medida de la forma en que las suposiciones hechas, tomen en cuenta los aspectos que intervienen en el arrastre litoral, principal fenomeno que actua en dicho proceso.

En relacion con una estructura de proteccion, el tiempo que tarde en llenarse de sedimento, determinara la vida util de esta. Como se vera en el capitulo siguiente, con la teoria a utilizar, la vida util de una escollera dependera entre otras cosas de su longitud, por lo que si se fija un periodo de vida util para la estructura, se puede proceder a obtener una longitud adecuada.

El periodo de vida util a elegir, puede ser como en muchas otras obras civiles de 40 a 50 anos, o cualquiera, pensando en que esta puede llegar a durar mas con ciertos riesgos tomados en cuenta. Sin embargo, en fenomenos tan complejos como es el transporte litoral, la accion sobre una estructura puede ser en dado momento impredecible, pudiendo presentarse el caso en que por causas naturales (como son tormentas, fuertes corrientes) los gastos de sedimentos sean tan considerables que la escollera o rompeolas de interes, se sature de sedimento en su lado de arrastre arriba en un tiempo menor que el elegido.

Como se ha visto hasta ahora, cuando se construye una estructura de proteccion, la evolucion de la playa siempre se da buscando llegar a un equilibrio estatico, en el que ya no existiria un transporte litoral. Asi, durante el periodo de vida util de la estructura, se puede esperar que se llegue a ese equilibrio estatico. Pero en caso de que no se llegue a tal, la estructura comenzaria a funcionar, como barrera parcial permitiendo el paso de cierto volumen de material y y otra parte queda retenida. Este volumen que pasa por el extremo de la estructura de proteccion, va siendo cada vez mas considerable, hasta tener un gasto como el que originalmente se tenia en la zona donde anteriormente no existia la estructura de proteccion. Este proceso es logico, ya que si la playa no logro alcanzar una condicion de equilibrio antes de llegar al extremo del elemento de proteccion, tendera a regresar a sus condiciones iniciales. Lo anterior lleva a pensar que si la estructura de proteccion es una escollera o rompeolas en un puerto, esta se puede incrementar en su longitud para evitar durante un tiempo adicional el paso de material que se mueve paralelo

a la costa, y que en ese tiempo puede todavia la playa encontrar su condicion de equilibrio.

Para decidir que es lo mas adecuado, si dragar volumenes que son crecientes y tendientes a los que en un principio se tenian en la zona o construir una longitud de estructura adicional mar adentro, como punto de partida se necesitan determinar los costos de dragado anuales que por consiguiente son crecientes, o bien, los de inversion en una longitud mayor de estructura. Aquellos costos que sean menores daran la pauta para seleccionar la mejor alternativa. Es decir:

a)  $C_d > C_c$  ; Conviene construir.

b)  $C_d < C_c$  ; Conviene dragar.

donde:

$C_d$  costo anual de dragado.

$C_c$  costo anual de construccion y mantenimiento de estructura.

En un analisis como este, no se debe olvidar la posibilidad de construir la estructura de proteccion por etapas, que en situaciones economicas dificiles en las que los recursos economicos son escasos, puede ser muy ventajoso. Ademas, si se optase por dragar puede suceder que se decida el mantenimiento de las profundidades adecuadas para el canal de acceso y el puerto, lo cual podria repercutir en una disminucion en el tamano de embarcaciones que comunmente transitarian por el puerto, provocando serios problemas en el movimiento de carga por dicho puerto. Por otra parte, el problema de erosion en el lado de arrastre abajo del canal de navegacion puede crear serios problemas de inestabilidad a las estructuras de proteccion y a instalaciones cercanas a la costa y ubicadas en esta zona, al estar el mar ganando terreno sobre la costa. Por lo tanto, se puede pensar que en un analisis decisional sobre las dos alternativas planteadas al principio, debe de ir mas alla de una simple comparacion de costos, como la que aqui se plantea. Sin embargo, este trabajo pretende mostrar una aplicacion de una teoria matematica que puede servir de base para un estudio economico mas profundo de una situacion que es facil de presentarse en muchos puertos.

En el siguiente capitulo se presenta con mayor detalle la teoria matematica, que permite calcular la forma de la linea de costa, en un determinado tiempo posterior a la construccion de un obstaculo perpendicular a la costa y para una condicion de oleaje dada. A su vez este modelo incluye las dos condiciones de funcionamiento descritas, sobre el elemento estructural.

### 3. CONCEPTOS TEORICOS DE LA INTERACCION MAR-PLAYA BAJO LA PRESENCIA DE UNA ESTRUCTURA DE PROTECCION.

Para conocer lo que sucede con una costa una vez que se ha construido una estructura de proteccion, como son los rompeolas o escolleras y los espigones, uno puede hacer uso de varias aproximaciones.

Probablemente se podrian predecir los cambios que sufren las costas, si se conocieran con cierto grado de exactitud, entre otras cosas: los espectros de oleaje durante periodos de tiempo de un sitio; una formula capaz de cuantificar el transporte de arena en forma confiable; la interaccion entre el oleaje y las corrientes sobre el transporte de arena; y las relaciones entre el transporte costa dentro (onshore transport) y el transporte costa fuera (offshore transport). Desafortunadamente el estudio de este campo, aun se encuentra muy lejos de poder lograr todo esto.

Es por esto que surgen modelos matematicos sobre la forma de las costas, de los que apartir de la ecuacion de continuidad y de la ecuacion dinamica simplificada, se encuentran expresiones que permiten conocer la evolucion de la linea de costa en el transcurso del tiempo. Caso particular, es la ecuacion de Pernald-Considere.

En este capitulo, se plantean primeramente dos de los criterios mas usados, que de partida serviran para cuantificar el transporte litoral, sin que esto signifique que sean los mas adecuados. Bajo ciertas hipotesis se presenta la teoria de Pernald-Considere, que permite conocer la evolucion de la playa al pie de una estructura perpendicular a la linea de costa, en este caso el crecimiento para unas condiciones de oleaje dadas. Finalmente, se comenta la manera en que el Ingeniero decidira cuando debe incrementar la longitud de una estructura que se ha llenado de sedimento, y que esta funcionando como una barrera litoral parcial.

### 3.1 Cuantificación del Transporte Litoral

Se ha visto con anterioridad, que el oleaje se aproxima a la costa con un cierto ángulo de incidencia, lo cual provoca las corrientes a lo largo de la costa. También se mencionó que estas corrientes acarrearán los mayores volúmenes de material sobre la zona de rompientes, siendo por consiguiente las de mayor importancia en los problemas portuarios. Por lo tanto, si tenemos un observador en un punto de la costa, viendo hacia el mar, el movimiento del material solo puede ser en dos direcciones, hacia la derecha del observador y hacia su izquierda. Con lo anterior se pueden definir dos aspectos importantes.

El transporte litoral total,  $Q_t$ , se define como la suma de las cantidades de arrastre litoral transportadas hacia la derecha y hacia la izquierda en un punto sobre la línea de costa en un período de tiempo dado. Los subíndices (d) e (i) indicarán la dirección del transporte litoral.

$$Q_t = Q_d + Q_i \quad (3.1)$$

El transporte litoral neto,  $Q_n$ , es la diferencia entre las cantidades de arrastre litoral transportadas hacia la derecha y hacia la izquierda en un punto sobre la costa y en un período de tiempo dado.

$$Q_n = Q_d - Q_i \quad (3.2)$$

Los valores de  $Q_t$  y  $Q_n$  tienen diferentes usos ingenieriles; por ejemplo,  $Q_t$  es usado para predecir valores en profundidades someras en descargas incontroladas (rios);  $Q_n$  se aplica en el diseño de protecciones en bocas de comunicación o en canales de acceso y para predecir erosiones de la playa en costas abiertas.

En diversas partes del mundo los volúmenes de arena que el oleaje transporta paralelamente a la costa, y se ha encontrado que van desde algunas decenas de millares de metros cúbicos, hasta un millón de metros cúbicos por año en un mismo perfil.

#### 3.1.1 Fórmula de Larras.

En un principio todas las fórmulas para cuantificar los volúmenes de material que el transporte litoral provoca, son proporcionales a la energía del oleaje en aguas profundas, dada por

$$E = 1/8 \rho g L_o (H_o^2) \quad (3.3)$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua  
 $g$  valor de la aceleración de la gravedad  
 $H_o$  altura de ola en aguas profundas  
 $L_o$  longitud de ola en aguas profundas.

por medio de constantes resultado de experiencias en el laboratorio dicha proporcionalidad, estaba dada en fórmulas que eran del tipo

$$\begin{aligned}
 Q &= (\gamma A g (H_o)^2) \times (\gamma L_o) * (\gamma \text{sen } \alpha) \\
 Q &= (\gamma B g (H_o)^2) \times (\gamma L_o) * (\gamma \text{sen } 2\alpha) \\
 Q &= C g \times (\gamma (H_o)^2) L_o \text{sen } \alpha \\
 Q &= D K r g \times ((\gamma H_o)^2) L_o \text{sen } 2\alpha
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

donde Q volumen de arena que atraviesa en un año a través de un perfil perpendicular a la costa.

Kr coeficiente de refracción; es la relación entre la separación de dos ortogonales de los frentes de olas en la costa y en el límite de aguas profundas (mide la concentración de la energía del oleaje), en el punto de interés.

$\alpha$  ángulo de incidencia de los frentes del oleaje con la línea de costa en aguas profundas.

A, B, C, D son coeficientes que dependen de la experiencia y de experimentación realizada en un momento dado.

Las expresiones anteriores, tienen el problema de no ser ninguna de ellas homogéneas, y ninguna toma en cuenta las características del material transportado. Además, de numerosas observaciones se encontró que el gasto Q, toma un valor máximo cuando el ángulo de incidencia es  $= 50$  o  $60$ , lo cual no concuerda en las fórmulas con  $\text{sen } \alpha$  o  $\text{sen } 2\alpha$ .

Así pues, Larras [6], estudio el fenómeno sobre modelos reducidos y propuso la siguiente fórmula homogénea:

$$Q = K g (H_b)^2 T f(\alpha) \tag{3.5}$$

en la cual  $H_b$  altura de ola en rompientes.

T periodo del oleaje.

K una función adimensional, que depende de la esbeltez de la ola y de las características del material.

$f(\alpha)$  es una función adimensional del ángulo que toma en cuenta el efecto del oleaje en varias direcciones (Ref [6]).

La ecuación (3.5) es válida bajo las siguientes hipótesis:

- Se considera que la costa es estable.
- La costa es rectilínea e indefinida.
- La costa no tiene obstáculos.

Larras observó que el coeficiente K disminuye sensiblemente a la mitad, cuando la relación de esbeltez de las olas en aguas profundas se duplica. Al menos, este comportamiento se mantiene dentro de una frontera marcada por relaciones de esbeltez comprendidas entre 0.02 y 0.04 referidas a tempestades. Con lo anterior K se calcula con la siguiente expresión

$$K = K' L_o / H_o \tag{3.6}$$

donde  $L_0$  es la longitud de la ola en aguas profundas  
 $H_0$  es la altura de la ola en aguas profundas

y mediante gran numero de experiencias de laboratorio, se llego a que

$$K' = 1.18 (10^{-6}) (D50^{-1/2}) \quad (3.7)$$

donde D50 es el diametro medio del material dado en mm. La funcion  $f(\alpha)$  que representa el efecto del angulo de incidencia sobre el transporte se comporta como se ve en la Tabla 3.1.

$\alpha$ (grados)	$f(\alpha)$
0	0
10	0.30
20	0.57
30	0.70
40	0.83
50	0.98
60	0.70
70	0.28
90	0.90

Tabla 3.1 Valores de la funcion  $f(\alpha)$ .

En la tabla se observa que  $f(\alpha)$  es maximo entre los 50 y 55 grados, que es cuando el gasto  $Q$  es maximo, lo cual coincide con las observaciones hechas.

La funcion  $f(\alpha)$  se puede asemejar a la funcion  $\text{sen}(7\alpha/4)$  para angulos de incidencia inferiores a  $25^\circ$  que son los que mas frecuentemente se presentan en la practica. El comportamiento de la funcion  $\text{sen}(7\alpha/4)$  se muestra en la Tabla 3.2.

$\alpha$ (grados)	$\text{sen}(7\alpha/4)$
0	0
10	0.30
20	0.57
30	0.79

Tabla 3.2 Valores de la funcion  $\text{sen}(7\alpha/4)$ .

La altura de la ola en la linea de rompientes se evalua en terminos de la de aguas profundas afectada por el coeficiente de refraccion  $K_r$ .

Finalmente la expresion propuesta por Larras puede quedar escrita como



$$Q = 1.18(10^{-6}) (D50^{-1/2}) \frac{L_0}{H_0} g (Kr^2) (H_0^2) T \operatorname{sen} \frac{7}{4} \alpha \quad (3.8)$$

donde si todo lo referimos al Sistema Metrico Decimal, el valor de Q resulta en m<sup>3</sup>/s, no olvidando que D50 esta dado en mm. Esta expresion ha dado buenos resultados en modelos reducidos en los que se reproducen las condiciones en las cuales se tienen grandes transportes de material.

### 3.1.2 Formula del C.E.R.C.

La expresion obtenida por el C.E.R.C. (Coastal Engineering Research Center) esta basada en el flujo de energia, que por unidad de longitud de playa, en la direccion de avance esta dada por

$$P \cos \alpha = \frac{\rho g (H^2)}{8} C_g \cos \alpha \quad (3.9)$$

y la componente a lo largo de la costa es dada por

$$P_l = P \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha = \frac{\rho g (H^2)}{8} C_g \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha \quad (3.10)$$

donde si se considera que  $\cos \alpha \operatorname{sen} \alpha = 1/2 \operatorname{sen} 2\alpha$

$$P_l = \frac{\rho g}{16} (H^2) C_g \operatorname{sen} 2\alpha \quad (3.10a)$$

en la que  $\alpha$  es el angulo de las olas con la linea de playa.

$\rho, g, H$  son definidas igual que en la seccion anterior.

$C_g$  es la celeridad de grupo.

Cuando el calculo del transporte litoral se hace en la linea de rompientes,  $P_l$  se tiene que aproximar a condiciones en esta zona. Por lo que esas aproximaciones son mostradas como  $P_{ls}$  en la Tabla 3.3, evaluadas en (pies-lb/s por pie de playa). Por lo que, de acuerdo con los datos con los que se cuente, ya sea en aguas profundas o en la zona de rompientes,  $P_{ls}$  se calcula con las expresiones de dicha Tabla. Las bases de estas aproximaciones se pueden consultar en la referencia [4].

Por tanto la relacion entre Q y  $P_{ls}$  esta dada por:

$$Q = (7.5 \times 10^3) P_{ls} \quad (3.15)$$

donde Q esta en [Yd<sup>3</sup>/ano].

Ecuacion	Pls (ft-lbs/s/ft de playa)	Datos requeridos ft,seg unidades
3.11	$32.1 (Hr^{5/2}) \text{ sen } 2\alpha r$	$Hr, \alpha r$
3.12	$18.3 (Hr^{5/2}) (\cos \alpha_o^{1/4}) \text{ sen } 2\alpha_o$	$Ho, \alpha_o$
3.13	$20.5 T (Ho^2) \text{ sen } \alpha r \cos \alpha_o$	$T, Ho, \alpha_o, \alpha r$
3.14	$100.6 ((Hr^3)/T) \text{ sen } \alpha_o$	$T, Hb, \alpha_o$

Tabla 3.2 Formulas aproximadas para el calculo del flujo de energia , Pls, en la zona de rompientes.

Hasta aqui se han descrito dos criterios muy comunes utilizados en el calculo del transporte litoral. El utilizar uno u otro criterio, proporcionara resultados muy diferentes, asi como el emplear otras expresiones que existen actualmente. La razon de esta diferencia entre los valores, estriba en el hecho de que el fenomeno en si, no ha sido totalmente comprendido y aun le queda mucho por estudiar. Ademas, muchas veces los datos empleados son poco confiables, o no se ajustan a las condiciones bajo las cuales fueron obtenidas las diversas expresiones para cuantificar el transporte litoral. Pero aun asi, muchas veces es necesario evaluar los volúmenes que son acarreados en un punto dado, y no se cuenta con estudios y mediciones que se hayan hecho en el lugar de interes, y es cuando se recurre al empleo de tales expresiones.

### 3.2 Teoria de Pernald-Considere.

Como se menciona en el capitulo 2, cuando se construye una estructura predominantemente perpendicular a la costa, como son las escolleras, impide el movimiento constante de la arena paralelo a la costa, siendo este uno de los principales objetivos para los que es construida dicha estructura. Al bloquear el transporte de arena, se presenta un avance de la linea de costa hacia el mar, que va siendo mayor conforme pasa el tiempo.

#### 3.2.1 Deduccion de la ecuacion de Pernald-Considere.

Fue Pernald-Considere ([1], [6], [7], [8], [9], [10]) quien publico por primera vez un modelo matematico, que representaba el avance y configuracion de la linea de costa al pie de estructuras costeras, con el transcurso del tiempo. La teoria fue posteriormente ampliada a otras aplicaciones, como son, la configuracion de la playa bajo la presencia de un sistema de espigones y con variaciones de profundidad (Bakker W.T. [7] y [8]) sin embargo, en este trabajo no se contempla el tratado de tal ampliacion.

La obtencion de la ecuacion de Pernald-Considere se basa en las siguientes hipotesis:

- a) Siempre existe un perfil de equilibrio, por lo que solo es necesario considerar una línea de costa.
- b) La dirección del oleaje se mantiene constante, o bien existe una dirección predominante durante un periodo largo de tiempo.
- c) Excepto la corriente a lo largo de la costa, principal causante del transporte litoral, no se toma en cuenta otro tipo de corrientes, como son las inducidas por las mareas y otras.
- d) El ángulo de incidencia del oleaje es pequeño.
- e) Existe una relación lineal entre el ángulo de incidencia del oleaje y el transporte litoral.

Si el transporte litoral  $Q$ , se expresa en función del ángulo de incidencia  $\alpha$  y se desarrolla en serie de Taylor, se tiene que

$$Q = Q_0 + \frac{dQ}{d\alpha} (\alpha - \alpha_0) + \dots \quad (3.16)$$

donde  $Q_0$  es el transporte litoral inicial con la línea de costa inicial y  $\alpha_0$  es el ángulo de incidencia de las olas con la costa inicial y a una profundidad de interés, que se determinara posteriormente. Como el ángulo de incidencia es pequeño, su variación será

$$\frac{dy}{dx} = \text{arc tan } \frac{dy}{dx} \quad ; \quad \alpha \text{ pequeño}$$

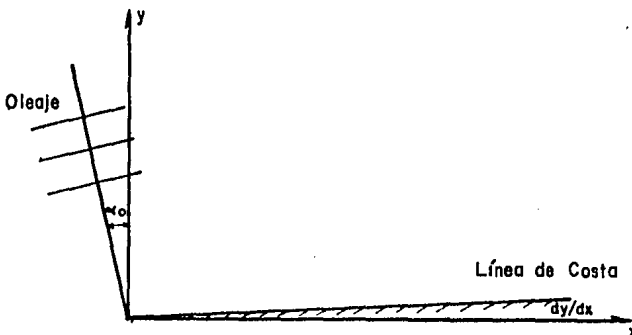


Fig. 3.1 Línea de costa teórica.

por lo tanto se puede expresar el nuevo angulo como:

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{dy}{dx} \tag{3.17}$$

Llevando (3.17) a (3.16) y linealizando terminos se llega a

$$Q = Q_0 - q \frac{dy}{dx} \tag{3.18}$$

en la que

$$q = \frac{dQ}{d\alpha} \tag{3.19}$$

la ecuacion (3.18) es la ecuacion de movimiento de una costa, donde existe acumulacion.

Si ademas, se toma en cuenta que la cantidad de sedimento depositado o removido en un lapso  $t$ , es  $D(dx)(dy)$ , donde  $D$  es la distancia vertical hasta donde el perfil playero se vuelve practicamente horizontal, y ademas, hasta donde se siente el movimiento de material.

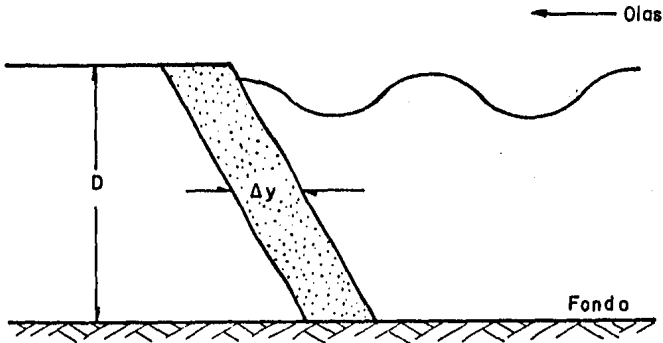


Fig. 3.2 Erosión o acumulación en un perfil de equilibrio.

Ahora bien, si se toma una porcion de playa muy pequeno  $dx$  (Fig. 3.3) y se aplica la ecuacion de continuidad, se tiene

$$(Q_0 + dQ) dt - Q_0 dt = -dy D dx dt \tag{3.20}$$

considerando la definicion de derivada total

$$dy = \frac{\partial y}{\partial t} dt \quad ; \quad dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (3.21)$$

sustituyendo en (3.20), (3.21) y simplificando, se llega a

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = - \frac{\partial y}{\partial t} D \quad (3.22)$$

o bien

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (3.23)$$

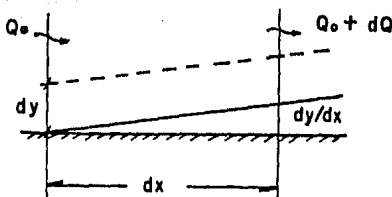


Fig. 3.3 Porción de la línea de playa en retroceso.

Si se evalúa el término  $\partial Q/\partial x$  para la ecuación (3.18) y se sustituye en (3.23), se puede llegar a

$$- q \frac{\partial y}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (3.24)$$

por último (3.23) se transforma en

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{q}{D} \frac{\partial y}{\partial x} \quad (3.25)$$

Si se toma la ecuación de Larras (ecuación (3.8)), para evaluar el transporte litoral  $Q$

$$Q = K \cdot g \cdot (Kr^2) \cdot (Ho^2) \cdot T \cdot \text{sen} \frac{7}{4} \alpha \quad (3.8)$$

$q$  de (3.19) se convierte en

$$q = \frac{7}{4} K g (Kr^2) (Ho^2) T \cos \frac{7}{4} \alpha \quad (3.26)$$

pero como  $\alpha$  es muy pequeño, según una de las hipótesis marcadas al principio, se puede considerar al término  $\cos(7\alpha/4) \approx 1$ , y la ecuación (3.24) se transforma en

$$\frac{\partial y}{\partial t} = a \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3.27)$$

donde

$$a = \frac{7 K g (Kr^2) (Ho^2) T}{4D} \quad (3.28)$$

Las variables que aparecen en la ecuación (3.28) fueron definidas en la sección anterior cuando se presentó la fórmula de Larras.

La ecuación (3.27) de derivadas parciales se le conoce como la ecuación de Pernald-Considerere y es similar a la ecuación de transmisión de calor en un extremo. Para su solución se requiere de condiciones iniciales y de frontera. La condición inicial se da por la forma de la costa en  $t=0$ . En cuanto a las condiciones de frontera, se necesitan dos, dadas por diferentes valores de transporte litoral en distintos lugares.

### 3.2.2 Solución de la ecuación de Pernald-Considerere. Caso de barrera total.

Cuando una estructura perpendicular a la playa se ha construido, esta comienza a llenarse de material en el lado de arrastre arriba y modifica la línea de costa, como se ve en la Fig. 3.4. El transporte litoral a lo largo de la costa es totalmente bloqueado por dicha estructura.

Para la solución de la ecuación (3.27), que describe la evolución de la línea de costa, se formulan las siguientes condiciones iniciales y de frontera:

- i)  $t = 0, y = 0 \quad ; \quad \forall x$
- ii)  $x = -\infty ; Q = Q_0 ; \forall t \quad (3.29)$
- iii)  $x = 0 ; Q = 0 ; \forall t > 0$

Recordando que la dependencia de  $Q$  con el ángulo  $\alpha$ , así como (3.17), se observa que la última condición de frontera implica que

$$x = 0 ; \frac{\partial y}{\partial x} = \alpha_0 ; t > 0 \quad (3.30)$$

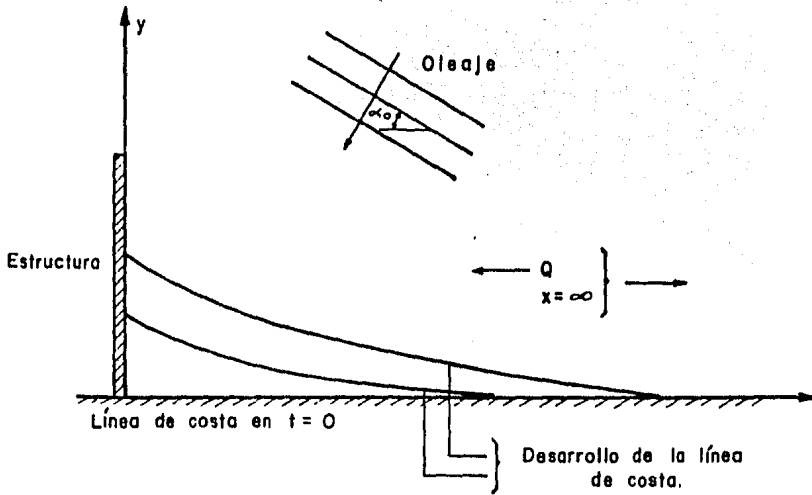


Fig. 3.4 Evolución de la playa cerca de la estructura de protección

lo que implica que la evolución de la línea de costa siempre finaliza en el rompeolas en un ángulo  $\alpha_0$  o bien en la tangente en ese punto (Fig. 3.5) es paralela a los frentes de oleaje.

La solución de la ecuación (3.27) es

$$y = \alpha_0 \sqrt{4at/\pi} \left[ e^{-u^2/4} - u \sqrt{\pi} \theta \right] \quad (3.31)$$

donde

$$u = x / \sqrt{4at} \quad (3.32)$$

$$\theta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-u^2/4} du \quad (3.33)$$

$x$ , es la distancia a lo largo de la playa (ver Fig. 3.5).

o también, si se sustituye el valor de  $\theta$  en en (3.31)

$$y = \alpha_0 \sqrt{4at/\pi} \left[ \sqrt{4at} e^{-((x^2)/(4at))} - 2x \int_u^\infty e^{-u^2/4} du \right] \quad (3.34)$$

La ecuación (3.34) define la línea de costa para un tiempo  $t$  fijo, en

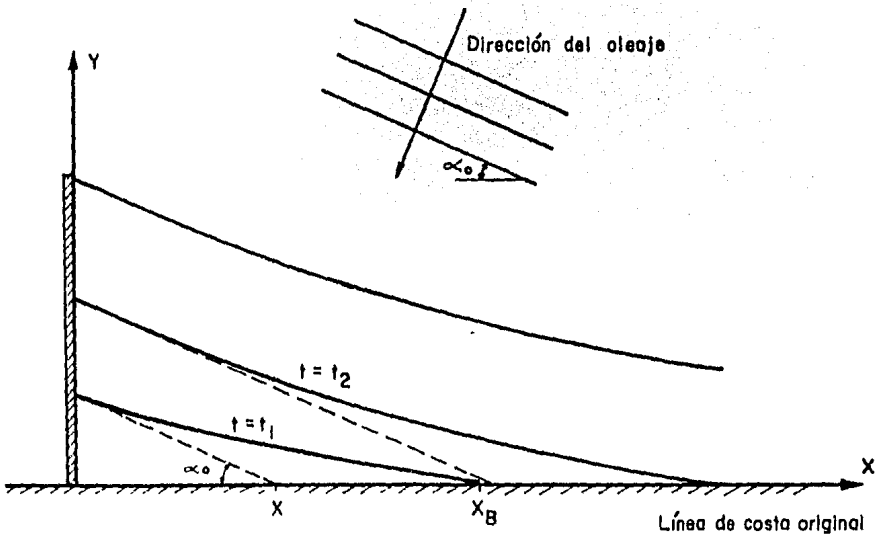


Fig. 3.5 Forma de la línea de costa para el caso de barrera total.

el que se hace variar la distancia sobre la línea de costa X. El valor de la integral indefinida en dicha expresión se puede determinar fácilmente, al tomar en cuenta que la función de Distribución de Probabilidad Normal (Fig. 3.6) está dada por

$$F(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-((z^2)/2)}}{\sqrt{2\pi}} dz \tag{3.35}$$

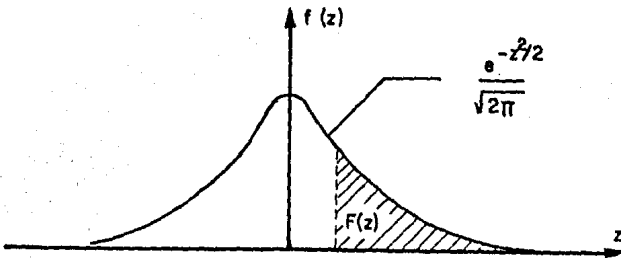


Fig. 3.6 Distribución Normal de probabilidad.



La cual es facil de encontrar en tablas. Por lo que si se hace el siguiente cambio de variables

$$u = \frac{z^2}{2} ; \quad u = z / \sqrt{2} \quad du = dz / \sqrt{2} \quad (3.36)$$

la integral indefinida se convierte en

$$\int_u^{\infty} \frac{e^{-(u^2)}}{u} du = \int_{\sqrt{2}u}^{\infty} \frac{e^{-((z^2)/2)}}{\sqrt{2}u} dz / \sqrt{2} \quad (3.37)$$

Por consiguiente F(z) se evalua en el limite dado por el valor  $\sqrt{2} u$  y el valor de dicha integral sera

$$\frac{e^{-(u^2)}}{u} du = \sqrt{2} F(z) ; \quad z = \sqrt{2} u \quad (3.38)$$

De esta manera se pueden encontrar valores de  $\theta$  en funcion de u, como se muestra en la Tabla 3.4.

El maximo avance de la linea de costa, se da en el rompeolas (ver Fig. 3.5) con X= 0 en (3.34), dando como resultado

$$\bar{OY} = \alpha_0 \sqrt{4at} / \sqrt{\pi} \quad (3.39)$$

u	$\theta$	$\frac{e^{-(u^2)}}{u \sqrt{\pi}} \theta$
0	1.00	1.00
0.10	0.875	0.8327
0.20	0.773	0.6852
0.30	0.6714	0.5569
0.40	0.5716	0.4469
0.50	0.4795	0.3538
0.60	0.3962	0.2764
0.70	0.3222	0.2128
0.80	0.2579	0.1616
0.90	0.2031	0.1209
1.00	0.1573	0.0890
1.25	0.0771	0.0338
1.50	0.0389	0.0153
1.75	0.0133	5.418 E-03
2.00	4.680 E-03	1.726 E-03
2.50	4.084 E-04	1.208 E-04
3.00	2.216 E-05	5.581 E-06
3.50	7.430 E-07	1.759 E-07
	0	0

Tabla 3.4 Parametros para la linea de costa en aumento.

a su vez del triangulo formado con la tangente a la linea de costa en el punto del rompeolas

$$\bar{O}X = \sqrt{4at} / II \quad (3.40)$$

dado que  $\alpha \approx \tan \alpha$ , lo cual no es tan falso en angulos hasta de 25°, que son los que comunmente se presentan en la realidad.

Por otra parte, si se toma un valor de 1.5 de la Tabla 3.4, da como resultado que

$$\bar{O}X = 2.65 \bar{O}X_B \quad (3.41)$$

si se vuelve a observar la ecuacion (3.24), significa que a esta distancia, su correspondiente ordenada es 1.53% de la ordenada maxima OY dada en (3.39), o bien que es un limite hasta donde se siente la acumulacion de material debido a la presencia del obstaculo estructural.

Ademas, el volumen de material acumulado, sera el area  $\bar{O}X_B Y$  multiplicada por la profundidad D, y puede ser obtenida a partir del triangulo  $\bar{O}X_B Y$  mostrado en la Fig. 3.5, ambas dadas por

$$\text{Area } \bar{O}X_B Y = 1/2 (\bar{O}X_B) (OY) = (2at/II) \quad (3.42)$$

$$\text{Area } \bar{O}X_B Y = (Qt) / D \quad (3.43)$$

donde si se recuerda la relacion lineal fijada entre Q y  $\alpha$ , entonces la constante a, tambien puede ser expresada como

$$a = \frac{Q}{\alpha D} \quad (3.44)$$

por ultimo

$$\frac{\text{Area } \bar{O}X_B Y}{\text{Area } \bar{O}X_B Y} = 1.57 \quad (3.45)$$

Lo cual significa que la cantidad de material acumulado puede ser calculada a partir del area del triangulo, ademas de los limites hasta donde se modifica la playa original.

### 3.2.2 Solucion de la ecuacion de Pernald-Considerere. Caso de barrera parcial.

Hasta ahora, se ha estudiado la funcion de una estructura perpendicular a la linea de costa, como una barrera total, que detiene el transporte litoral paralelo a la costa en su lado de arrastre arriba. Sin embargo existe un momento en que la evolucion de la costa

hacia mar adentro llega a una longitud sobre la estructura, que permite el paso de una parte del transporte litoral, hacia el lado de arrastre abajo, funcionando ahora como una barrera parcial de material arrastrado. La longitud referida, corresponde a una tal, que el perfil de la playa inmediatamente en el lado de arrastre arriba, alcanza una profundidad  $D_r$  en la punta de la estructura en que el oleaje rompe (ver Fig. 3.7), pues es en esta profundidad donde el transporte litoral es mucho mas significativo. La longitud  $L$ , se puede determinar si se conocen los taludes de la playa y del rompeolas en su extremo, asi como la profundidad  $D_r$ .

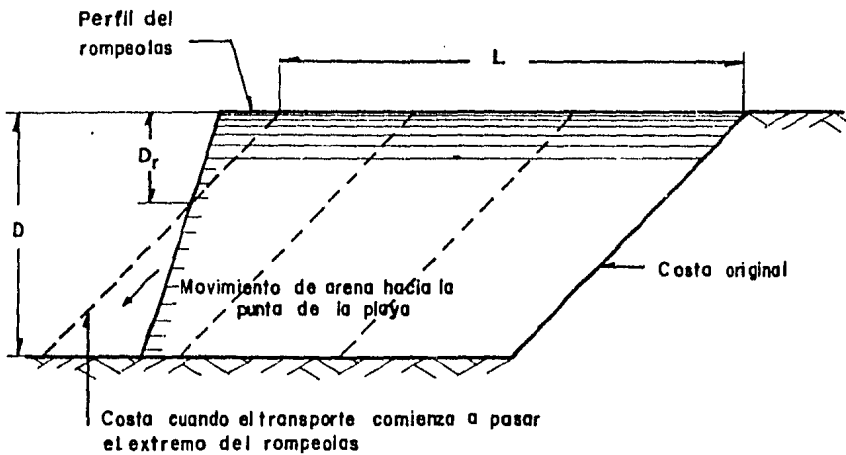


Fig. 3.7 Perfil de la playa inmediato al rompeolas en el comienzo del paso del material.

El tiempo en que la línea de costa alcanza la longitud  $L$  sobre el rompeolas, o sea el tiempo de llenado ( $t_{11}$ ) de este, se puede obtener a partir de (3.39) con  $OY = L$ , teniendo

$$t = \frac{L^2}{11 ((\kappa_0)^2) 4a} \quad (3.46)$$

A partir de este momento, la ecuación (3.31) y por consiguiente (3.34) no son validas, por lo que es necesario buscar una nueva solución para la ecuación expresada en derivadas parciales (3.27).

Ahora las nuevas condiciones de frontera son:

$$1) \quad x=0 \ ; \ y=L \ ; \ \forall t \geq t_{11}$$

ii)  $x = \infty$  ;  $Q = Q_0$  ;  $\forall t$

iii)  $x = \infty$  ;  $y = 0$  ;  $\forall t$

con lo que la nueva solución es

$$y = L \theta \tag{3.48}$$

o bien recordando el valor de  $\theta$  dado en la ecuación (3.33), la solución también puede estar dada como

$$y = \frac{2L}{\Gamma} \int_u^\infty e^{-(u^2)} du \tag{3.49}$$

El desarrollo de la línea playera ahora se extenderá a una distancia mayor sobre la línea original, como se ve en la Fig 3.8. De acuerdo con Bruun [1], y como se vio para el caso de barrera total, donde la ordenada de la línea de playa sea de 1.5% de la ordenada máxima  $L$ , el área del triángulo  $Ox_0y$  estará dada por

$$\text{Area } Ox_0y = \frac{1}{2} \sqrt{\Gamma} a t \tag{3.50}$$

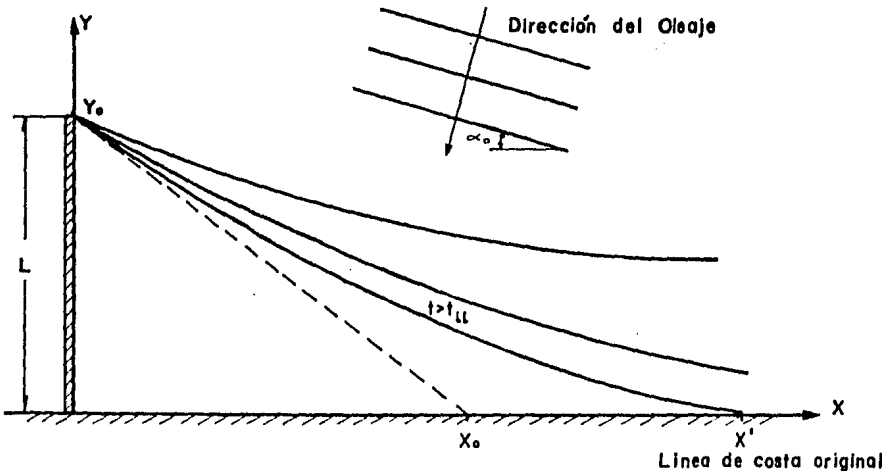


Fig. 3.8 Línea de costa en el lado de arrastre arriba de una escollera que no es barrera litoral completa.

y por lo tanto

$$\alpha x_0 = \sqrt{\pi} a t \quad (3.51)$$

el calculo de la linea de costa se hara hasta un limite de

$$\alpha x' = 2 \alpha x_0 \quad (3.52)$$

Para obtener el valor del gasto de material que pasa por la punta del rompeolas es necesario evaluar  $\partial y / \partial x$ . Para esto,  $\theta$  dado en (3.33), tambien puede ser puesto como

$$\theta = 2 / \sqrt{\pi} \left[ \int_0^{\infty} e^{-u^2} du - \int_0^u e^{-u^2} du \right] \quad (3.53)$$

si se vuelve a utilizar la definicion de la Distribucion de Probabilidad Normal,  $\theta$  puede definirse de la siguiente forma

$$\theta = 1 - 2 / \sqrt{\pi} \int_0^u e^{-u^2} du \quad (3.54)$$

Sustituyendo (3.54) en (3.48) y el valor de  $u$  dado en (3.32), se llega a que

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -L / \sqrt{\pi} a t e^{-((x^2)/4at)} \quad (3.55)$$

o bien, evaluando esta derivada en  $x=0$  en valor absoluto

$$\left| \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=0} = L / \sqrt{\pi} a t = \beta \quad (3.56)$$

donde la notacion de  $\beta$  se ha tomado por convencion. A su vez, se puede despejar  $\alpha$  o de (3.46) lo cual da como resultado

$$\alpha_0 = \sqrt{\pi} L / \sqrt{4 a t} \quad (3.57)$$

11

Comparando esta ultima expresion con la de  $B$  dada en (3.56) suponiendo que los tiempos son iguales, se observa que  $B > \alpha_0$ , lo cual fisicamente significaria que la direccion del transporte litoral se ha invertido, ya que ahora se tendria un angulo negativo de la linea de costa en la punta del rompeolas con respecto a los frentes de oleaje (Fig. 3.9). Esto no es nada cierto en la realidad, pudiendose afirmar que el tiempo  $t_{11}$  no corresponde al tiempo que se debe tomar en cuenta para el segundo modelo dado en (3.49).

Para poder determinar el desarrollo verdadero de la costa, dividiremos la solucion en dos fases. La primera fase es considerada desde que el

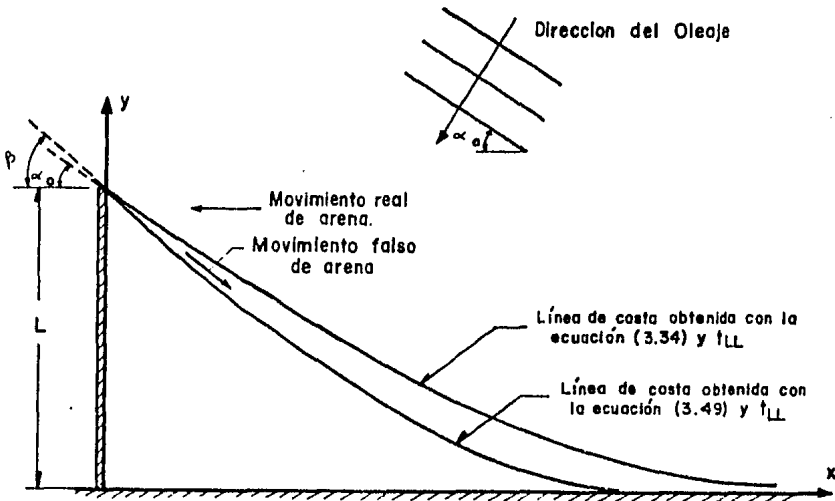


Fig. 3.9 Comparación de las variaciones de la costa en la punta de la estructura.

rompeolas es construido hasta que se llena en el tiempo  $t_{11}$ . La ecuación para el volumen acumulado hasta este tiempo es

$$V = \frac{Q_0 t_{11}^2}{1} = \frac{11 L D}{4 \alpha_0} \quad (3.58)$$

donde se sustituyó el valor de  $t_{11}$  y de  $a$  dados en (3.46) y (3.44) respectivamente.

En la segunda fase, el volumen de arena acumulado es

$$V = \int_0^{t_2} (Q_0 - Q) dt \quad (3.59)$$

donde  $Q_B$  es la cantidad de material que pasa por la punta de la estructura.

Ademas, recordando la ecuación de movimiento deducida al principio de esta sección

$$Q = Q_0 - q \frac{dy}{dx} \quad (3.18)$$

considerando el valor de  $\beta$  obtenido en (3.56), y considerando que  $q$  es la relacion lineal entre el transporte litoral y el angulo de incidencia, el transporte litoral que pasa se puede expresar como

$$Q = Q_0 \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha_0} \right) \quad (3.60)$$

sustituyendo (3.60) en (3.61)

$$V = \frac{Q_0}{2 \alpha_0} \int_0^{t_2} \beta dt \quad (3.61)$$

$$V = 2 L D \sqrt{a t_2 / \pi} \quad (3.62)$$

despues de hacer un poco de algebra. El subindice 2 se ha agregado para enfatizar que corresponde a la segunda solucion.

Igualando los valores de  $V_1$  y  $V_2$  de (3.58) y (3.62) respectivamente

$$\frac{\pi L D}{4 \alpha_0} = 2 L D \sqrt{a t_2 / \pi} \quad (3.63)$$

despejando  $t_2$ , da

$$t = \frac{\pi^3 L}{2 \cdot 64 (\alpha_0^2) a} \quad (3.64)$$

volviendo a recordar el valor de  $t_{11}$  de (3.46)

$$t = 0.62 t_{11} \quad (3.65)$$

lo que significa que cuando la estructura se ha llenado, para poder describir la evolucion de la costa con la ecuacion (3.49), es necesario hacer una correccion en el tiempo real, o en otras palabras el origen del tiempo de validez para esta ecuacion se ha desplazado. Este concepto se puede observar en el diagrama de la Fig. 3.10. En el eje superior del tiempo, se puede notar que la primera solucion dada en (3.27) es valida hasta el tiempo  $t_{11}$ . Cuando ha transcurrido un tiempo mayor a  $t_{11}$ , el eje inferior muestra, como el tiempo por aplicar es menor que el tiempo real.

Para evaluar el transporte litoral que pasa por la punta del obstaculo tomemos de nuevo (3.60) y el valor de  $\beta$  en (3.56).

$$Q = Q_0 \left[ 1 - L / (\alpha_0 \sqrt{\pi a t}) \right] \quad (3.66)$$

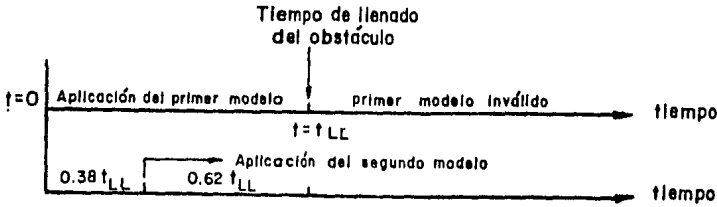


Fig. 3.10 Zonas de validez de los modelos.

introduciendo la correccion del tiempo obtenida para trabajar con el tiempo total real

$$Q = Q_0 \left( 1 - \frac{L}{\alpha_0 \sqrt{\pi} a(t - 0.38t)} \right) \quad (3.67)$$

y como  $L = 2 \frac{\alpha_0 \sqrt{t}}{\pi} a$  de (3.46),  $Q$  queda como

$$Q = Q_0 \left[ 1 - \frac{2}{\pi \sqrt{t/t}} - 0.38 \right] \quad (3.68)$$

Sin embargo, al aplicar la ecuacion (3.68) se comete un ligero error, que es necesario corregir. La Tabla 3.5 proporciona las correcciones correspondientes de la relacion  $Q_B/Q_0$  al variar  $t/t_{ll}$ . La Fig 3.11 muestra la variacion de  $Q_B/Q_0$  en funcion de la relacion de tiempos  $t/t_{ll}$ , y como se comporta  $Q_B/Q_0$  si se toman en cuenta el transporte litoral en suspension y el de fondo.

$t/t_{ll}$	$Q_B / Q_0$ (ecuacion 3.68)	$Q_B / Q_0$ (correccion)
1.00	0.189	0
1.25	0.316	0.298
1.50	0.398	0.394
2.00	0.499	0.499
3.00	0.606	0.606
4.00	0.665	0.665
5.00	0.704	0.704

Tabla 3.5 Correccion de los valores del transporte litoral en el extremo del obstaculo.

El metodo para predecir las variaciones de la linea de costa con la teoria de Pernald-Considere toma significancia, al ver que es un metodo de calculo manual y sencillo en dado momento. Tambien es aplicable al fenomeno de erosion en el lado de arrastre abajo, de un obstaculo que bloquea el paso de sedimento, como se vio en el capitulo





Para saber que camino tomar, si dragar o construir una longitud adicional de escollera, se deben obtener los volúmenes de sedimento que anualmente pasan por la escollera y que son a su vez los que se dragaran para mantener el canal en condiciones propicias. Los volúmenes anuales se obtienen con el auxilio de la Tabla 3.5 y estos van creciendo cada vez mas, por lo tanto los costos de dragado tambien crecen. Los costos de dragado dependen entre otras cosas, del tipo de material por dragar, el tipo de draga a utilizar, las profundidades y distancia a la que se draga y la distancia hasta donde se tira el material. Ademas, es necesario actualizar los costos tanto de dragado como los de construccion que se tienen en cada ano, para poder comparar en un solo ano las alternativas, por lo que se utiliza la expresion de Valor Presente dado un Valor Futuro en periodos de tiempo constantes, dada por

$$V P = \frac{1}{(1 + i)^n} V F \quad (3.69)$$

donde  $i$  es la tasa de interes anual.  
 $n$  número de periodos de tiempo.  
 $VF$  Valor Futuro.  
 $VP$  Valor Presente.

por lo tanto se tendran costo de la siguiente forma

Ano	Gasto (m <sup>3</sup> /ano)	Costo de Dragado Anual \$ x 10 <sup>6</sup>	Costo Actualizado x 1/(1+i) <sup>n</sup> , \$ x 10 <sup>6</sup>
0	0 = 0	0	0
1	Q	Cd	Cdp
2	Q	Cd	Cdp
.	.	.	.
.	.	.	.
n	Q	Cd	Cdp
	n	n	n

En cuanto a los costos de construccion de escollera o rompeolas, habra que determinar si la estructura sera de elementos artificiales o de roca, y si es este ultimo tipo de material, la ubicacion del banco de material, forma de colocacion de los elementos y la longitud total de la estructura. Se buscara una longitud que permita durar a la estructura un tiempo adicional considerable, pensando siempre en que en este periodo de tiempo, por condiciones naturales podria primero presentarse una condicion de equilibrio estatico de la playa.

Ademas de que la longitud seleccionada puede realizarse o bien en una sola etapa o bien en varias de diferentes periodos de tiempo, segun los recursos economicos disponibles. Tambien los costos de construccion se deben actualizar al ano en que se actualizan los de dragado. El horizonte economico de analisis quedara determinado por el tiempo elegido que dure la nueva longitud de la estructura de proteccion. Asi:

- i) Se incrementara la escollera si

$$\sum C_{dnp} > \sum CE_{pn} \quad (3.70)$$

- ii) se optara por dragar si

$$\sum C_{dnp} < \sum CE_{pn} \quad (3.70a)$$

donde  $CE_{pn}$  son los costos de construccion y mantenimiento de la escollera en el ano  $n$  actualizados.

El beneficio se dara en terminos del ahorro en el costo de dragado, es decir la diferencia entre el costo de dragado y el de construccion. Por lo tanto la Tasa Interna de Retorno (TIR) sera aquella tasa de interes  $(i)$  en que el ahorro en el costo de dragado sea nulo, o sea cuando

$$\sum C_{dnp} = \sum CE_{pn} \quad (3.71)$$

Esta depende de la situacion economica existente en el momento de analisis.

#### 4. DISEÑO DE UN ALGORITMO DE CÁLCULO PARA LA EVOLUCIÓN DE LA PLAYA.

En el capítulo anterior, se ha propuesto expresiones para cuantificar el arrastre litoral, y además se presentó la teoría de Pernald-Considerere para predecir la evolución playera. Todo esto bajo ciertas hipótesis difíciles de cumplir en la realidad. Por lo que la aplicación de los conceptos hasta ahora descritos, podría provocar resultados bastante distintos a los que la naturaleza presentaría. Por consiguiente, la teoría será más realista, si se hacen las consideraciones adecuadas de acuerdo a los datos con que se pueda contar.

El presente capítulo, pretende mostrar en breve la propuesta de una secuencia, que va desde la obtención de datos y su correcto empleo de acuerdo a la teoría, hasta el cálculo final de la línea de costa y la manera en como puede afectar a la estructura de protección de la que se trate.

##### 4.1 Metodología de Cálculo.

- a) Para desarrollar la teoría de Pernald-Considerere, se partió de considerar condiciones de oleaje permanentes, como son, dirección, período y altura de las olas.

Sin embargo, en una determinada zona, estas condiciones varían con gran frecuencia durante un período de tiempo dado, provocando que la configuración de la costa, sea resultado de la acción de todas ellas. Esto nos lleva a pensar, en que para poder aplicar la teoría de Pernald-Considerere, se deberán considerar unas condiciones fijas, pero a la vez equivalentes a una serie de ellas que suceden en el transcurso del tiempo.

En principio deberá contemplarse la posibilidad de obtener los datos de campo. Así, si se construyera un espigón de prueba, cuya

longitud vaya mas alla de la linea de rompientes, podria durante un ano observarse cual es la direccion neta del transporte litoral y su magnitud por ano, con el auxilio de fotografias aereas y levantamientos batimetricos, antes de la existencia del espigon y posterior a su construccion. El espigon podria ser parte de la estructura de proteccion que despues se construiria. Aparentemente, se estara perdiendo tiempo al estar observando durante cuando menos un ano el oleaje y dinero al construir el espigon, pero en fenomenos tan complejos como el transporte litoral, los datos de campo son mucho mas confiables, que los estimados con formulas matematicas en las que se corre el peligro de determinar una vida util de la estructura por azolve falsa dando, como consecuencia futuros costos de dragado mucho mas altos que los del espigon.

En caso de no contar con registros de arrastre litoral local, se sugiere consultar las cartas del Sea and Swell [12], donde se presenta por zonas del mundo, datos de altura y periodo de oleaje, por direcciones y frecuencias de accion en cada direccion. A partir de estos datos se deberan obtener, la Altura de Ola Significante, definida como la altura promedio del tercio mayor de un grupo de observaciones de alturas de oleaje y es representada como  $H_{1/3}$  o  $H_s$ , y el Periodo Significante, dado por  $T_s$ , el cual es definido como el periodo mas representativo (mayor frecuencia) de un grupo de observaciones de oleaje. La Altura de Ola Significante, se saca por direccion, asi como la frecuencia de accion del oleaje. Por su parte el Periodo Significante elegido se mantendra de aqui en adelante fijo.

- b) Con las alturas de ola significantes por direccion y periodo significativo obtenido se debera proceder a obtener los planos de refraccion, para determinar los coeficientes de refraccion y angulo de incidencia por cada direccion de procedencia del oleaje.
- c) Se prosigue a obtener el transporte litoral anual por direccion y multiplicado por el porcentaje de accion, ya que no actua todo el tiempo en cada una de las direcciones de accion, para asi obtener el transporte litoral neto, el cual sera el que proporcione la configuracion resultante de la costa. Si se va a utilizar la formula de Larras (ecuacion (3.8)), como se hara en el siguiente capitulo, sera necesario conocer el diametro medio del material ( $D_{50}$ ) existente en la zona de interes, sin embargo, si se recuerda que la constante "a" en la ecuacion de Pernald-Considere, puede ser expresada no solo en funcion de los parametros de la formula de Larras (3.28), sino tambien en el del valor de  $Q$  (expresion (3.44)) podemos aplicar cualquier formula para evaluar el gasto de sedimentos, o el dato obtenido directamente de campo.
- d) Para determinar las condiciones equivalentes del oleaje y que entraran en las soluciones de la ecuacion de Pernald-Considere como fijas se parte del valor del transporte litoral neto. Ademas se haran consideraciones un poco espontaneas pero mas proximas a la simulacion del fenomeno real. Para un coeficiente de refraccion

equivalente se tomara un promedio de los coeficientes obtenidos por direccion.

$$K_{req} = \frac{\sum K_{ri}}{n} \quad (4.1)$$

donde  $K_{req}$  coeficiente de refraccion equivalente.  
 $K_{ri}$  coeficiente de refraccion de una direccion dada.  
 $n$  numero de direcciones de accion significantes.

La altura de ola equivalente se obtiene de ponderar las alturas de ola significantes por direccion, por su respectivo porcentaje de frecuencia. Por ultimo, el angulo de incidencia equivalente, se determina de manera inversa, es decir con el valor del transporte litoral neto y con los de la altura de ola y coeficiente de refraccion equivalentes, a partir en este caso de la expresion de Larras (3.8). El periodo y el diametro se mantienen iguales.

$$\alpha_{eq} = \frac{4}{7} \text{ ang } \text{sen} \left[ \frac{Q_{eq}}{2 \sqrt{K_g H_{oeq} K_{req} T}} \right] \quad (4.2)$$

- e) Como el angulo de incidencia equivalente encontrado, esta dado para la zona de rompientes, y el angulo que se necesita en la teoria de Pernald-Considerere, es a la profundidad hasta donde llega la estructura de proteccion, en funcion de la relacion  $d/L_o$  (profundidad/longitud de ola), con la ayuda de la metodologia propuesta en el Manual de la C.F.E. [5], se puede obtener dicho angulo. A su vez, la longitud de la estructura sera aquella en que el perfil playero alcance en la punta de esta, la profundidad de rompiente (ver Fig. 3.7), y es menor que la longitud real. Ademas, se determina la profundidad hasta donde la escollera o rompeolas llegan, ya que hasta ahi se determina la evolucion de la playa.
- f) Se determina el valor de la constante  $a$ , con la expresion (3.44) en caso de que se usen datos de campo u otra formula distinta a la de Larras, pero en caso de usar esta ultima mencionada, la ecuacion (3.28) se debe de usar. En caso de estar en el primero de los casos los incisos b) y e) no se toman en cuenta.
- g) Ahora ya se puede obtener el tiempo de llenado ( $t_{ll}$ ), para la longitud de la estructura propuesta. Se buscara que su valor sea considerable y basado en los recursos economicos disponibles, pues sera a final de cuentas la vida util de la estructura. En caso de no cumplir con el tiempo pronosticado, puede aumentarse una longitud adicional de la estructura, o bien se puede optar por dragar. Para esto se procedera a un analisis comparativo de costos, como el planteado en el inciso 3.3 del capitulo anterior. Si se va a aumentar la longitud de la escollera, habra que modificar los datos de oleaje para la profundidad correspondiente a esta nueva

longitud.

- h) Para calcular la evolucion de la costa para cualquier tiempo (t), se utilizan las ecuaciones (3.34) o (3.49), ya sea que se trate de una barrera total o una barrera parcial. Para cualquiera de los dos casos, se tiene que evaluar la integral indefinida dada como

$$E(u) = \int_u^{\infty} e^{-(u^2)} du \quad (4.3)$$

Su valor para cada u, se puede hacer con el auxilio de la Tabla 3.4 o si se va a hacer numericamente, a traves del cambio de variables (3.36) y evaluando ahora la integral definida de Distribucion Normal, con un metodo numerico como el de Simpson 1/3 dado por la expresion

$$A_{1/3} = \frac{h}{3} (Y_0 + Y_n + 4 \sum_{\text{ordenadas impar}} + 2 \sum_{\text{resto de las ordenadas}}) \quad (4.4)$$

en que  $A_{1/3}$  area bajo la curva (valor de la integral).

h tamaño del subintervalo.

n número de subintervalos.

$Y_0 = f(X_0)$  valor inicial del intervalo de la funcion.

$Y_n = f(X_n)$  valor final del intervalo de la funcion.

Para el caso de la integral de las soluciones de la teoria, 20 subintervalos son suficientes para tener aproximaciones aceptables.

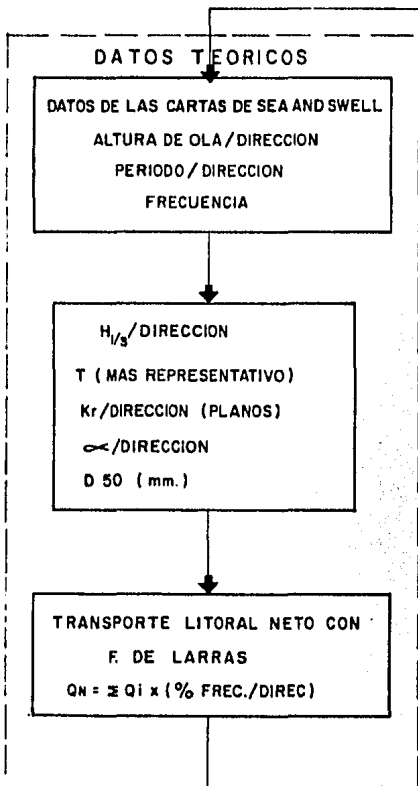
Los limites maximos hasta donde crece la playa se pueden obtener con las ecuaciones (3.39), (3.40) y (3.52).

Debe recordarse tambien que si se trata de una barrera parcial, hay que hacer una correccion del tiempo, dada por (3.65) y el gasto de sedimento que no es retenido se calcula con la Tabla 3.5 o bien con la ecuacion (3.67) para relaciones t/t11 no contempladas en la tabla.

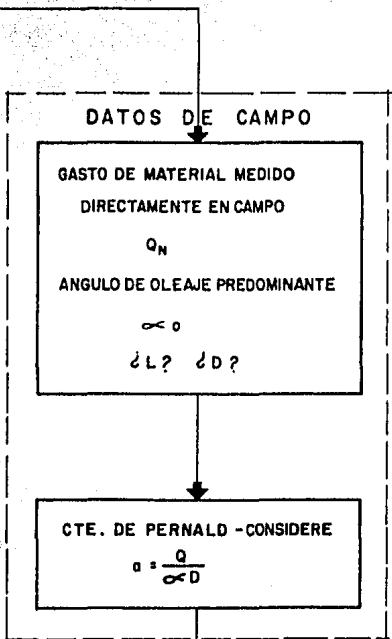
## 4.2 Diagrama de Flujo.

A manera de esquematizar la metodologia anterior se presenta en las siguientes hojas, el Diagrama de Flujo, que a su vez sirvio de base para la realizacion del programa que se presentara en el siguiente inciso.

INICIO



A<sub>1</sub>



A<sub>2</sub>



A<sub>1</sub>

CONDICIONES EQUIVALENTES

$$K_{req} = \frac{D_i \cdot K_{ri}}{n}$$

HEQ = (Prom. de las más frecuentes.)

$\alpha_{EQ}$  = (Formula de Larras)

ANGULO DE INC. EN AGUAS PROF.

$$\alpha_0 = f(\alpha_{EQ}, d/L_0)$$

¿L? ¿D?

CTE. DE PERNALD-CONSIDERE

$$a = \frac{7}{4} \frac{K \cdot g \cdot K_{req}^2 \cdot H_0 E_0^2 \cdot T}{D}$$

A<sub>2</sub>

TIEMPO DE LLENADO

$$t_{LL} = \frac{L^2 \pi}{4 a \alpha_0^2}$$

LIMITES DE INFLUENCIA

$$OY = L$$

$$OX_B = 2.7 \sqrt{4 a t_{LL} / \pi}$$

t<sub>LL</sub>, OY, OX<sub>B</sub>

A<sub>3</sub>

A<sub>3</sub>

CALCULO PARA CUALQUIER TIEMPO  
t ?

t > t<sub>LL</sub>

NO

SI

LIMITES DE INFLUENCIA PARA t  
 $OY = \infty_0 \sqrt{\frac{4gt}{\pi}}$   
 $OX = 2.7 \sqrt{\frac{4gt}{\pi}}$

$\Delta x = OX/25$

I = 0, 25, 1

$x = \Delta x(I)$

$u = x / \sqrt{4gt}$

A<sub>4</sub>

$y = \frac{2.0}{\sqrt{\pi}} \left( \sqrt{4gt} e^{-u^2} - 2x E(u) \right)$

COORDENADAS DE LA LINEA DE COSTA  
x, y

CORRECCION DEL TIEMPO  
 $t_n = t - 0.38 t_{LL}$

LIMITES DE INFLUENCIA PARA t  
OY = L  
OX =  $2\sqrt{\pi g t_n}$

$\Delta x = OX/25$

I = 0, 25, 1

$x = \Delta x(I)$

A<sub>4</sub>

$y = 2L E(u)$

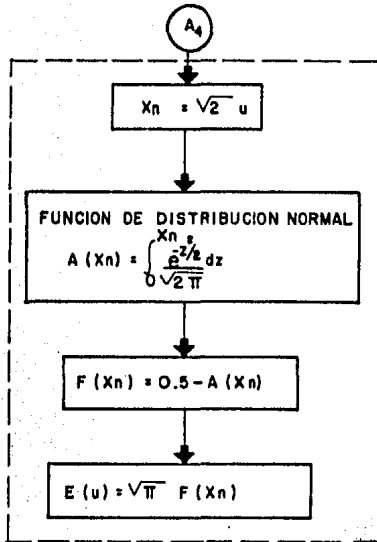
COORDENADAS DE LA LINEA DE COSTA  
x, y

MATERIAL NO RETENIDO  
 $Q_B/Q_0 = f(t/t_{LL})$

Q<sub>B</sub>

FIN

$$\text{INTEGRAL } E(u) = \int_u^{\infty} e^{-z^2} dz$$



#### 4.3 Programa Para la Evolucion de la Playa.

El programa de computadora aqui presentado, esta dado en el lenguaje BASIC, y fue ejecutado en una microcomputadora APPLE II Plus. Se basa en el diagrama de flujo mostrado en la seccion anterior.

En el, se parte de haber obtenido las condiciones equivalentes del oleaje, o de tener ya fijadas estas. Proporciona el valor del transporte litoral anual, asi como el tiempo de llenado de un obstaculo estructural, y da opcion a calcular la configuracion de la playa en cualquier tiempo, con 25 puntos equidistantes sobre la linea de playa original, suficientes para apreciar la evolucion de la playa. A continuacion se presenta un listado del programa.

JL18:10:490

```
10 REM DECLARACION DE VARIABLES
20 G = 9.81
30 F1 = 2.141392654
40 S = 31536000
50 DEF FN F(Z) = EXP (- (Z ^ 2) / 2) / SQR (2 * PI)
60 DIM A(25),L(25),R(7),R0(7)
70 FOR B = 1 TO 7
75 READ R(B)
77 READ R0(B)
80 DATA 1.0,0.0,1.25,0.298,1.5,0.394,2.0,0.5,3.0,0.607,4.0,0.667,5.0,0.7
81 ON B
83 GOSUB 2050
85 REM INTRODUCCION DE DATOS
87 H = 3: GOSUB 1930
90 HOME
95 PRINT "***INTRODUCCION DE DATOS***"
100 PRINT
110 INPUT "LONGITUD DE OLA L0(MTS)=";L0
120 PRINT
130 INPUT "ALTURA DE OLA H0(MTS)=";H0
140 PRINT
150 INPUT "PERIODO DE OLAJE T(SEG)=";T
160 PRINT
164 INPUT "ANGULO DE INC. EN RUMPIENTE F0(GRADOS)=";F1
165 PRINT
170 INPUT "ANGULO DE INCIDENCIA F0(GRADOS)=";F
180 PRINT
190 INPUT "COEF. DE REFRACCION KR=";KR
200 PRINT
210 INPUT "DIAMETRO MEDIO DEL MATERIAL D0(CM)=";D0
220 PRINT
230 INPUT "LONGITUD DEL OBSTACULO L(MTS)=";L
240 PRINT
250 INPUT "PROFUNDIDAD DE CALCULO D(MTS)=";D
260 REM CALCULO DEL TRANSPORTE ANUAL Y CTES
270 K1 = D0 * ( ( - 5) ) * 1.18 * L0 / ( SQR (D0) * H0)
280 F2 = F * PI / 180
285 F2 = F1 * PI / 180
290 Q = K * G * (H0 ^ 2) * (KR ^ 2) * T * SIN (7 * F2 / 4)
300 Q1 = Q * S
310 H = 7 * K * G * (H0 ^ 2) * (KR ^ 2) * T / (4 * D)
320 HOME
330 H = 3: GOSUB 1930
340 PRINT TAB( 5);"CTE. DE LARRAS K=";K
350 H = 3: GOSUB 1930
370 PRINT TAB( 10);"***TRANSPORTE LITORAL ANUAL***"
380 PRINT
390 PRINT TAB( 15);"Q(CM3/S)=";Q
400 PRINT
410 PRINT TAB( 15);"Q(CM3/ANO)=";Q1
420 H = 3: GOSUB 1930
440 PRINT TAB( 5);"CTE. DE PERNALO-CONSIDERE A=";A
450 REM CALCULO DEL TIEMPO DE LLENADO
460 TL = (L ^ 2) * PI / (4 * A * (FR ^ 2))
470 TD = TL / S
480 TB = INT (TD)
490 TC = INT ((TD - TB) * 12)
```

ALIC7500,1030

```
500 REM DISTANCIA DE INFLUENCIA
510 LY = 2.7 * SQR (4 * A * TL / PI)
520 NONE
530 H = 4: GOSUB 1930
540 PRINT TAB( 10);"***TIEMPO DE LLENADO DEL OBSTACULO***"
550 PRINT
560 PRINT TAB( 25);"TLL=";TL;" SEG"
570 PRINT
580 PRINT TAB( 25);"TLL=";TB;" ANOS ";TC;" MESES"
590 H = 4: GOSUB 1930
610 PRINT TAB( 15);"LIMITES DE INFLUENCIA (MTS)"
620 PRINT
630 PRINT TAB( 10);"EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL"
640 PRINT
645 IN = TB: GOSUB 1970
650 PRINT TAB( 13);"OXB=";F$
660 PRINT
670 PRINT TAB( 10);"EN EL ROMPEOLAS"
680 PRINT
685 IN = L: GOSUB 1970
690 PRINT TAB( 13);"L=";F$
700 REM CONFIGURACION DE LA LINEA DE COSTA
710 H = 9: GOSUB 1930
730 PRINT
740 PRINT "DESEA SABER LA CONFIGURACION DE LA LINEA DE COSTA PARA ALGUN T
TIEMPO ???"
750 PRINT
760 PRINT "SU OPCION: SI <S> , NO <N> <RTN>"
770 INPUT O$
780 IF O$ = "N" THEN GOTO 1410
790 NONE
800 PRINT
810 PRINT
820 INPUT "TIEMPO T1(ANOS.DECIMAS)=";T1
830 T2 = T1 * 8
840 PRINT
850 PRINT "T1(SEG)=";T2
860 NONE
865 H = 3: GOSUB 1930
880 IF T2 > TL THEN GOTO 1060
890 OY = (FR) * SQR (4 * A * T2 / PI)
900 OX = 2.7 * SQR (4 * A * T2 / PI)
910 OX = OX / 25
920 PRINT TAB( 15);"***CASO: BARRERA TOTAL***"
930 PRINT
940 GOSUB 1460
950 REM CALCULO PARA BARRERA TOTAL
960 FOR I = 0 TO 25 STEP 1
970 X = OX * I
974 IN = X: GOSUB 1970
980 X%(I) = F$
990 U = X / SQR (4 * A * T2)
1000 GOSUB 1620
1010 Y = (FR) / SQR (PI) * ( SQR (4 * A * T2) * EXP ( - (U ^ 2)) - 2 * X
* EU)
1014 IN = Y: GOSUB 1970
1020 LC%(I) = F$
1030 PRINT SPC( 13 - LEN (X%(I)))X%(I); SPC( 35 - LEN (LC%(I)))LC%(I)
```

11371040,1525

```
1040 NEXT I
1050 GOTO 1330
1060 PRINT TAB( 15); "***CASO: BARRERA PARCIAL***"
1070 REM CORRECCION DEL TIEMPO
1080 T1 = T2 - 0.38 * TL
1090 OY = L
1100 OX = 2 * SQR (PI * A * TH)
1110 OX = OX * 25
1120 PRINT
1130 GOSUB 1480
1140 REM CALCULO PARA BARRERA PARCIAL
1150 FOR I = 0 TO 25 STEP 1
1160 X = OX * I
1164 IN = X: GOSUB 1970
1170 LC(I) = F#
1180 U = X / SQR (4 * H * TH)
1190 GOSUB 1520
1200 Y = 2 * L * EU / SQR (PI)
1204 IN = Y: GOSUB 1970
1210 LC(I) = F#
1220 PRINT SPCC 13 - LEN (X*(I));X*(I); SPCC 35 - LEN (LC(I));LC(I)
1230 NEXT I
1240 PRINT
1250 PRINT
1260 PRINT TAB( 10); "***TRANSPORTE LITORAL QUE PASA***"
1265 REM GASTO QUE PASA GB
1270 K = T2 / TL
1275 PRINT
1280 PRINT TAB( 15); "RELACION T1/TL=";R
1285 GOSUB 1800
1290 PRINT "RELACION QB/Q0=";RQ
1295 Q0 = K0 * U
1300 Q2 = Q0 * S
1305 PRINT
1310 PRINT TAB( 15); "QB(M3/S)=";QB
1315 PRINT
1320 PRINT TAB( 15); "QB(M3/ANO)=";Q2
1330 PRINT
1340 PRINT
1350 PRINT
1360 PRINT "DESEA SABER ALGUNA OTRA CONFIGURACION?"
1370 PRINT
1380 PRINT "SU OPCION: SI <S> , NO <N> <RTN>"
1390 INPUT C#
1400 IF C# = "S" THEN GOTO 790
1410 HOME
1420 H = 4: GOSUB 1930
1435 PRINT TAB( 15); "**** FIN DEL PROGRAMA ****"
1440 END
1450 REM FORMATO DE IMPRESION DE DATOS
1460 PRINT TAB( 15); "LIMITES DE INFLUENCIA (MTS):"
1470 PRINT
1480 PRINT TAB( 10); "EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL"
1490 PRINT
1495 IN = OX: GOSUB 1970
1500 PRINT TAB( 13); "OX=";F#
1510 PRINT
1520 PRINT TAB( 10); "EN EL OBSTACULO"
1525 PRINT
```

111511527,2070

```
1527 IN = 0Y: GOSUB 1870
1530 PRINT TAB( 13);"OY=";F#
1540 PRINT
1550 PRINT
1555 PRINT
1560 PRINT TAB( 10);"COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA"
1570 PRINT
1575 PRINT
1580 PRINT TAB( 5);"ABSCISA(X)"; TAB( 25);"ORDENADA(Y)"
1590 PRINT
1600 RETURN
1610 REM CALCULO DE LA FUNCION E(U)
1620 XN = SQ( 2) * U
1630 H = XN / 20
1640 SI = 0
1650 FOR N = 1 TO 19 STEP 2
1660 XI = H * N
1665 ZI = FN P(XI)
1666 SI = SI + ZI
1670 NEXT N
1680 SP = 0
1690 FOR J = 2 TO 18 STEP 2
1700 XP = H * J
1710 ZP = FN P(XP)
1720 SP = SP + ZP
1730 NEXT J
1740 Z0 = FN P(0)
1750 ZN = FN P(XN)
1760 AR = H / 3 * (Z0 + ZN + 4 * SI + 2 * SP)
1770 FZ = 0.5 - AR
1780 EU = SQ( PI) * FZ
1790 RETURN
1800 REM INTERPOLACION DE LA RELACION QB/Q0
1810 PRINT
1820 FOR U = 1 TO 7
1870 IF U = 7 THEN GOTO 1890
1880 IF R > RT(U) THEN GOTO 1910
1890 RQ = (R - RT(U - 1)) * (RQ(U) - RQ(U - 1)) / (RT(U) - RT(U - 1)) + RQ
(U - 1)
1900 Q = 10
1910 NEXT U
1920 RETURN
1930 FOR H = 1 TO H
1940 PRINT
1950 NEXT H
1960 RETURN
1965 REM SUBROUTINA PARA REDONDEAR
1970 F# = STR# ( INT ( IN * 100 + .5) / 100)
1980 IF LEFT# ( F#,1) = "." THEN F# = "0" + F#
1990 IF LEFT# ( RIGHT# ( F#,3),1) = "." GOTO 2020
2000 IF LEFT# ( RIGHT# ( F#,2),1) = "." THEN F# = F# + "0": GOTO 2020
2010 F# = F# + ".00"
2020 IF LEFT# ( F#,2) = "-." THEN F# = "-0" + MID# ( F#,2)
2030 RETURN
2040 REM SUBROUTINA DE PRESENTACION
2060 NX = 2: GOSUB 2200
2070 NX = 1: GOSUB 2220
```



JL132000.

```
0100 PRINT TAB( 50);"*** U. N. A. N. ***"  
2000 KX = 2: GOSUB 2220  
2100 PRINT TAB( 50);"** FACULTAD DE INGENIERIA **"  
  
2110 KJ = 1: GOSUB 2220  
2120 KJ = 2: GOSUB 2200  
2130 PRINT : PRINT : PRINT  
2140 PRINT TAB( 15);"EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE"  
2145 PRINT  
2150 PRINT TAB( 16);"ESTRUCTURAS DE PROTECCION"  
2160 PRINT : PRINT : PRINT  
2170 PRINT TAB( 13);"*****"  
2175 PRINT TAB( 13);"**CALCULO DE LA EVOLUCION DE LA**"  
2180 PRINT TAB( 13);"*****"  
2185 PRINT TAB( 13);"*****LINEA DE COSTA*****"  
2190 PRINT TAB( 13);"*****"  
2195 RETURN  
2200 FOR KJ = 1 TO KX  
2205 PRINT TAB( 5);"*****"  
  
2210 NEXT KJ  
2215 RETURN  
2220 FOR KU = 1 TO KX  
2225 PRINT TAB( 5);"***"  
  
2230 NEXT KU  
2235 RETURN
```

## 5. APLICACION DEL ALGORITMO PROPUESTO A UN CASO PRACTICO.

El caso practico elegido para desarrollar el algoritmo propuesto en el capitulo 4 fue Puerto Madero, ubicado en el Estado de Chiapas (Fig. 5.1). La razon de la eleccion, se debio a que este sitio ha tenido grandes problemas de azolvamiento en el canal de navegacion y en las darsenas. Además, en una de sus escolleras se ha visto un avance considerable de la playa, mientras que en la otra, se ha observado un retroceso, como se mencionara posteriormente. La playa muestra una tendencia a ser recta a lo largo de ella, y las escolleras son practicamente perpendiculares (ver Fig. 5.2).

En este capitulo tambien se analiza la conveniencia de incrementar la longitud de las estructuras de proteccion, como una medida para rehabilitar el puerto.

### 5.1 Antecedentes.

Con base en una serie de estudios e investigaciones tendientes a habilitar una terminal maritima en el Estado de Chiapas, que diera salida a la produccion agricola de la region, surge Puerto Madero. La abundancia en especies como cafe, cacao, algodón, cana de azucar y principalmente platano, permitio pensar que esta produccion podria incorporarse al mercado exterior y fortalecer el comercio con Centro America, via un puerto en esta region del pais; a lo anterior, posteriormente se anadio la posibilidad de desarrollar una actividad pesquera, dado el potencial que aun no habia sido explotado y aprovechado en forma comercial.

Tomando en cuenta los elementos justificativos mencionados anteriormente, desde 1956 se realizaron los estudios fisicos correspondientes para definir la ubicacion adecuada del puerto, encontrandose dos alternativas validas, la primera de las cuales, con ligero margen a su favor, en Paredon y la segunda situada en Puerto



**Fig. 5.1** Localización de Puerto Madero, Chis.

Madero. Hacia 1970 y como respuesta a las inquietudes de productores y transportistas de la region, se realizaron los estudios de factibilidad; iniciandose las obras de construccion del puerto en 1972, para quedar terminadas en su primera etapa tres años despues e ignauguradas ese mismo año, 1975. De los estudios justificativos que se realizaron para el establecimiento del puerto, se puede destacar que, desde el punto de vista del impacto economico para la region, todos resultaban viables y congruentes con las politicas de desarrollo regional prevalecientes en ese entonces; las proyecciones realizadas sobre los volúmenes de produccion y exportacion esperadas en un futuro no lejano, tal vez fueron demasiado optimistas en relacion a los movimientos reales que posteriormente se observaron en el puerto.

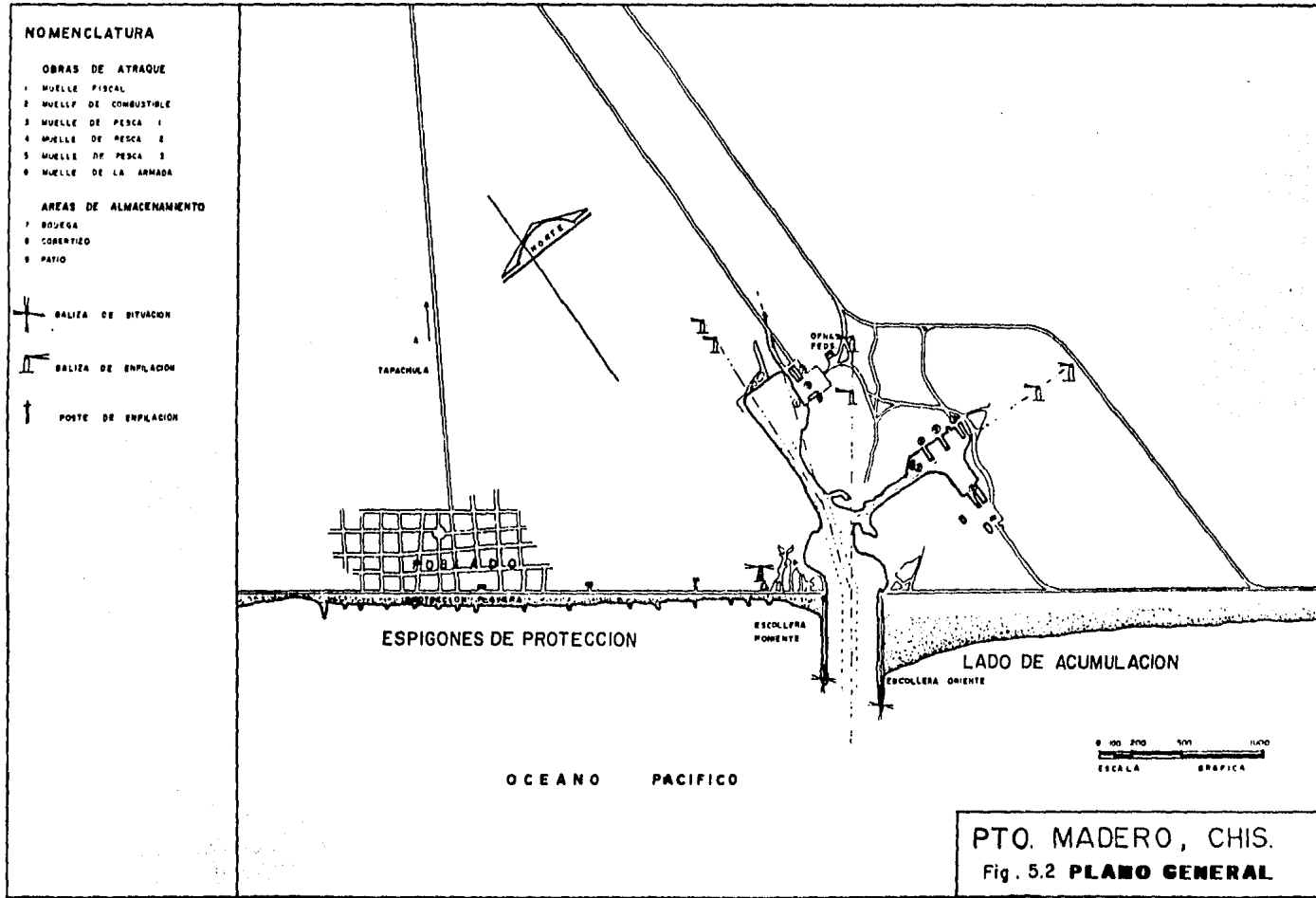
## 5.2 Situacion Actual.

La situacion de inactividad por la que atravieza en la actualidad Puerto Madero, representa un problema de amplia magnitud, que ha insidido en el retraso economico de aquella region y en el desarrollo de la actividad pesquera que escasamente se ha implementado con excepcion de la captura de tiburón. La actividad comercial realizada a traves del puerto, de por si escasa se ha visto aun mas reducida, a tal grado, que la fecha, no se ha verificado ningun movimiento comercial en el puerto.

Uno de los principales problemas que ha originado la inactividad en el puerto, es el fisico. Desde la construccion se observo un transporte litoral en la direccion SE a NW, con el consecuente azolvamiento de la escollera oriente, el cual sumado al transporte ocasionado por los temporales y al escaso mantenimiento producto de la misma inactividad, el deterioro de las instalaciones se ha incrementado a tal grado, que se tienen las siguientes condiciones:

- El morro de la escollera poniente se encuentra destruido.
- En la escollera oriente se observa movimiento y deslizamiento de las piedras dejando paso a la corriente marina en algunos puntos.
- El mar ha ganado terreno entre la escollera poniente y los espigones que fueron construidos para evitar este problema, ocasionando serios danos a la carretera Puerto Madero-Tapachula.
- La continua erosion que se presenta principalmente en el seno de la escollera oriente, amenaza los terrenos del poblado de Puerto Madero y los de la base naval.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que la problematica en el aspecto fisico, tiene gran importancia en la situacion actual, sin ser la unica ya que en fecha anterior a la presencia de esta, el puerto se utilizaba escasamente para la actividad comercial, pesquera y turistica.



**PTO. MADERO, CHIS.**  
**Fig. 5.2 PLANO GENERAL**

Sin embargo, enfocandonos al aspecto fisico, se puede observar que el fuerte acarreo litoral es el mas relevante y ha provocado el fin de la vida util de la escollera oriente, es decir, la estructura se ha llenado completamente de material por lo que su utilidad al momento es nula, dejando pasar todo el transporte litoral, el cual se sedimenta en los canales de navegacion y darsenas, dificultando el transito de embarcaciones en el puerto.

Por otra parte, en un estudio hecho para rehabilitar el puerto, [13] y [14], se realizo un analisis hidrodinamico de corrientes para ver las velocidades de estas en el canal de navegacion, observandose velocidades muy bajas tanto en corrientes por marea, como por la accion del oleaje, conforme el flujo se va adentrando a las demas secciones de los canales, por lo que la capacidad de autdragado del puerto es nula. Aunado a lo anterior, la erosion observada en el seno de la escollera oriente, ha incrementado el volumen de material sedimentado en un valor de 50,000 m3, pero sin ser importante.

Tabla 5.1 Volúmenes de dragado de 1983 y 1984 en Puerto Madero, Chiapas.

Año	Mes	Nombre de la Draga			Total	Total Acumulado
		Crist. Colon	Tabasco	Presid. Madero		
83	Ene.	17,795				
	Feb.					
	Mar.					
	Abr.	17,795			17,795	17,795
	May.	28,090			28,090	45,885
	Jun.	31,640			31,640	77,525
	Jul.	39,925			39,925	117,450
	Ago.	25,150			25,150	142,600
	Sep.	40,708			40,708	183,308
	Oct.	25,329			25,329	208,637
	Nov.	26,372	21,364		47,736	256,373
	Dic.	6,483	86,479		92,962	349,335
84	Ene.		17,582	24,375	41,957	391,292
	Feb.			61,094	61,094	452,382
	Mar.			41,080	41,080	493,466
	Abr.			49,388	49,388	542,854
	May.			81,689	81,689	624,543
	Jun.			14,390	14,390	638,933

Como referencia de la magnitud del transporte litoral anual en la zona del puerto, se pueden observar los volúmenes de dragado que se realizaron en Puerto Madero durante 1983., año en que empezaron los problemas de azolve y 1984 (ver Tabla 5.1). Las profundidades obtenidas por dichos trabajos a finales de 1984, fueron:

Sitio	Profundidad (m)
Canal de acceso	9.00
Canal de pesca	7.00
Canal comercial	9.00
Darsena de pesca	7.00
Darsena Comercial	9.00

### 5.3 Determinacion del transporte Litoral.

Para el calculo del transporte litoral, como se menciona en el capitulo anterior, se deben obtener datos de las direcciones del oleaje incidente en el sitio, asi como el periodo del mismo, que sea representativo del fenomeno.

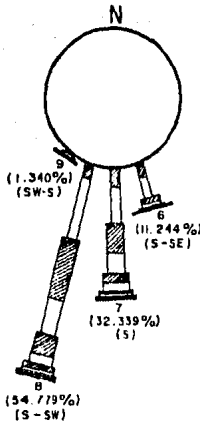
Para lograr el proposito anterior, fue necesario extrapolar los datos de oleaje registrados en las cartas del Sea and Swell [12] del puerto de Salina Cruz, para Puerto Madero. Esto, debido a que el cuadrante correspondiente a Puerto Madero en las cartas, carece de datos, y dado que a la vez el puerto se encuentra muy cercano al cuadrante correspondiente a Salina Cruz el cual si contiene datos suficientes, el criterio de extrapolar se considero razonable.

Los principales datos del oleaje anual se resumen en las Tablas 5.2 y 5.3. A su vez, la Fig. 5.3 muestra la frecuencia por direcciones de la altura y periodo del oleaje.

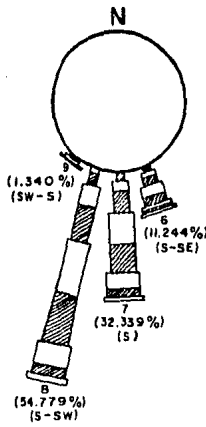
De la tabla 5.2, se observa que las direcciones mas representativas son S-SW, S, S-SE, con una frecuencia del 98% las tres. Tambien se obtuvo la Altura de Ola Significante (Hs), como se definio en el capitulo anterior para cada direccion.

Con base en la batimetria general del sitio (Plano 1, Anexo 1), la cual se obtuvo como una ampliacion de la carta SM-600, de la Secretaria de Marina, y de la batimetria de detalle (Plano 2), resultado de levantamientos hechos por la Direccion General de Obras Maritimas, se realizaron los planos de refraccion para las tres direcciones significantes ya referidas. Ver planos 3 al 8. Las profundidades, en metros, estan referidos al N.M.M. y el Norte considerado es el astronomico.

El periodo que se considero fue de 12 segundos.



a) ALTURAS



b) PERIODOS

Fig. 5.3 Distribución de frecuencias de altura y período de oleaje por dirección.



Altura (m)	Direccion					
	SE-S	S-SE	S	S-SW	SW-S	GENERAL
0.0-0.2	0.012	3.239	4.608	3.406	0.171	11.436
0.2-0.4	0.149	5.534	9.373	15.571	0.417	31.044
0.4-0.6	0.131	1.687	7.037	15.371	0.199	24.425
0.6-0.8	0.006	0.385	5.071	9.505	0.120	15.087
0.8-1.0	-	0.187	2.902	5.074	0.106	8.269
1.0-1.2	-	0.103	1.609	2.641	0.078	4.431
1.2-1.4	-	0.063	0.846	1.338	0.038	2.281
1.4-1.6	-	0.022	0.472	0.686	0.057	1.239
1.6-1.8	-	0.010	0.238	0.331	0.040	0.619
1.8	-	0.014	0.181	0.856	0.113	1.164
Total %	0.298	11.244	32.339	54.779	1.340	100.000
H1/3 (m)	0.513	0.518	0.925	0.971	1.416	-

Tabla 5.2 Distribucion de frecuencias por alturas.

Periodo (seg)	Direccion					
	SE-S	S-SE	S	SW-S	S-SW	GENERAL
4-6	0.000	0.038	0.153	1.237	0.043	1.471
6-8	0.038	0.988	2.047	2.951	0.073	6.097
8-10	0.038	1.345	2.903	5.598	0.132	10.016
10-12	0.033	2.413	5.049	9.059	0.195	16.749
12-14	0.092	2.795	8.032	13.633	0.285	24.837
14-16	0.082	2.067	7.582	12.319	0.239	22.289
16-18	0.011	0.929	3.857	5.945	0.198	10.940
18-20	0.004	0.431	2.000	2.212	0.106	4.753
20	0.000	0.238	0.716	1.825	0.069	2.848
Total%	0.298	11.244	32.339	54.779	1.341	100.000

Tabla 5.3 Distribucion de frecuencias por periodo.

Asi, los coeficientes de refraccion obtenidos y los angulos de incidencia obtenidos a partir de los planos 6 al 8 son:

Direccion	Kr	( $\alpha$ )
S-SE	0.5096	18
S	0.7410	15
S-SW	0.9325	4

Ahora usaremos la formula de Larras (3.8) para obtener el transporte litoral neto.

$$Q = K g (H_0^2) (K_r^2) T \text{ sen } (7 \alpha / 4) \quad (3.8)$$

donde

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$K = 1.18 (10^{-6}) (D_{50}^{-(1/2)}) L_0 / H_0$$

$$L_0 = 1.56 (T^2) = 1.56 (144) = 224.64 \text{ m}$$

$$H_0 = H^{1/3} \text{ (m)}$$

Se tomara un diametro medio de 0.2 mm, valor obtenido de estudios granulometricos del material de la zona. Por lo tanto, para cada direccion de oleaje se toman los valores correspondientes de altura de la Tabla 5.2 y se sustituyen en la expresion de Larras. Los resultados se multiplican por el porcentaje total de frecuencia por altura (ver la misma Tabla 3.2) por direccion.

Como ejemplo, para la direccion S-SE, se tienen los siguientes datos

$$K = 1.18 (10^{-6}) (0.2^{-(1/2)}) (224.64 / 0.513) = 0.001144$$

$$Q_t = (0.001144) (9.81) (0.518^2) (0.5096^2) (12) \text{ sen } (7 \times 18 / 4)$$

$$Q_t = 0.004904 \text{ m}^3\text{/s} = 154,662.397 \text{ m}^3\text{/ano}$$

$$Q = 154,662.397 (0.11244) = 17,390.24 \text{ m}^3\text{/ano}$$

De la misma forma se calculan los valores de Q para las otras direcciones, resumidas de la siguiente manera:

Direccion	Transporte Litoral (m <sup>3</sup> /ano)
S-SE	+ 17,390.24 m <sup>3</sup> /ano
S	+159,853.27 m <sup>3</sup> /ano
S-SW	+124,032.77 m <sup>3</sup> /ano

Convencion de signos: (+) de SE-NW (izquierda a derecha)  
 (-) de NW-SE (derecha a izquierda)

En este caso el transporte litoral neto es igual al transporte litoral total, ya que la suma algebraica de los tres valores, es la suma total de los mismos, por tener igual signo y llevar por consiguiente la misma direccion. El transporte litoral neto resulta:

$$Q_n = 301,276.28 \text{ m}^3/\text{año}$$

### 5.3.1 Condiciones equivalentes.

Para el gasto neto obtenido, se deben encontrar las condiciones resultantes equivalentes, que seran una representacion mas proxima a la realidad.

Para la altura de ola equivalente, en este caso, se tomara un promedio de las alturas de las dos direcciones mas frecuentes que son la direccion S y la S-SW, que en conjunto se presentan durante un 87% del año,

$$H_{oeq} = \frac{0.925 + 0.971}{2} = 0.948 \text{ m}$$

Si ahora se determina el coeficiente de refraccion equivalente,  $K_{req}$ , como un promedio de los tres coeficientes determinados, se tendra

$$K_{req} = \frac{0.5096 + 0.7410 + 0.9325}{3}$$

$$K_{req} = 0.728$$

Volviendo a utilizar la formula de Larras, se determina un angulo equivalente, con los mismos valores de T y D50:

$$eq = \frac{4}{7} \text{ ang sen} \left[ \frac{Q_n}{K_g (H_{oeq}^2) (K_{req}^2) T} \right] \quad (4.2)$$

$$K = 1.18 (10^{-6}) (0.2^{(-1/2)}) \frac{1.56(12^2)}{0.948}$$

$$eq = \frac{4}{7} \text{ ang sen} \left[ \frac{0.00955}{(0.000625) (9.81) (0.948^2) (0.728^2) (12)} \right]$$

$$\alpha_{eq} = 9.036^\circ$$

Tambien se debe recordar que de acuerdo a la teoria del capitulo 3, el paso de material comienza cuando la playa ha evolucionado hasta la

profundidad de rompiente,  $D_r$ , en la punta de la escollera, es por esto que se debe obtener una longitud que no es la total de la estructura de protección. La profundidad considerada sera de 9.30 m, que de acuerdo al perfil de la estructura (Plano 9, Anexo 1), es hasta donde llega la punta de esta, aunque a partir de la cota -9.00 la variación es muy pequeña. El valor de la pendiente de la playa es

$$s = \frac{589}{9.3} = 63.5$$

se tomara una pendiente de 1:64

Para determinar la profundidad de rompiente, se seguira la secuela propuesta en el Manual de la CFE [5], con los siguientes valores

$$H_o' = K_r H_o = 0.728 (0.948) = 0.690 \text{ m}$$

$$L_o = 1.56 T^2 = 224.64 \text{ m}$$

$$\frac{H_o'}{L_o} = \frac{0.690}{224.64} = 0.003$$

de las Figuras 1.18 y 1.19 del mismo Manual, se obtiene

$H_r$		$H_r = 1.311 \text{ m}$
----		
$H_o'$		
$D_r$		$D_r = 2.00 \text{ m}$
----		
$H_o'$		

Por lo tanto, en base a la Fig. 5.4 sacada del Plano 9, perfil de la escollera Este, la longitud efectiva de la estructura sera

$$L = 575 - (64 - 1.5) (2.0)$$

$$L = 450.0 \text{ m}$$

Sin embargo, aun nos falta determinar el angulo de incidencia en el extremo de la escollera (a la profundidad de 9.30 m), para poder aplicar la teoria de Pernald, ya que el angulo equivalente obtenido con la formula de Larras, esta referido a la profundidad de rompiente. De acuerdo al Shore Protection Manual [4] Vol. I, se determina el angulo de incidencia en aguas profundas  $\alpha_o'$  que sera

$$\frac{H_b}{g T} = \frac{1.311}{9.81 (12)^2} = 0.0009$$

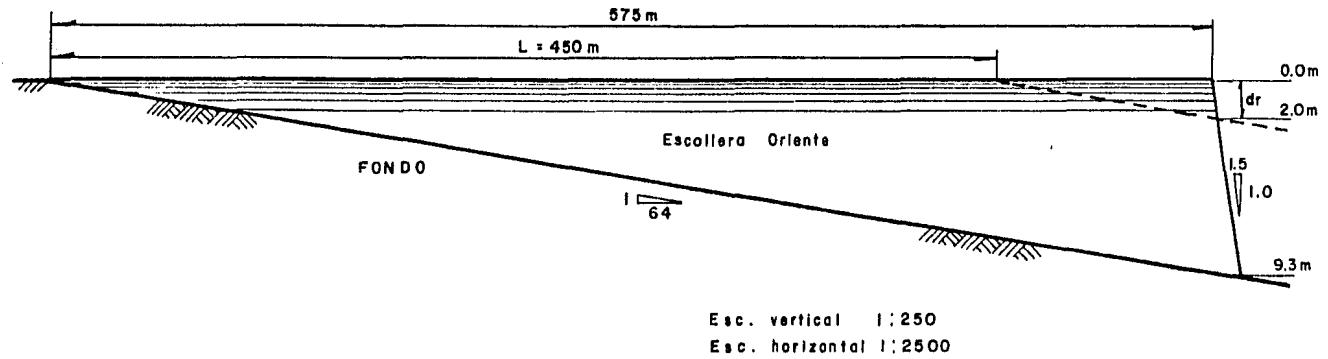


Fig. 5.4 Perfil hipotético de la Escollera Oriente de Pto. Madero, Chis.

$$\alpha_{eq} = 9.036^\circ$$

$$\therefore \alpha'_{eq} = 37^\circ \text{ (aguas prof.)}$$

A la profundidad de 9.30 m, la relacion d/Lo sera

$$\frac{d}{L_o} = 0.041$$

y la relacion d/L

$$\frac{d}{L} = 0.08442 \quad (1) \quad \therefore L = 110.16 \text{ m}$$

de acuerdo con la teoria basada en la Ley de Snell,

$$C_o = \frac{L_o}{T} = \frac{224.64}{12} = 18.72 \text{ m/s}$$

$$C = \frac{L}{T} = \frac{110.16}{12} = 9.18 \text{ m/s}$$

finalmente el angulo de incidencia en la punta de la escollera sera

$$\alpha_{eq} = \frac{C}{9.30} \sin \alpha_{oeq}$$

$$\alpha_{eq} = \frac{9.18}{9.30} \sin (37) = 0.295 \text{ rad}$$

$$\alpha_{eq} = 16.9^\circ$$

#### 5.4 Determinacion de la Vida Util de la Estructura y Evolucion de la Playa para Distintos Tiempos.

En resumen, los datos necesarios para aplicar el programa listado en el capitulo 4, con el que se obtiene la evolucion de la costa, son:

- (1).- Se refiere a la longitud de ola a la profundidad d, y no a la longitud de escollera.

Longitud de ola en aguas profundas	$L_o = 224.64$ m
Altura de ola en aguas profundas	$H_o = 0.948$ m
Periodo	$T = 12$ seg
Angulo de incidencia	$\alpha_o = 16.9^\circ$
Coefficiente de refraccion	$K_r = 0.728$
Longitud del obstaculo	$L = 450.0$ m
Profundidad	$D = 9.30$ m

A continuacion se muestran los resultados para los tiempos 5, 10, 15, 20 y 30 anos, y para el tiempo de llenado (t<sub>ll</sub>).

JR001

```
*****  
*****  
**                                     **  
**                               U. N. H. M.                               **  
**                                     **  
**                                     **  
**          FACULTAD DE INGENIERIA          **  
**                                     **  
*****  
*****
```

EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE  
ESTRUCTURAS DE PROTECCION

```
*****  
**CALCULO DE LA EVOLUCION DE LA**  
*****  
*****LINEA DE COSTA*****  
*****
```

\*\*\*INTRODUCCION DE DATOS\*\*\*

LONGITUD DE OLA L0(MTS)=224.64

ALTURA DE OLA H0(MTS)=0.548

PERIODO DE OLEAJE T0(SEG)=12.0

ANGULO DE INC. EN ROMPIENTE F0(GRADOS)=8.036

ANGULO DE INCIDENCIA F0(GRADOS)=16.9

COEF. DE REFRACCION KR=0.728

DIAMETRO MEDIO DEL MATERIAL D0(MM)=0.2

LONGITUD DEL OBSTACULO L(MTS)=450.0

PRO-UNIDAD DE CALCULO D(MTS)=9.30



CTE. DE LARRAS K=6.25238571E-04

\*\*\*TRANSPORTE LITORAL ANUAL\*\*\*

Q(M<sup>3</sup>/S)=9.55295744E-03

Q(M<sup>3</sup>/AÑO)=301263.327

CTE. DE PERNALD-CONSIDERE A=6.59675795E-03

\*\*\*\*TIEMPO DE LLENADO DEL OBSTACULO\*\*\*\*

TLL=277112564 SEG

TLL=8 AÑOS 9 MESES

LIMITES DE INFLUENCIA (MTS)

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

OXB=4119.19

EN EL ROMPEOLAS

L=450.00

DESEA SABER LA CONFIGURACION DE LA LINEA DE COSTA PARA ALGUN TIEMPO T1?

SU OPCION: SI <S> , NO <N> <RTN>

TIEMPO TOLANOS(DECIMAS)=5.0

TICSEB=157660000

\*\*\*CASO: BARRERA TOTAL\*\*\*

LIHITES DE INFLUENCIA (MTS):

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

OX=3107.22

EN EL OBSTACULO

OY=339.45

COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA

ABSCISA(X)	ORDENADA(Y)
0.00	339.45
124.29	304.05
249.58	271.18
372.87	240.75
497.16	212.77
621.44	187.17
745.73	163.87
870.02	142.77
994.31	123.77
1118.60	106.78
1242.89	91.82
1367.18	78.21
1491.47	66.41
1615.76	56.09
1740.04	47.11
1864.33	39.35
1988.62	32.69
2112.91	27.00
2237.20	22.17
2361.49	18.10
2485.78	14.63
2610.07	11.66
2734.35	9.51
2858.64	7.98
2982.93	6.01
3107.22	4.73

DESEA SABER ALGUNA OTRA CONFIGURACION?

SU OPCION: SI <S> , NO <N> , <RTN>

13

Fig. 5.5 Escollero Este, Pto. Madero.

$$Q_0 = 301,263 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$t = 5 \text{ años}$$

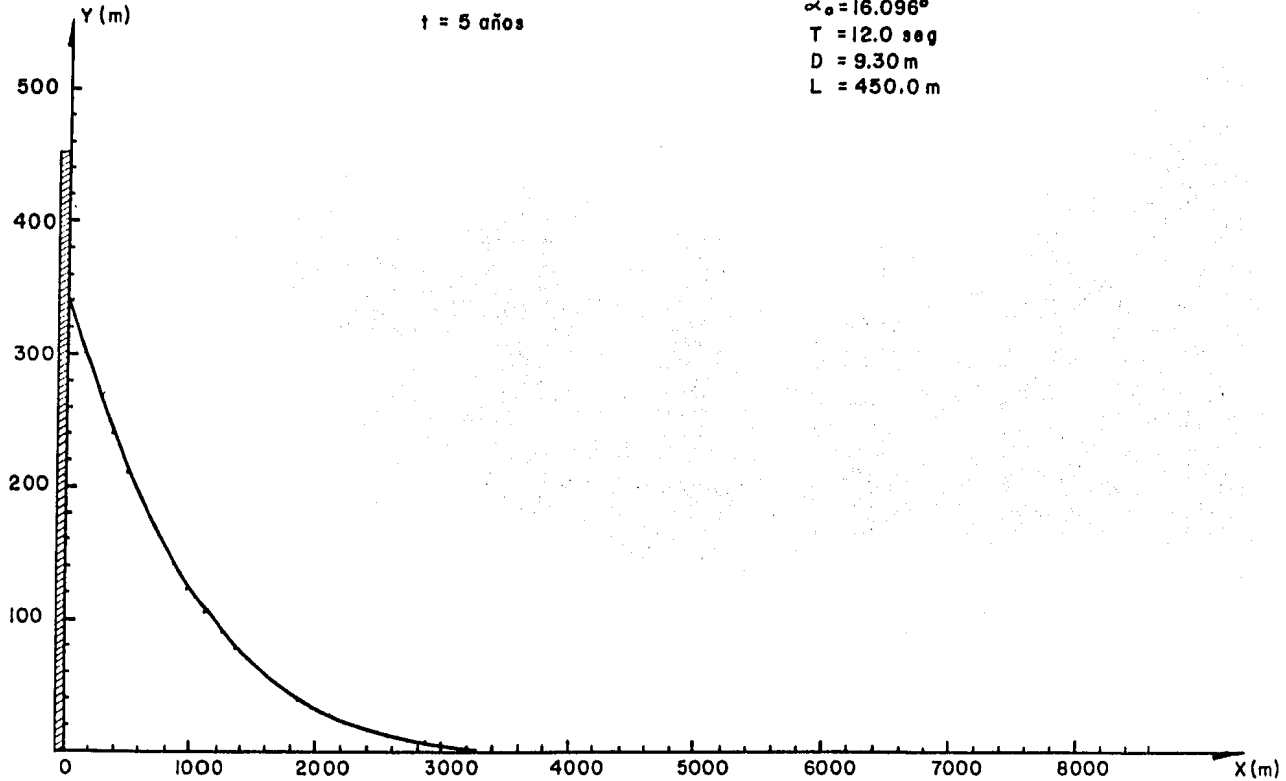
$$H_0 = 0.948 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = 16.096^\circ$$

$$T = 12.0 \text{ seg}$$

$$D = 9.30 \text{ m}$$

$$L = 450.0 \text{ m}$$



TIEMPO TICANOS.DECIMAS)=3.78

TICSES6)=276886386

\*\*\*CASO: BARRERA TOTAL\*\*\*

LIMITES DE INFLUENCIA (MTS):

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

OX=4117.51

EN EL OBSTACULO

OY=449.82

COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA

ABSCISAS(X)

ORDENADAS(Y)

0.00	449.82
164.70	402.90
329.40	359.32
494.10	319.02
658.80	281.96
823.50	248.03
988.20	217.15
1152.90	188.19
1317.60	164.02
1482.30	141.48
1647.00	121.41
1811.70	103.64
1976.40	88.00
2141.11	74.33
2305.81	62.43
2470.51	52.15
2635.21	43.32
2799.91	35.78
2964.61	29.39
3129.31	23.99
3294.01	19.47
3458.71	15.71
3623.41	12.60
3788.11	10.05
3952.81	7.96
4117.51	6.27

DESEA SABER ALGUNA OTRA CONFIGURACION?

SU OPCION: SI <S> , NO <N> <RTH>

15

Fig. 5.6 Escollera Este, Pto. Madero.

$$Q_0 = 301,263 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$t = t_{LL} = 8.78 \text{ años}$$

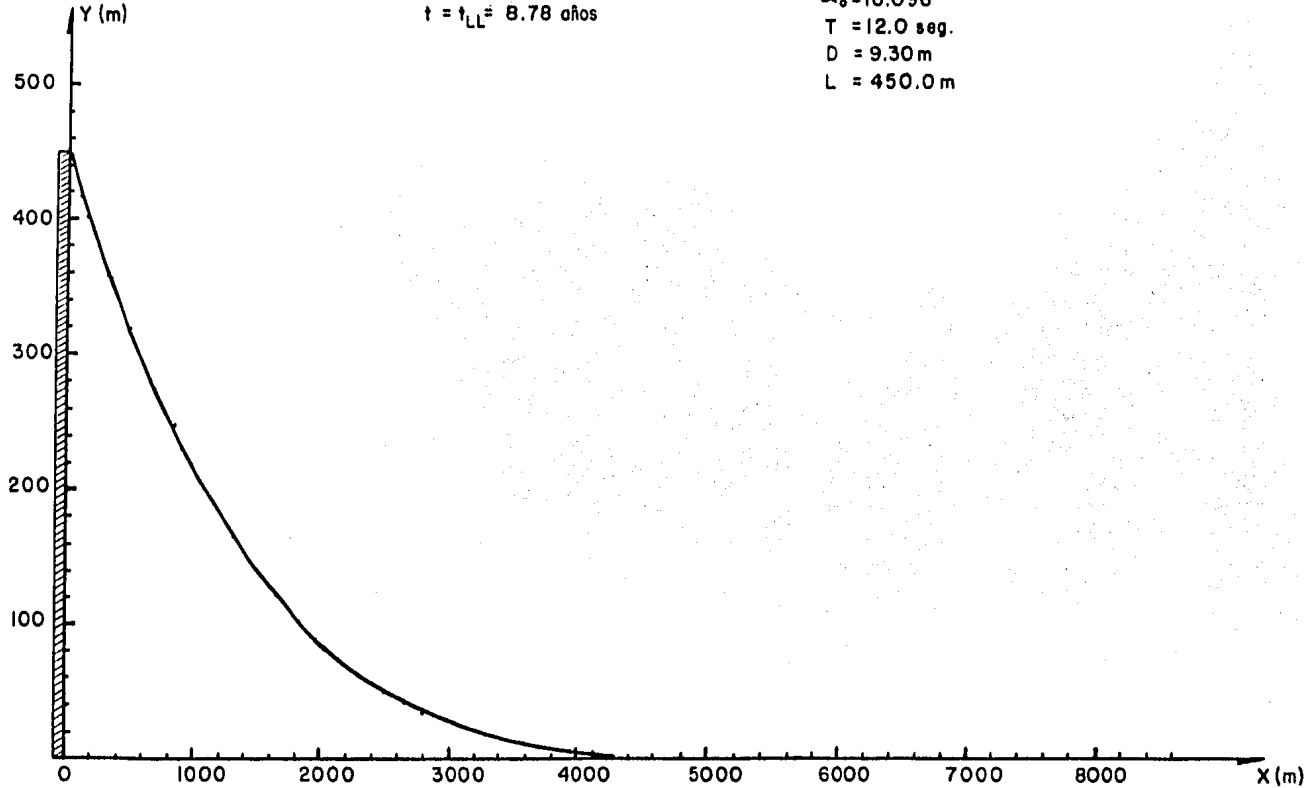
$$H_0 = 0.948 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = 16.096^\circ$$

$$T = 12.0 \text{ seg.}$$

$$D = 9.30 \text{ m}$$

$$L = 450.0 \text{ m}$$



TIEMPO TRANSD. DECOINHS)=10.0

TI(5E6)=31000000

\*\*\*CASO: BARRERA PARCIAL\*\*\*

LIMITES DE INFLUENCIA (MTS):

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

OX=4172.91

EN EL OBSTACULO

OY=450.00

COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA

ABSCISA(X)	ORDENADA(Y)
0.00	450.00
166.52	414.06
333.83	378.48
500.75	343.61
667.67	309.77
834.56	277.25
1001.50	246.35
1168.41	217.25
1335.33	190.12
1502.25	165.06
1669.16	142.21
1836.08	121.53
2003.00	103.01
2169.91	86.59
2336.83	72.16
2503.75	59.66
2670.66	48.90
2837.56	39.73
3004.50	32.00
3171.41	25.55
3338.33	20.22
3505.24	15.86
3672.16	12.33
3839.08	9.50
4005.99	7.25
4172.91	5.48

\*\*\*TRANSPORTE LITORAL QUE PASA\*\*\*

RELACION T1/TL=1.1380213

RELACION QB/Q0=.164521391

QB(M3/S)=1.57167243E-03

QB(M3/ANO)=49554.2616

Fig. 5.7 Escollera Este, Pto. Madero.

$$Q_0 = 301,263 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$t = 10 \text{ años}$$

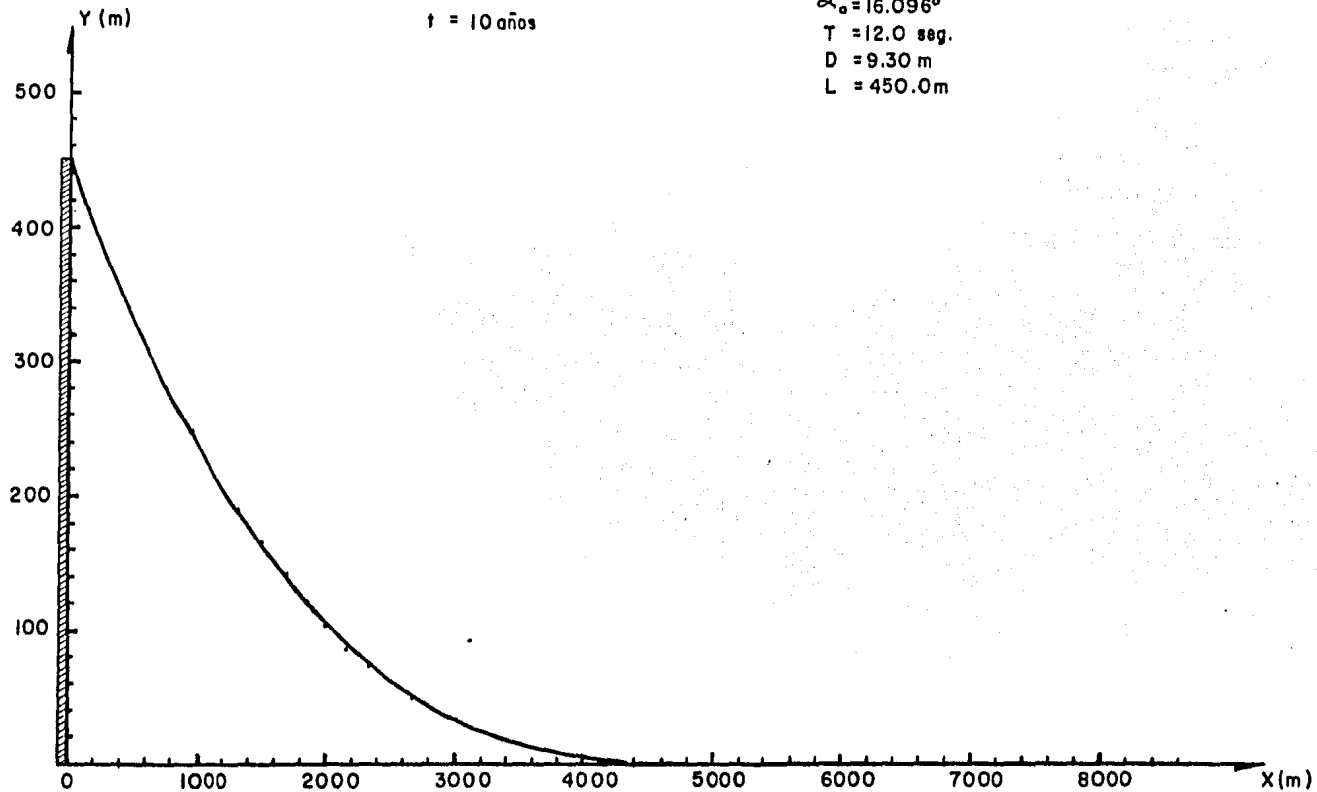
$$H_0 = 0.948 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = 16.096^\circ$$

$$T = 12.0 \text{ seg.}$$

$$D = 9.30 \text{ m}$$

$$L = 450.0 \text{ m}$$



TIEMPO TIKANOS (DECIMAS)=15.0

TIKOSB/E=473040000

\*\*\*CASO: BARRERA PARCIAL\*\*\*

LIMITES DE INFLUENCIA (MTS):

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

Ox=5521.27

EN EL OBSTACULO

Oy=450.00

COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA

ABSCISA X	ORDENADA Y
0.00	450.00
220.83	414.06
441.66	378.46
662.50	343.61
883.40	309.77
1104.25	277.28
1325.10	246.33
1545.96	217.23
1766.81	189.12
1987.66	163.08
2208.51	142.21
2429.36	121.53
2650.21	103.01
2871.06	86.56
3091.91	72.16
3312.76	59.66
3533.61	48.90
3754.46	39.73
3975.31	32.00
4196.17	25.55
4417.02	20.22
4637.87	15.86
4858.72	12.33
5079.57	8.50
5300.42	7.25
5521.27	5.45

\*\*\*TRANSPORTE LITORAL QUE PASA\*\*\*

RELACION T1/TL=1.70703195

RELACION O6/O0=1.437880774

QB(M3/S)=4.18316844E-03

QB(M3/ANU)=131920.431



Fig. 5.8 Escollera Este, Pto. Madero.

$$Q_0 = 301,263 \text{ m}^3/\text{año.}$$

$$t = 15 \text{ años.}$$

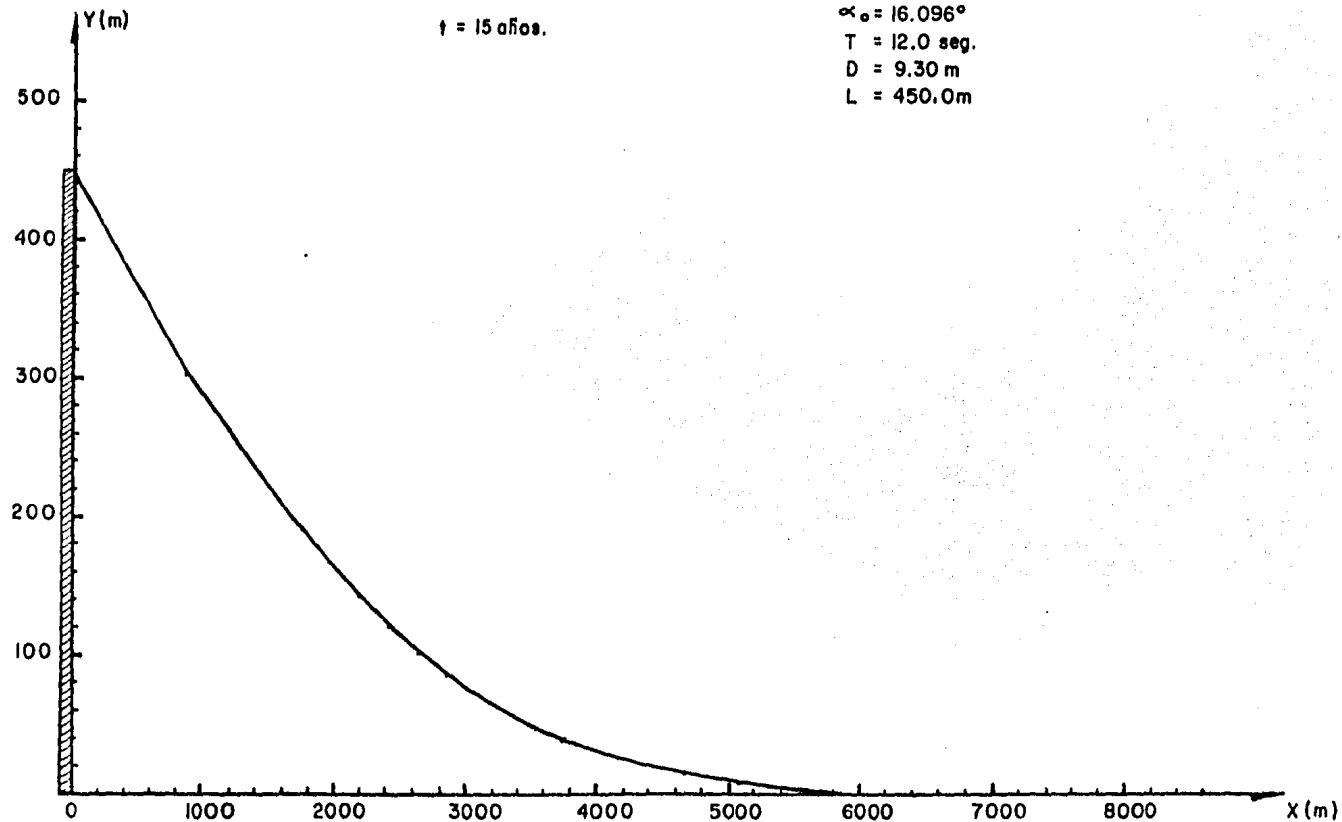
$$H_0 = 0.948 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = 16.096^\circ$$

$$T = 12.0 \text{ seg.}$$

$$D = 9.30 \text{ m}$$

$$L = 450.0 \text{ m}$$



TIEMPO T1 (AÑOS.DECIMAS)=20.0

T1 (SEG)=630720000

\*\*\*CASO: BARRERA PARCIAL\*\*\*

LIMITES DE INFLUENCIA (MTS):

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

OX=6589.67

EN EL OBSTACULO

OY=450.00

COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA

ABSCISAS(X)	ORDENADAS(Y)
0.00	450.00
121.20	414.06
327.97	378.48
781.26	343.61
1319.93	309.77
1869.92	277.26
1847.81	246.35
2111.80	217.25
2375.88	190.12
2639.87	165.08
2903.86	142.21
3167.84	121.53
3431.83	103.01
3695.82	86.59
3959.80	72.18
4223.78	59.66
4487.78	48.90
4751.76	39.73
5015.75	32.00
5279.74	25.55
5543.72	20.22
5807.71	15.66
6071.70	12.33
6335.69	9.50
6599.67	7.25
	5.49

\*\*\*TRANSPORTE LITORAL QUE PASA\*\*\*

RELACION T1/TL=2.2760426

RELACION QB/Q0=1.529536559

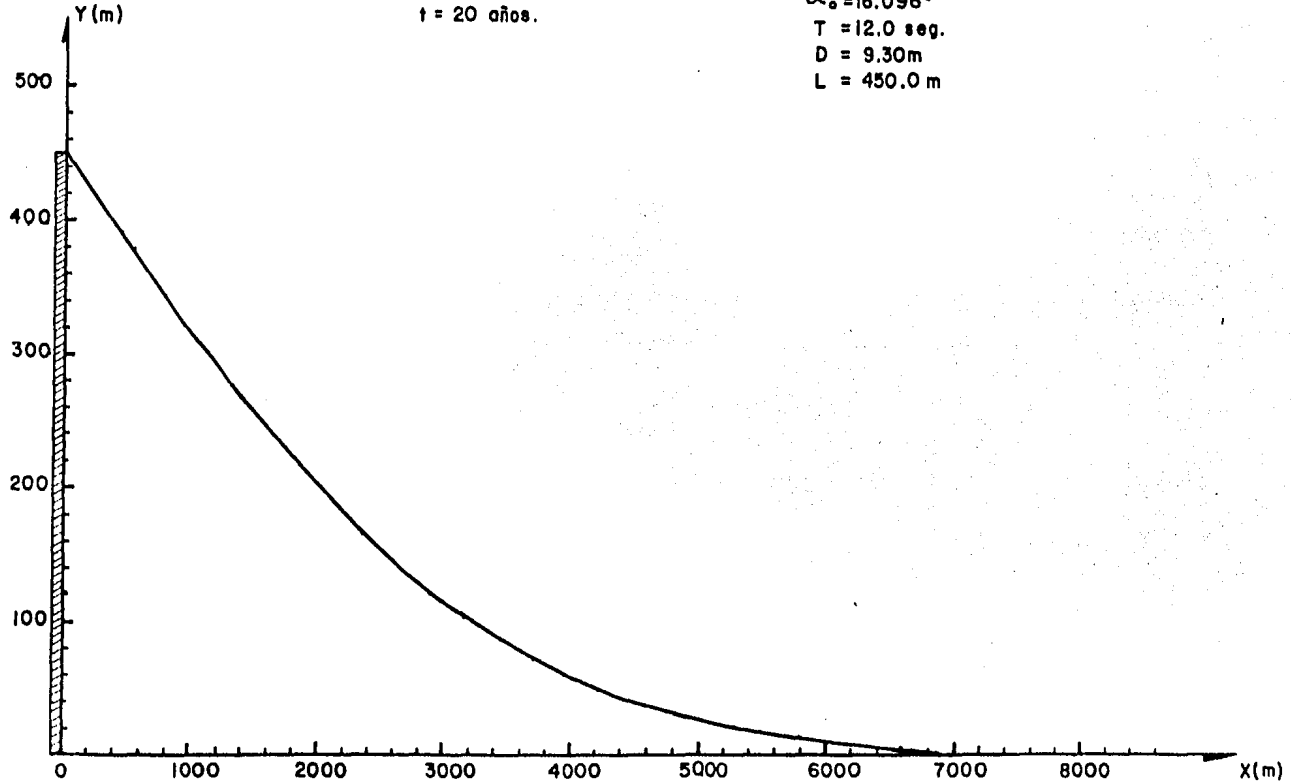
QB(M3/S)=5.05666138E-03

QB(M3/ANO)=159529.346

Fig. 5.9 Escollera Este, Pto. Madero.

$Q_0 = 301,263 \text{ m}^3/\text{año}$   
 $t = 20 \text{ años.}$

$H_0 = 0.948 \text{ m}$   
 $\alpha_0 = 16.096^\circ$   
 $T = 12.0 \text{ seg.}$   
 $D = 9.30 \text{ m}$   
 $L = 450.0 \text{ m}$



TIEMPO T1/(M3/S).DECIMAS)=30.0

TIEMPO T2= 10000

\*\*\*CASO: BARRERA PARCIAL\*\*\*

LIMITES DE INFLUENCIA (MTS):

EN LA LINEA DE COSTA ORIGINAL

OX=8348.54

EN EL OBSTACULO

OY=450.00

COORDENADAS DE LA NUEVA LINEA DE COSTA

ABSCISA(X)	ORDENADA(Y)
0.00	450.00
333.54	414.35
667.08	378.48
1001.63	343.61
1335.77	309.77
1669.71	277.26
2003.65	246.35
2337.59	217.25
2671.53	190.12
3005.48	165.08
3339.42	142.21
3673.36	121.53
4007.30	103.01
4341.24	86.59
4675.18	72.18
5009.13	59.66
5343.07	48.90
5677.01	39.73
6010.95	32.00
6344.89	25.55
6678.83	20.22
7012.78	15.86
7346.72	12.33
7680.66	9.50
8014.60	7.23
8348.54	5.45

\*\*\*TRANSPORTE LITORAL QUE PASA\*\*\*

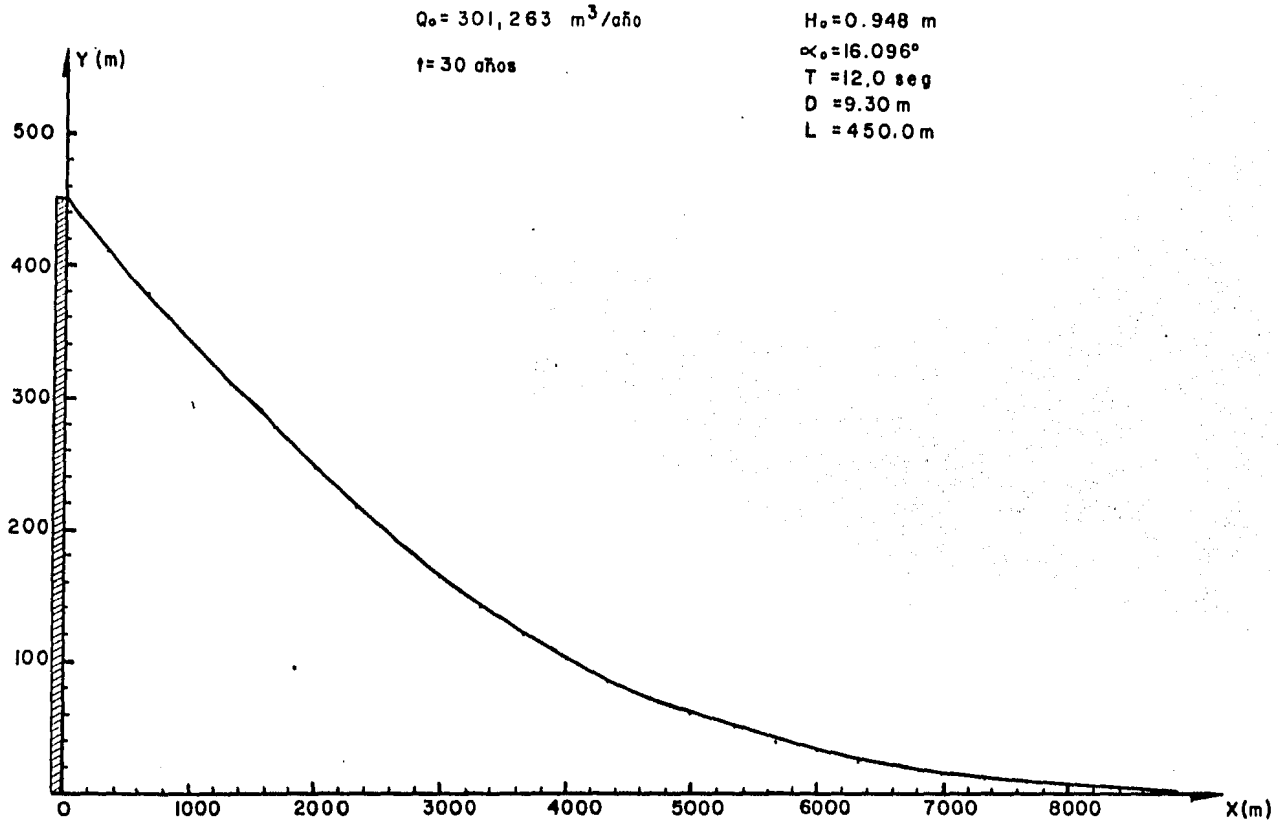
RELACION T1/TL=3.4140639

RELACION QB/Q0=.631843834

QB(M3/S)=6.03600253E-03

QB(M3\*ANO)=190351.378

Fig. 5.10 Escollera Este, Pto. Madero.



En las Fig. 5.5 a la 5.10, se puede observar como la playa ha evolucionado, y como conforme el tiempo es mayor al de llenado, la playa se extiende mas hacia el infinito. Tambien se puede ver que los valores del gasto de sedimento sobre la punta de la escollera se van incrementando. Estas cantidades de material, se llegan a sedimentar en el canal de navegacion, por lo que es el material que anualmente se tendria que dragar, para mantener el puerto con profundidades optimas. A la vez los limites hasta donde se extiende la playa, son tambien un indicio para saber hasta donde la playa se puede erosionar en el lado de arrastre abajo, lado Oeste.

Sin embargo, el resultado mas importante es el del tiempo de llenado de 8 y medio anos, el cual es muy parecido al real que como antecedente se planteo para este caso, lo cual nos lleva a pensar en que hasta aqui, todas las consideraciones hechas, fueron razonables.

Ahora bien, cuando se decidio la construccion de Puerto Madero, es posible que no se tomara en cuenta esta teoria, ya que no existen indicios o documentos que indiquen su aplicacion, ademas de ser relativamente nueva, dado que se desarrollo en la decada de los 60's, y los pocos articulos que hasta entonces habia, se encontraban en paises con gran tradicion en trabajos maritimos. Incluso a la fecha es dificil obtener informacion al respecto.

No obstante, antes de decidir la construccion del puerto, si se debieron haber hecho estudios en modelos hidraulicos de fondo movil, para determinar el comportamiento del arrastre litoral, y si se iban a utilizar expresiones matematicas, era necesario comparar resultados de algunas de ellas, y no tan solo basarse en un solo metodo analitico, como se plantea en uno de los estudios de factibilidad, que sirvio como antecedente.

### 5.5 Determinacion de la Longitud Adecuada.

Con las condiciones de oleaje equivalente obtenidas para el gasto de 300 mil metros cubicos, se debe determinar una longitud de escollera adicional, cuya vida util no sea menor a t anos, tiempo en el que podemos esperar que se presente una condicion natural de equilibrio estatico, donde la evolucion playera no tenga lugar.

Asi de, nuevo con la expresion para el tiempo de llenado (3.46)

$$t_{ll} = \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2} \quad \frac{L^2}{2}$$

$$\propto 4 Q_0$$

$$\propto 4 a$$

nuevamente se ha sustituido el valor de la constante (a) dado en (3.44), dado que se utilizara el valor del gasto de material en condiciones iniciales,  $Q_0$ . Se puede observar que el valor de  $t_{ll}$  solo

depende de L,  $\alpha_0$  y D.

Es importante tomar en cuenta que, la teoria expuesta no contempla el desarrollo de la costa en condiciones avanzadas. Es decir, no podemos partir de la configuracion de la playa una vez que alcanzo la punta de la escollera, por lo tanto se debiera fijar el tiempo de t anos, mas 8.78 anos, que fue el tiempo de llenado.

Por consiguiente

$$L = \sqrt{\frac{t_{11} \alpha_0 4Q}{\pi D}}$$

se tomaran los valores de  $\alpha_0$  y D utilizados en el inciso anterior, y posteriormente se corregiran los valores con la nueva longitud, para hacer un segundo tanteo despues.

El tiempo t representara el horizonte economico durante el cual se compararan las dos alternativas de solucion, dragar o construir. Para el presente caso se escogio de 40 anos.

Por lo tanto  $t_{11} = 40.0 + 8.78 \text{ anos} = 48.78 \text{ anos}$ .

$$\alpha_0 = 16.23 = 0.2833 \text{ rad}$$

$$D = 9.30 \text{ m}$$

$$Q = 301,263.32 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$L = \sqrt{\frac{48.78 (0.2833) (4) (301,263.32)}{\pi (9.30)}} \cdot \frac{1}{2}$$

$$L = 755 \text{ m}$$

como es una longitud efectiva, se hace la diferencia con la de 450 m, que originalmente teniamos, lo cual da un incremento en la longitud total de toda la estructura de 305 m, que deberan adicionarse a la anterior longitud total de la escollera

$$L = 575 + 305 = 880 \text{ m}$$

Para corregir la profundidad, es necesario tomarla en la punta de la escollera, por lo que habra que adicionar la distancia en planta debida al talud del morro.

$$\text{distancia} = 901.45 \text{ m}$$

Del Plano 9, la profundidad correspondiente es

$$D = 9.80 \text{ m}$$

a esta profundidad el angulo de incidencia  $\alpha_1$ , se determina a partir del angulo en aguas profundas  $\alpha_0$ , como se hizo anteriormente

$$\frac{d}{L} = \frac{9.80}{224.64} = 0.044$$

$$C_0 = 18.72 \text{ m/s}$$

$$\frac{d}{L} = 0.087$$

$$C = 9.39 \text{ m/s}$$

$$L = 112.64 \text{ m}$$

$$\alpha_0 = \frac{C}{C_0} \sin \alpha = \frac{9.39}{18.72} \sin (37)$$

$$\alpha_0 = 0.3018 \text{ rad}$$

$$\alpha_0 = 17.30$$

el tiempo de llenado sera

$$t = \frac{L}{C_0 \sin \alpha_0} = \frac{112.64}{18.72 \sin (17.30)} = \frac{112.64}{(18.72)(0.3018)} = 198.25 \text{ s}$$

$$t = 48.25 \text{ anos}$$

Por lo tanto, la longitud adicional obtenida primero, fue correcta

$$L = 305 \text{ m}$$

### 5.6 Analisis de Costos sobre Prolongacion de Escollera VS. Dragado de Mantenimiento Anual.

Para poder decidir si en Puerto Madero se requiere adicionar una longitud adicional de escollera, para que trabaje como barrera total, o bien, dragar anualmente volúmenes de material que a su vez se van incrementando, es necesario hacer un analisis de costos.

Con la nueva longitud adicional de escollera, se pueden cuantificar los volúmenes de material requeridos para la construcción de esta estructura y por consiguiente, se podran encontrar los costos de construcción de la misma. Para esto, se van a respetar las dimensiones de la seccion final de la escollera Este, pero tomando una profundidad media de 7.50 m, por lo que la seccion quedaria como se ve en la Fig.



## 5.11.

De acuerdo a esta figura, los volúmenes de material de que se compone la estructura serán:

## i) Coraza

$$\text{Perimetro Exterior} = 57.88 \text{ m}$$

$$\text{Perimetro Interior} = 46.29 \text{ m}$$

$$\text{Vol} = \frac{57.88 + 46.29}{2} \times 2.75 \times 305 = 43,686.29 \text{ m}^3$$

porosidad 37%

$$\text{Vol} = 0.63 \times 43,686.29 = 27,522.36 \text{ m}^3$$

## ii) Capa Secundaria

$$\text{Perimetro Exterior} = 46.29 \text{ m}$$

$$\text{Perimetro Interior} = 42.08 \text{ m}$$

$$\text{Vol} = \frac{46.29 + 42.08}{2} \times 1.00 \times 305 = 13,477.79 \text{ m}^3$$

porosidad 37%

$$\text{Vol} = 13,477.79 \times 0.63 = 8,491.01 \text{ m}^3$$

## iii) Nucleo

$$\text{Vol} = 209.14 \times 305 = 63,788 \text{ m}^3$$

porosidad 40%

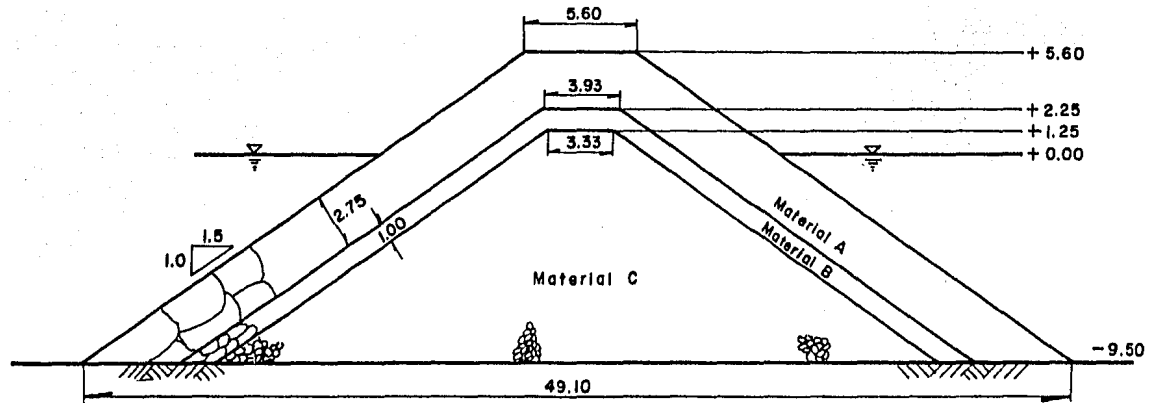
$$\text{Vol} = 0.63 \times 63,788 = 38,272.8 \text{ m}^3$$

$$\text{VOLUMEN TOTAL} = 74,286.2 \text{ m}^3$$

Si tomamos un peso específico de  $\rho = 2.6 \text{ Ton/m}^3$

$$\text{PESO TOTAL} = 193,144 \text{ Ton}$$

Para evaluar el costo de construcción de una estructura compuesta de elementos naturales, se deben tomar en cuenta aspectos como: explotación del material, distancia del banco al lugar de la obra,



Material A	W = 7 ton.
Material B	W = 0.7 ton.
Material C	W = 35 ton.

e s c. 1 : 250  
 acotaciones en m.

Fig. 5.II Sección transversal de la longitud adicional de la Escollera Este de Pto. Madero, Chls.

forma de traslado y colocacion. Asi, en base a una estimacion hecha en Mayo de 1985, se tomara un costo de \$ 2,000.00/Ton, correspondiente a un banco de material que estuviera a 20 Km del lugar de interes.

En cuanto a el costo de dragado, este depende del tipo de material por dragar, de la profundidad a la que se draga y tipo de draga utilizada. Por lo tanto, tambien para el mes de Mayo de 1985, el costo en una zona como la de Puerto Madero se estimo de \$500.00/m<sup>3</sup>, que corresponde a un dragado de materiales tipo A y B (suelos y un poco finos) en profundidades de 9.0 m.

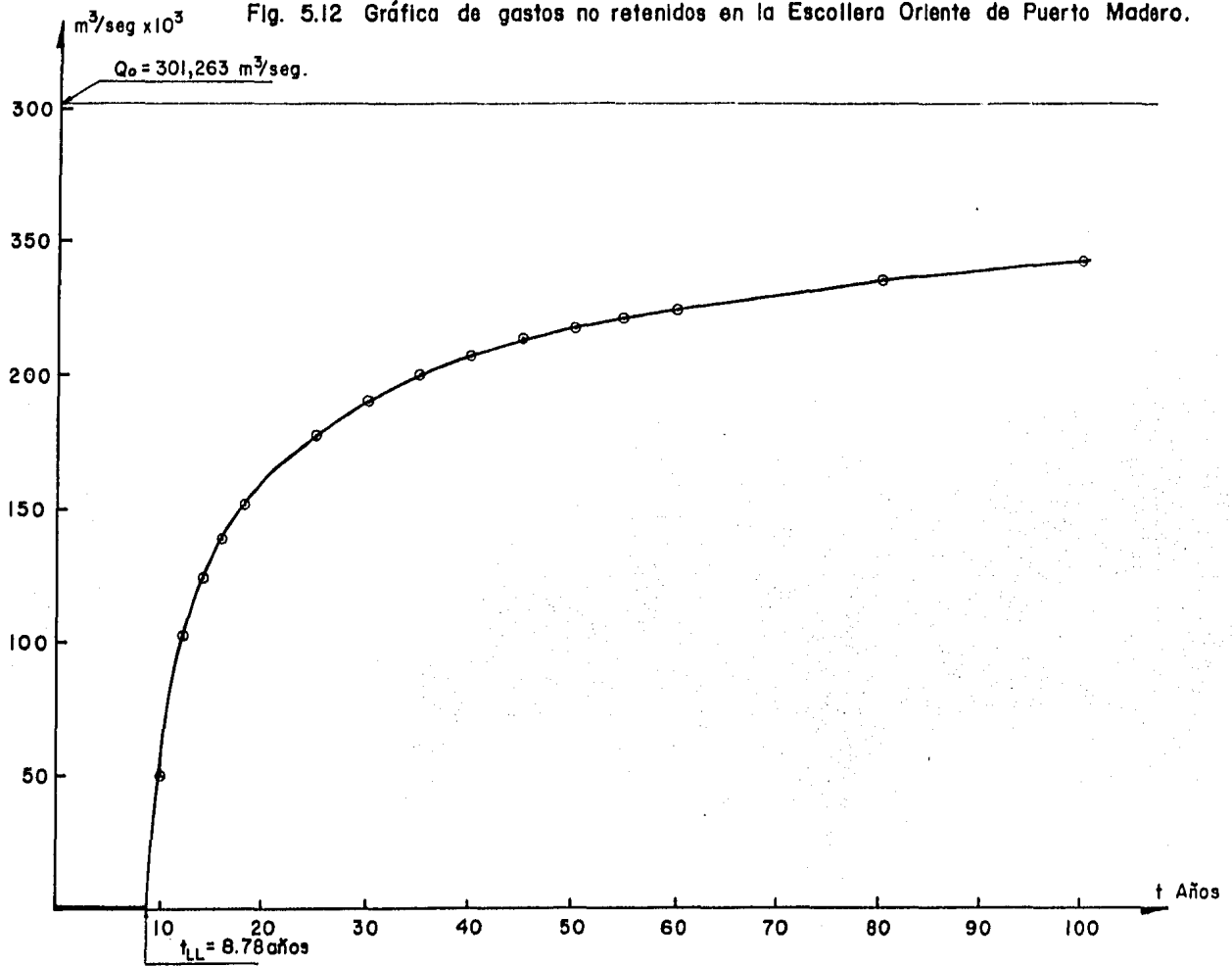
El analisis se hara sobre el valor presente para diferentes tasas de interes, como se describio en los capitulos 3 y 4, para un periodo de 40 anos tiempo que escogio como horizonte economico y por lo tanto es el tiempo que durara la estructura funcionando. A su vez, se tomara los casos en que la escollera se puede construir en dos y tres etapas. En el primer caso, una primera etapa a partir del ano cero que sera el de 8.78 anos, se construira la mitad de la longitud adicional requerida y posteriormente la segunda mitad de longitud. Para el segundo caso, se procede en el ano cero con una tercera parte y posteriormente en periodos iguales de tiempo se contruyen las otras dos terceras partes. Ademas, para cuantificar los volumenes de dragado anuales se realizo una grafica de Q-t (ver Fig. 5.12), utilizando la expresion (3.68) y con la Tabla 5.4.

$$Q_B = 0.638 \left[ \frac{Q_0}{(t/t_{11} - 0.38)^{1/2}} \right]$$

t	t / t <sub>11</sub>	Q <sub>B</sub> / Q <sub>0</sub>	Q <sub>B</sub> (m <sup>3</sup> /ano)
8.79	1.00	0	0
10	1.138	0.165	49,564
12	1.365	0.342	103,152
14	1.593	0.414	124,652
16	1.821	0.462	139,188
18	2.048	0.505	152,193
20	2.276	0.529	159,529
25	2.845	0.590	177,872
30	3.414	0.632	190,351
35	3.983	0.664	200,038
40	4.552	0.687	206,968
45	5.121	0.708	213,294
50	5.690	0.723	217,853
55	6.259	0.737	221,991
60	6.828	0.748	225,557
80	9.104	0.784	236,190
100	11.380	0.807	243,311

Tabla 5.4 Valores de Q-t para la escollera Oriente de Puerto Madero.

Fig. 5.12 Gráfica de gastos no retenidos en la Escollera Oriente de Puerto Madero.



En la primera posibilidad, para conocer el tiempo en que se debera construir la segunda etapa de escollera, se determina que tiempo aproximadamente duraria la escollera con una longitud de 152.5 m. Por lo tanto, se usara de nuevo la expresion de  $t_{II}$ , con una profundidad promedio de 9.50 m y las condiciones de oleaje ya determinadas,

$$t_{II} = \frac{L \cdot II \cdot D}{0.4 \cdot Q_0} = \frac{(602.5) (3.1416) (9.50)}{(0.2833) (4) (301,276.28)}$$

$$t_{II} = 31.73 \text{ años}$$

Se podria contruir el segundo tramo en el año 30, o sea a 21 años despues del año cero, que como se dijo es el de 8.78 años.

En el caso de construir la escollera en tres etapas, en el año cero se construirian 101.6 m y despues a cada 13 años se harian las otras dos terceras partes de la longitud de escollera. Ademas, es preciso aclarar que con estas nuevas longitudes de 101.6 m se debe tener cuidado de no permitir que la escollera se vuelva a saturar de sedimento en un periodo de tiempo menor al programado para adicionar otra longitud mas. En este caso, de acuerdo con la expresion del tiempo de llenado, con una longitud de 101.6 m, la estructura puede durar mas de 13 años, por lo que este periodo de tiempo fijado es correcto.

Las tablas 5.5 y 5.6 muestran el comportamiento de los costos de dragado y los de construccion de la escollera, para distintas tasas. Se tienen dos columnas por cada tasa que muestran la suma acumulativa del valor presente de dragado y de construccion. Para esto, se utilizo la expresion (3.70) para actualizar costos.

En Puerto Madero, resulto que la Tasa Interna de Retorno para cada caso fue de

- |                             |          |
|-----------------------------|----------|
| a) 2 etapas de construccion | TIR= 26% |
| b) 3 etapas de construccion | TIR= 35% |

Ahora bien, si se quisiera hacer una comparacion con las TIR's que maneja el Estado, las cuales son mucho mas bajas, del orden de 12%, habria que determinar los beneficios y desventajas que implicaria construir o no una longitud de escollera adicional, por lo que se necesitaria hacer todo un analisis economico mas profundo, en el que todas las aplicaciones hechas aqui a la teoria de Pernald-Considere, contemplarian tan solo la parte fisica y tecnica del analisis, y una idea somera sobre los costos que implicarian cada una de las alternativas. De momento este trabajo no pretende profundizar mas sobre ese posible analisis economico.

Sin embargo, si se puede afirmar que en Puerto Madero, la decision a tomar dependera definitivamente de las condiciones economicas del

Tabla 5.5 Actualización de Costos de Dragado VS. Costos de Construcción de Escollera para distintas tasas de interés (caso de dos etapas de construcción).  
( MILLONES DE PESOS )

Año	Vol Dragado m <sup>3</sup>	Costo de Dragado	Costo Const Escollera	i = 15%		i = 20%		i = 25%		i = 27%		i = 28%		
				VP C.Drg	VP C.Esc	VP C.Drg	VP C.Esc	VP C.Drg	VP C.Esc	VP C.Drg	VP C.Esc	VP C.Drg	VP C.Esc	
0	0	0	193.144	0	193.144	0	193.144	0	193.144	0	193.144	0	193.144	
1	45,000	22.50	-	19.67	-	18.75	-	18.00	-	17.72	-	17.86	-	
2	67,000	33.50	-	44.90	-	42.01	-	39.44	-	38.49	-	38.96	-	
3	98,000	49.00	-	77.44	-	70.35	-	64.53	-	62.41	-	63.45	-	
4	110,000	55.00	-	108.89	-	96.89	-	87.06	-	83.55	-	85.27	-	
5	121,000	60.50	-	138.97	-	121.31	-	106.88	-	101.86	-	104.33	-	
6	129,500	64.75	-	166.96	-	142.89	-	123.83	-	117.29	-	120.51	-	
7	136,500	68.25	-	192.62	-	161.94	-	138.17	-	130.10	-	134.04	-	
8	143,000	71.50	-	215.98	-	178.57	-	150.16	-	140.67	-	145.30	-	
9	149,000	74.50	-	237.16	-	193.01	-	160.16	-	149.33	-	154.61	-	
10	154,000	77.00	-	256.20	-	205.44	-	168.43	-	156.39	-	162.24	-	
11	159,000	79.50	-	273.29	-	216.14	-	175.26	-	162.12	-	168.50	-	
12	163,500	81.75	-	288.57	-	225.31	-	180.88	-	166.77	-	173.60	-	
13	167,500	83.75	-	302.18	-	233.14	-	185.48	-	170.51	-	177.75	-	
14	171,000	85.50	-	314.87	-	239.80	-	189.24	-	173.52	-	181.12	-	
15	174,000	87.00	-	324.96	-	245.45	-	192.30	-	175.94	-	188.83	-	
16	177,000	88.50	-	334.42	-	250.23	-	194.79	-	177.84	-	186.02	-	
17	180,500	90.25	-	342.90	-	254.30	-	196.83	-	179.42	-	187.80	-	
18	183,000	91.50	-	350.20	-	257.73	-	198.47	-	180.66	-	189.22	-	
19	185,000	92.75	-	356.71	-	260.53	-	199.81	-	181.65	-	190.37	-	
20	187,500	93.75	-	362.44	-	263.08	-	200.89	-	182.43	-	191.30	-	
21	189,500	94.75	193.144	367.48	203.40	265.14	197.34	201.76	194.93	183.06	194.42	192.03	194.67	
22	192,500	96.25	-	371.92	-	266.08	-	202.47	-	183.50	-	192.63	-	
23	194,000	97.00	-	375.82	-	268.34	-	203.04	-	183.96	-	193.11	-	
24	196,000	98.00	-	379.24	-	269.58	-	203.51	-	184.27	-	193.49	-	
25	198,000	99.00	-	382.25	-	270.62	-	203.88	-	184.52	-	193.80	-	
26	199,500	99.75	-	384.89	-	271.49	-	204.18	-	184.70	-	194.04	-	
27	201,500	100.75	-	387.20	-	272.22	-	204.43	-	184.88	-	194.24	-	
28	203,000	101.50	-	389.23	-	272.84	-	204.62	-	185.01	-	194.39	-	
29	204,500	102.25	-	391.00	-	273.85	-	204.78	-	185.11	-	194.52	-	
30	205,500	102.75	-	392.75	-	273.79	-	204.91	-	185.19	-	194.62	-	
31	207,000	103.50	-	393.91	-	274.15	-	205.01	-	185.25	-	194.70	-	
32	208,500	104.25	-	395.10	-	274.45	-	205.09	-	185.30	-	194.76	-	
33	209,500	104.75	-	396.14	-	274.71	-	205.16	-	185.34	-	192.82	-	
34	210,500	105.25	-	397.05	-	274.92	-	205.21	-	185.37	-	194.86	-	
35	211,500	105.75	-	397.85	-	275.10	-	205.26	-	185.39	-	194.89	-	
36	212,500	106.25	-	398.54	-	275.25	-	205.29	-	185.41	-	194.91	-	
37	213,500	106.75	-	399.25	-	275.30	-	205.32	-	185.43	-	194.94	-	
38	214,500	107.25	-	399.65	-	275.48	-	205.34	-	185.44	-	194.95	-	
39	215,500	107.75	-	400.14	-	275.57	-	205.36	-	185.45	-	194.96	-	
40	216,500	108.25	-	400.54	-	275.05	-	205.37	-	185.46	-	194.97	-	
TOTAL				400.54	203.40	275.05	197.34	205.37	194.93	185.46	194.42	194.97	194.67	
OPCION				Construir	Construir	Construir	Dragar	T I R						

Tabla 5.6 Actualización de Costos de Dragado VS. Costos de Construcción de Escollera para distintas tasas de interés (caso de tres etapas de construcción).  
( MILLONES DE PESOS )

Ano	Vol Dragado m3	Costo de Dragado	i=25%		i=30%		i=35%		i=40%		
			Costo Const/ Escollera	IVP C. Drg. IVP C. Esc.	IVP C. Drg. IVP C. Esc.	IVP C. Drg. IVP C. Esc.	IVP C. Drg. IVP C. Esc.				
0	0	0	128.763	0	128.76	0	128.76	0	128.76	0	128.76
1	45,000	22.50	-	18.00	-	17.31	-	16.67	-	16.07	-
2	67,000	33.50	-	39.44	-	37.13	-	35.05	-	33.16	-
3	98,000	49.00	-	64.53	-	59.43	-	54.96	-	51.05	-
4	110,000	55.00	-	87.06	-	78.69	-	71.52	-	65.34	-
5	121,000	60.50	-	106.88	-	94.98	-	85.01	-	76.59	-
6	129,500	64.75	-	123.85	-	108.40	-	95.71	-	85.19	-
7	136,500	68.25	-	138.17	-	119.28	-	104.06	-	91.66	-
8	143,000	71.50	-	150.16	-	128.04	-	110.54	-	96.51	-
9	149,000	74.50	-	160.16	-	135.07	-	115.55	-	100.11	-
10	154,000	77.00	-	168.43	-	140.69	-	119.40	-	102.77	-
11	159,000	79.50	-	175.26	-	145.12	-	122.33	-	104.74	-
12	163,500	81.75	-	180.88	-	148.63	-	124.56	-	106.18	-
13	167,400	83.75	128.763	185.88	135.84	451.40	133.01	126.25	131.37	107.23	130.39
14	171,000	85.50	-	189.24	-	153.57	-	127.53	-	108.00	-
15	174,000	87.00	-	192.30	-	155.27	-	128.50	-	108.56	-
16	177,000	88.50	-	194.79	-	156.60	-	129.23	-	108.97	-
17	180,500	90.25	-	196.83	-	157.64	-	129.77	-	109.26	-
18	183,000	91.30	-	198.47	-	158.45	-	130.19	-	109.48	-
19	185,000	92.75	-	199.81	-	159.09	-	130.50	-	109.63	-
20	187,500	93.75	-	200.89	-	159.58	-	130.73	-	109.75	-
21	189,500	94.75	-	201.76	-	159.97	-	130.90	-	109.83	-
22	192,500	96.25	-	202.47	-	160.27	-	131.03	-	109.89	-
23	194,000	97.00	-	203.04	-	160.50	-	131.13	-	109.93	-
24	196,000	98.00	-	203.51	-	160.68	-	131.20	-	109.96	-
25	198,000	99.00	-	203.88	-	160.82	-	131.26	-	109.98	-
26	199,500	99.75	128.763	204.18	136.23	160.93	133.15	131.30	131.42	110.00	130.41
27	201,500	100.75	-	204.43	-	161.01	-	131.33	-	110.01	-
28	203,000	101.50	-	204.62	-	161.08	-	131.35	-	110.02	-
29	204,500	102.25	-	204.78	-	161.13	-	131.37	-	110.02	-
30	205,500	102.75	-	204.91	-	161.17	-	131.38	-	110.03	-
31	207,000	103.50	-	205.01	-	161.20	-	131.39	-	110.03	-
32	208,500	104.25	-	205.09	-	161.22	-	131.40	-	110.03	-
33	209,500	104.75	-	205.16	-	161.24	-	131.40	-	110.03	-
34	210,500	105.25	-	205.21	-	161.25	-	131.41	-	110.03	-
35	211,500	105.75	-	205.76	-	161.26	-	131.41	-	110.03	-
36	212,500	106.25	-	205.29	-	161.27	-	131.41	-	110.03	-
37	213,500	106.75	-	205.32	-	161.28	-	131.41	-	110.04	-
38	214,500	107.25	-	205.34	-	161.28	-	131.41	-	110.04	-
39	215,500	107.75	-	205.36	-	161.29	-	131.41	-	110.04	-
40	216,500	108.25	-	205.37	-	161.29	-	131.41	-	110.04	-
TOTAL				205.37	136.23	161.29	133.15	131.41	131.42	110.04	130.41
OPCION				Construir		Construir		T I R		Dragar	

pais. Aparentemente, sin hacer el analisis de costos hecho aqui, se optaria por dragar, ya que de momento no se tendrian gastos como los que implica construir mas escollera. Pero con base en los valores de las TIR's obtenidas, que no se pueden considerar tan bajas, resulta que en el transcurso del tiempo es mucho mejor construir, pudiendose romper el habito de optar siempre por dragar en situaciones como la de Puerto Madero.

De esta manera una teoria como la de Pernald-Considere, puede servir de base para fundamentar el periodo de vida util de una estructura de proteccion, y en caso de haber llegado al final de esta, saber que acciones tomar con respecto a dicha estructura.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- 1) De acuerdo con lo que se ha podido observar a lo largo de este trabajo, las costas se encuentran en un constante cambio, debido principalmente al oleaje que incide sobre de ellas. El arrastre de sedimentos que el oleaje provoca, es el principal motivo de dicho cambio, y se presenta de una manera muy compleja y distinta para cada zona costera. Sin embargo, a pesar de ese continuo cambio, las costas presentan formaciones bien definidas y con características morfológicas en comun, por lo que se han podido clasificar por su forma. Además, el arrastre de sedimentos causante del transporte litoral, puede llegar a ser un problema importante en los problemas portuarios.
  
- 2) Es recomendable que para evaluar los volúmenes de material que el transporte litoral provoca, se recurra a mediciones directas en el lugar de interés, ya que como se menciona es un fenómeno muy particular de cada zona, y a pesar de que existen numerosas expresiones matemáticas para cuantificar el transporte litoral, resultado casi siempre de experiencias en laboratorio, estas se han desarrollado bajo ciertas consideraciones teóricas simplistas y muy propias de un caso en particular que en su momento se haya estudiado, por lo que los resultados que puedan obtenerse en su empleo, diferirán unos de otros en gran medida. Por lo tanto, al recurrir a expresiones teóricas, se debe hacer con poca confiabilidad. Una manera confiable para cuantificar el arrastre litoral, cuando se trata de crear un puerto en una costa y que requiere de estructuras externas de protección, es construyendo un espigón de prueba que permita ver la dirección y volumen netos por año, en el sitio donde se piensa ubicar el puerto. El espigón de prueba puede pasar posteriormente a ser parte del rompeolas o escollera por construir. El tiempo que aparentemente se pierde al observar el comportamiento del transporte litoral, se justifica al elegir la longitud correcta de la estructura de protección para evitar que se azolve en el lado de arrastre arriba en un periodo

de tiempo corto, provocando que se tenga que dragar constantemente para mantener profundidades adecuadas en el interior del puerto.

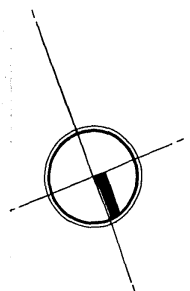
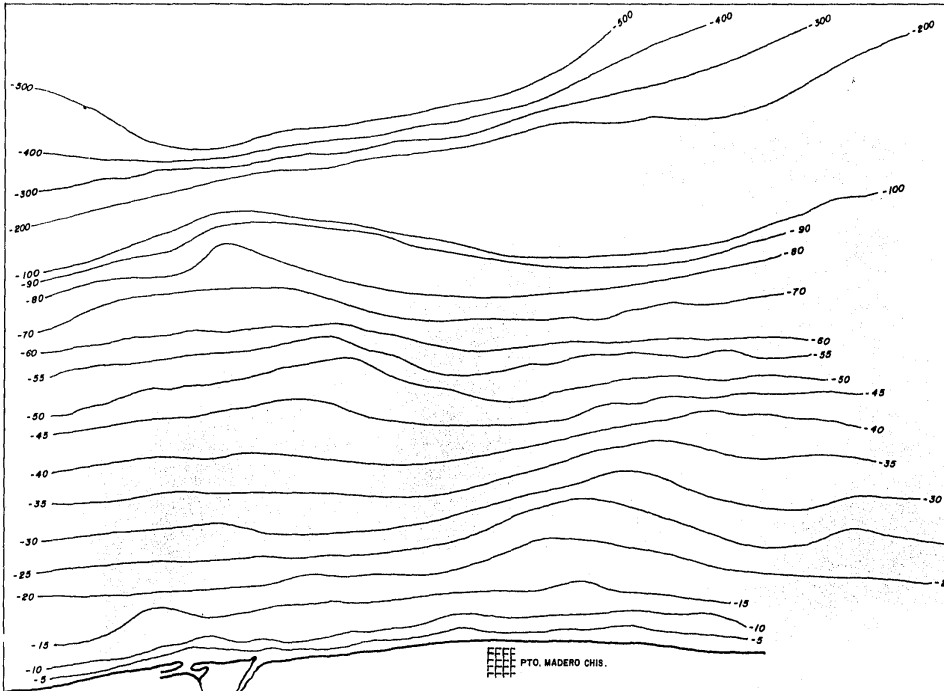
- 3) El desarrollo de la teoria de Pernald-Considerere se hizo bajo hipotesis muy simples y muy distantes de cumplirse en la realidad, ya que dificilmente encontraremos condiciones de oleaje fijas y playas infinitamente rectas o cuando menos en distancias considerables, puesto que estas estan en continuo cambio. No obstante, su valor estriba en el hecho de ser una teoria sencilla y que permite evaluar manualmente la evolucion de una playa alterada por una estructura de proteccion, aunque aqui se haya hecho con el auxilio de una microcomputadora. Tambien la teoria puede ser aplicada para conocer la erosion en el lado de arrastre abajo de la estructura, dado que el perfil y configuracion de la playa serian una imagen contraria del caso de acumulacion, que fue el que se estudio aqui.
- 4) En el caso de Puerto Madero, se ha verificado que los problemas de sedimentacion debidos fundamentalmente al fuerte transporte litoral existente en la zona, son un factor importante en la actual situacion de inactividad del puerto. A traves del metodo de Pernald Considerere y como una aplicacion adicional, se ha analizado la conveniencia de prolongar una longitud adicional la Escollera Oriente de cuando menos 305 m, para que permanezca aproximadamente 40 anos mas, libre de problemas de azolve el puerto.
- 5) Finalmente, existe la necesidad de que cada vez que se pretenda realizar un puerto maritimo, se hagan de antemano modelos hidraulicos no tan solo de agitacion, sino tambien de fondo movil para poder apreciar los efectos del transporte litoral sobre estructuras de proteccion y canales de navegacion. Ademas queda abierta la posibilidad de verificar la teoria de Pernald-Considerere en modelos experimentales de laboratorio, y en general un estudio aun mas profundo del fenomeno de transporte litoral.

## 7. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.

- 1.- Per Bruun. Port Engineering. Ed Gulf Publish Co. U.S.A. 1978.
- 2.- Del Moral Carro Rafael. Ingenieria de Costas. Espana, 1978.
- 3.- Del Moral Carro Rafael y Berenguer Jose Ma. "Planificacion y Explotacion de Puertos, Ingenieria Oceanografica y de Costas". Tomo I. Ed. C.E.E.O.P., Espana 1980.
- 4.- Coastal Engineering Research Center (CERC). "Shore Protection Manual. U.S.A. 1973.
- 5.- Comision Federal de Electricidad (CFE). Manual de Diseno de Obras Civiles". Seccion de Hidrotecnia, No. A.2.13. "Hidraulica Maritima". Mexico 1981.
- 6.- Larras J. Course d'Hydraulique Maritime et de Travaux Maritimes. Paris 1961.
- 7.- Bakker W.T. The Dynamics of a Cost with a Groyne System. Coastal Engineering Conference, 1970.
- 8.- Bakker W.T. Litoral Drift in the Surf Zone. Rijkswatestaat, Directorate for Hydraulic Research, Departement for Coastal Research. 1970.
- 9.- Massie W.W. Coastal Engineering. Vol II. "Harbor and Beach Problems". Cap 20. Delft University of Technology. The Netherlands 1978.
- 10.- Le Mehaute B. and Goldate M. Mathematical Modeling of Shoreline Evolution. C.E.R.C. Misc. Report No 77-10. 1977
- 11.- Baule Bernard. Tratado de Matematicas Superiores para Ingenieros y Fisicos. Vol I y II. Ed. Labor. Madrid, 1949.

- 12.- U.S. Naval Office. Sea and Swell Charts. U.S.A., 1964.
- 13.- Comision Nacional Coordinadora de Puertos. Propuesta para la Rehabilitacion Fisica y Operativa de Puerto Madero, Chiapas. Estudio interno elaborado en Octubre de 1984. Mexico D.F.
- 14.- Briseno Carmona M. Alfredo. "Estudio para la Rehabilitacion Fisica de Puerto Madero, Chiapas. Tesis de Licenciatura presentada en la Facultad de Ingenieria, UNAM. Enero 1985.
- 15.- Murillo B. Jose Luis. Apuntes de la materia de Ingenieria Maritima. Catedra impartida en la Facultad de Ingenieria, UNAM. 1984.

## ANEXO 1



**EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION**

**UNAM**

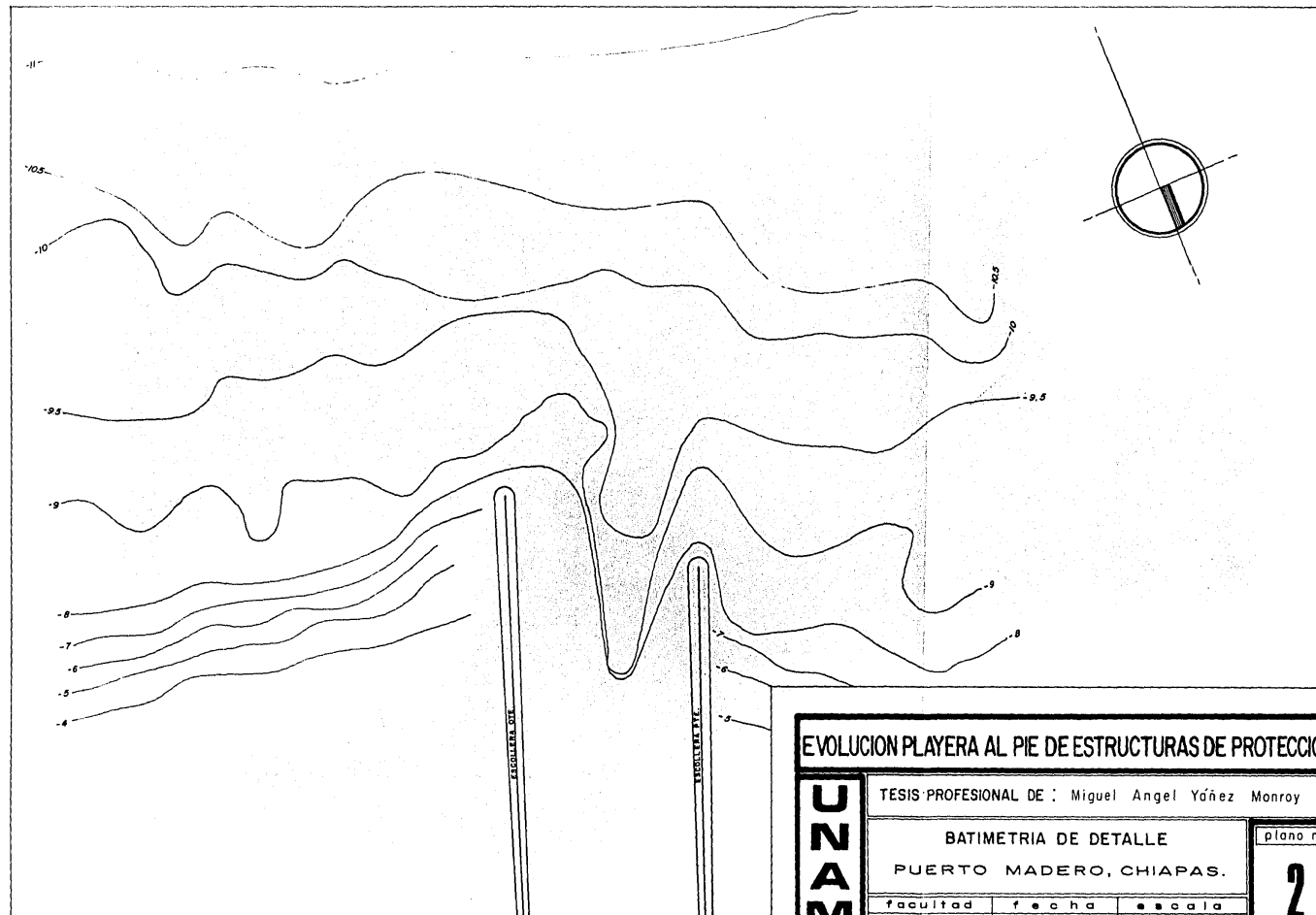
TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yañez Monroy

BATIMETRIA GENERAL  
 PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no.

**1**

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 175 000



### EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION

TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yáñez Monroy

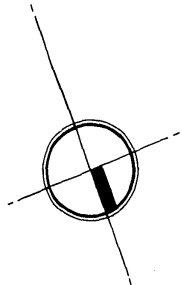
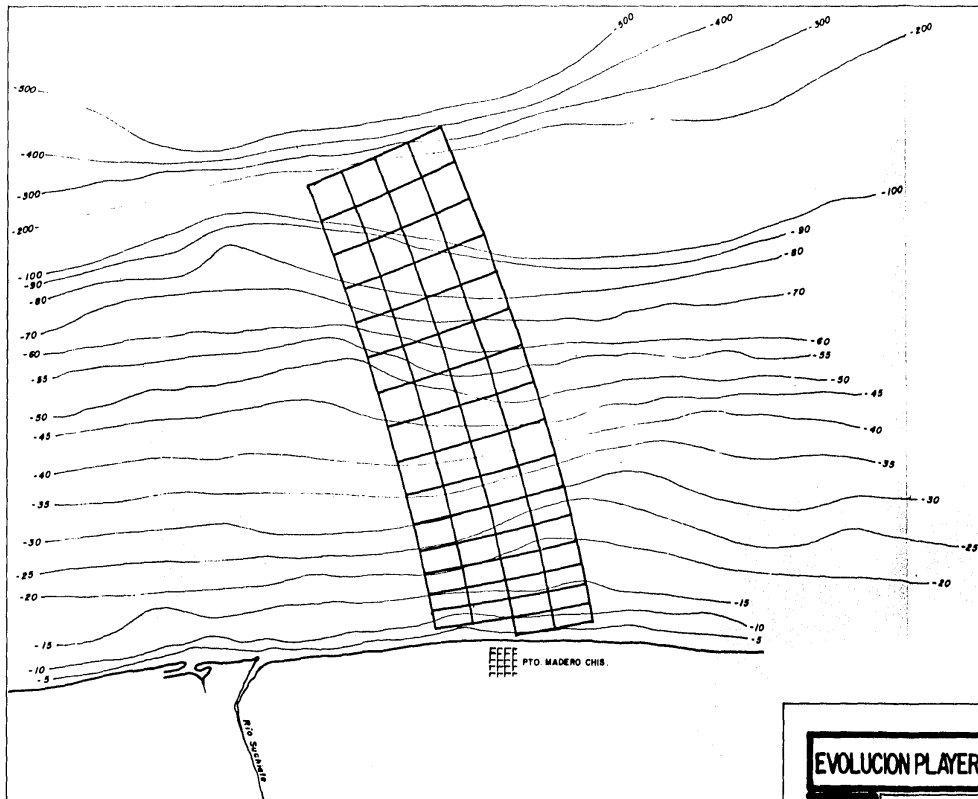
BATIMETRIA DE DETALLE

PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no.

2

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 5000



**EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION**

**MANU**

TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yañez Monroy

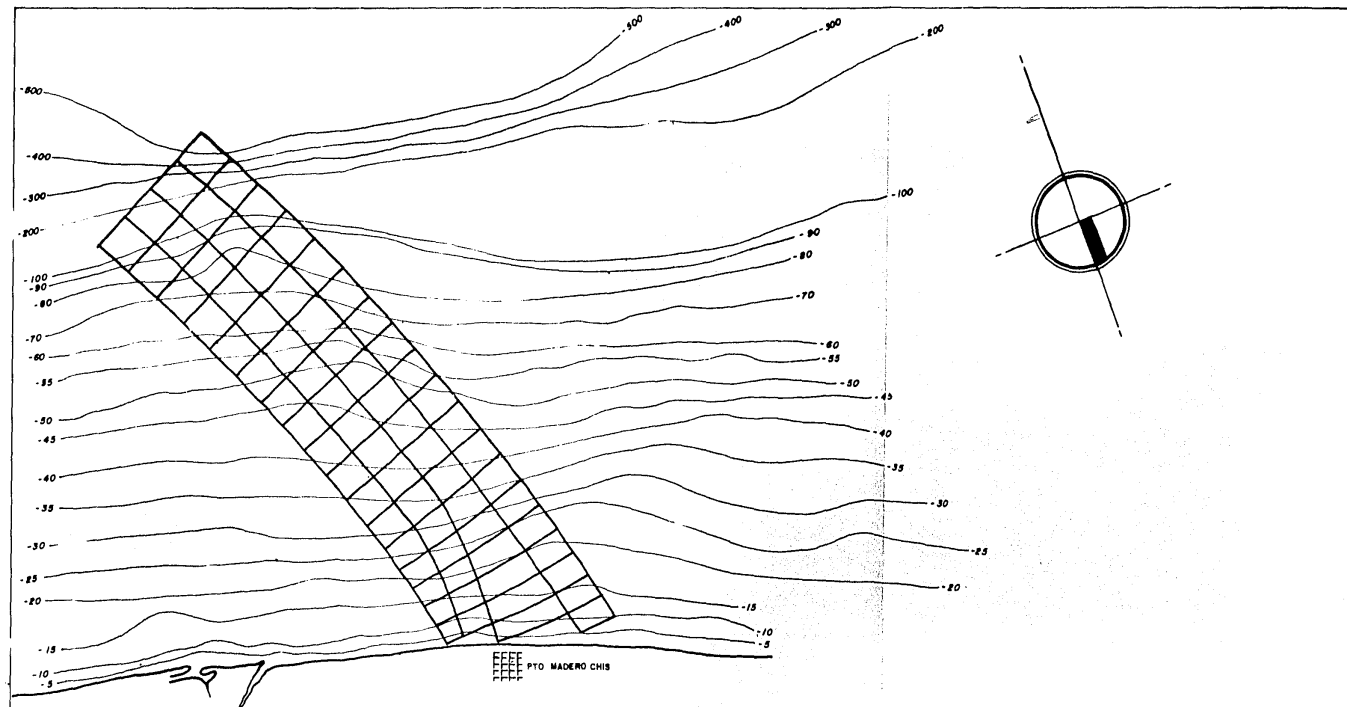
REFRACCION DE OLEAJE AGUAS PROFUNDAS  
 T=12 seg. DIR. S-SW  
 PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no.

**3**

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 175 000





### EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION

TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yañez Monroy

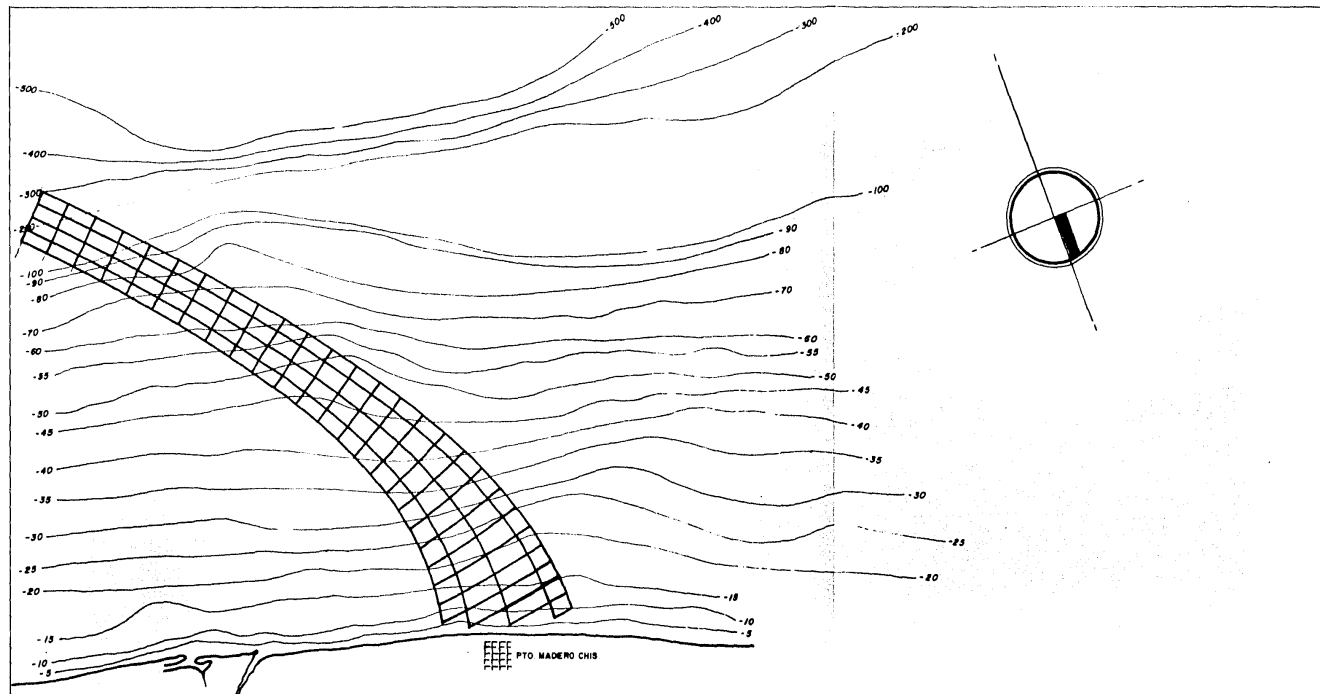
REFRACCION DE OLEAJE AGUAS PROFUNDAS  
T = 12 seg. DIR. S  
PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no.

4

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 175 000

**MAZU**



**EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION**

**UNAM**

TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yañez Monroy

REFRACCION DE OLEAJE AGUAS PROFUNDAS  
T=12 seg. DIR. S-SE  
PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no

**5**

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 175 000

-11-

-10.5-

-10-

-9.5-

-9-

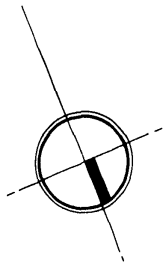
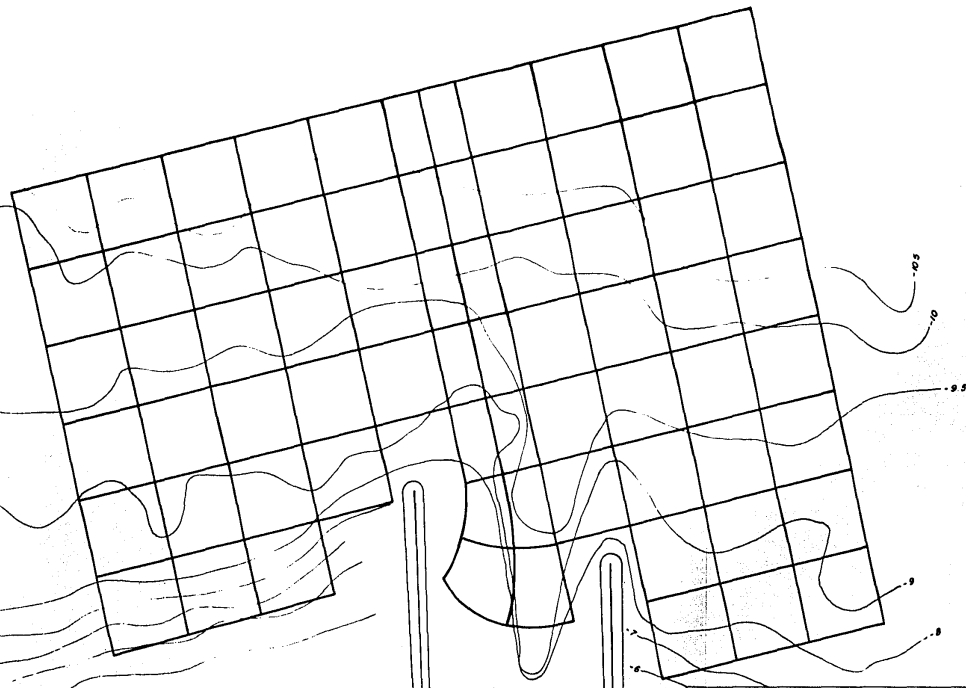
-8-

-7-

-6-

-5-

-4-



ESTRUCTURA DE PROTECCION

ESTRUCTURA DE PROTECCION

### EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION

**MANU**

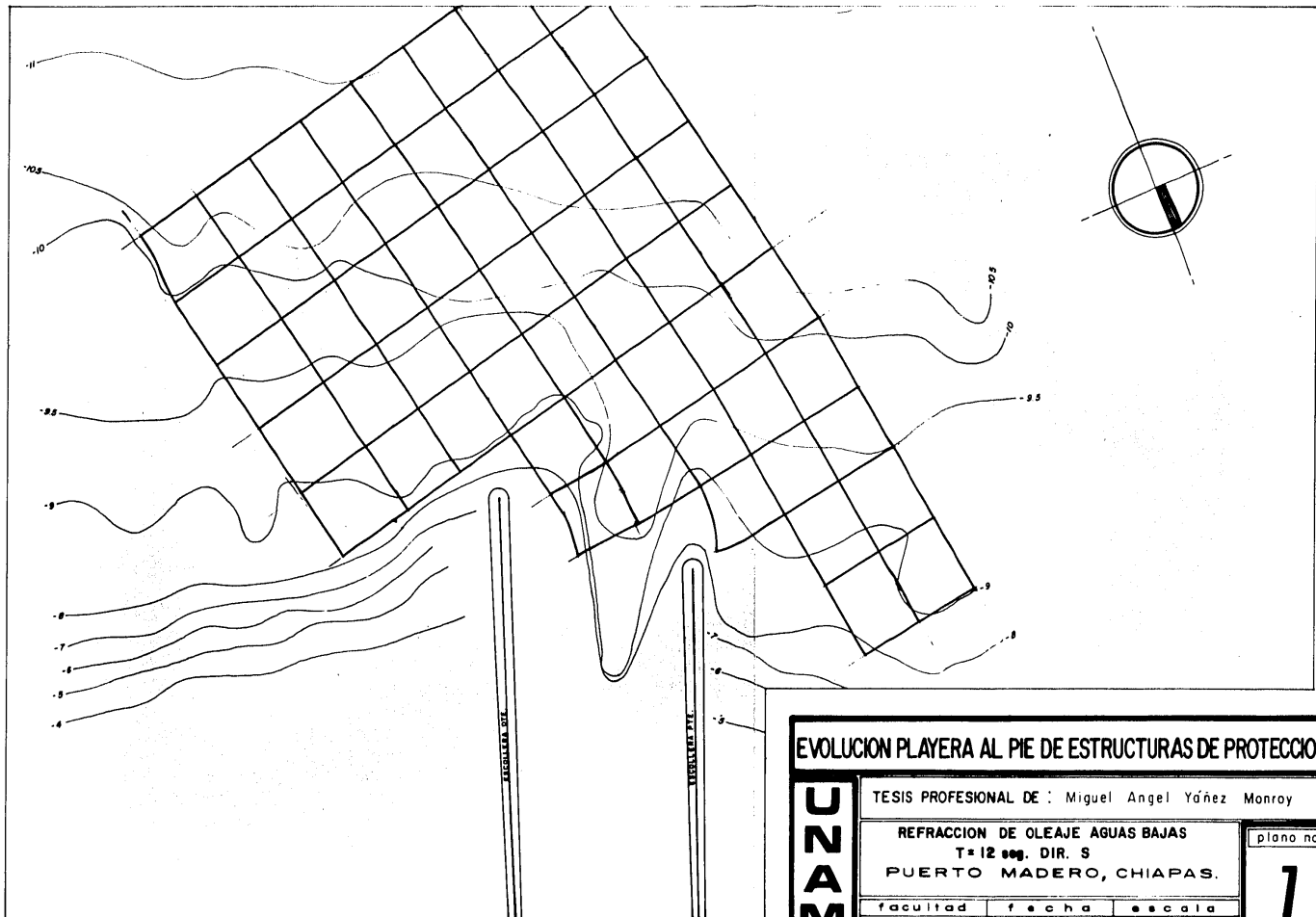
TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yáñez Monroy

REFRACCION DE OLEAJE AGUAS BAJAS  
T = 12 seg. DIR. S-SW  
PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no.

**6**

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 5 000



**EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION**

TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yáñez Manroy

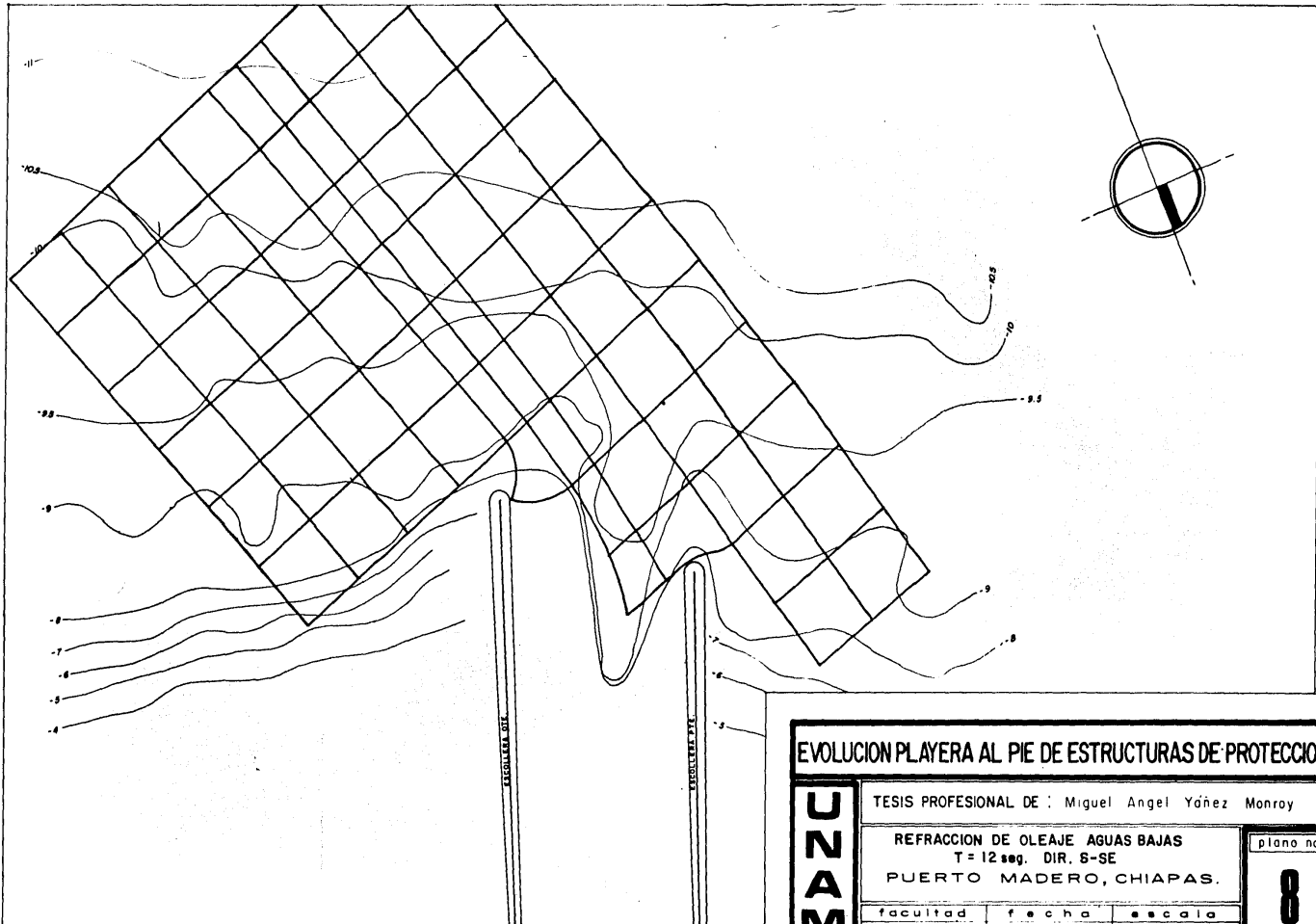
REFRACCION DE OLEAJE AGUAS BAJAS  
 T = 12 seg. DIR. S  
 PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no

**1**

facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 5000

**UNAM**



### EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION

TESIS PROFESIONAL DE : Miguel Angel Yáñez Monroy

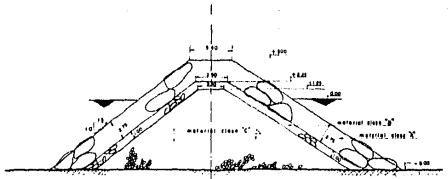
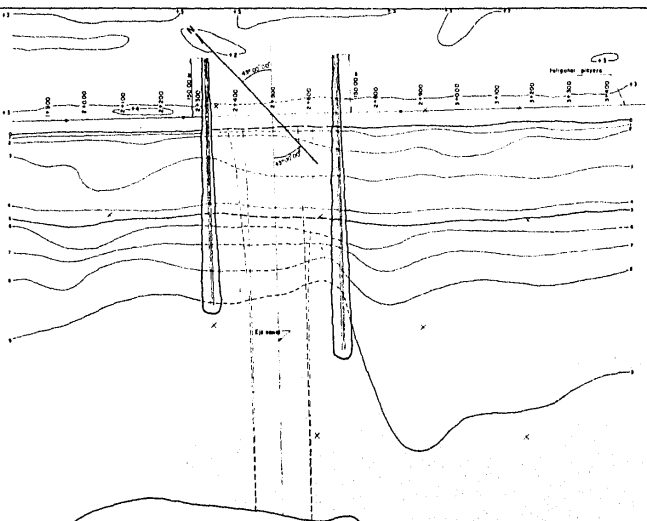
REFRACCION DE OLEAJE AGUAS BAJAS  
 T = 12 seg. DIR. S-SE  
 PUERTO MADERO, CHIAPAS.

plano no

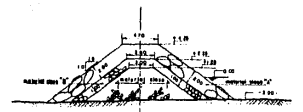
8

**MANU**

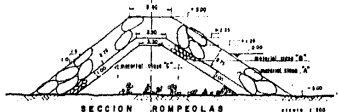
facultad	fecha	escala
ingeniería	agosto de 1985	1 : 5 000



SECCION MORRO DE LA BATIMETRICA -9



SECCION ROMPELAS DE LA BATIMETRICA -9 AL ARRANQUE



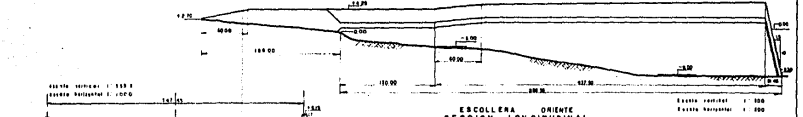
SECCION ROMPELAS DE LA BATIMETRICA -5



SECCION ROMPELAS DE LA BATIMETRICA 0.00

**NOTAS :**

**DIMENSIONES** - En metros excepto las indicadas en otra unidad.  
**ELEVACIONES** - En metros referidas al nivel de Manila. Se da línea inferior con elevación 0.00 ms.  
**ESPECIFICACIONES** - Las especificaciones de este plano y las del detalle de los muros de las compuertas se aplican por separado.  
 El núcleo y la zona exterior formada por un núcleo de construcción estándar y la zona exterior formada por un núcleo de construcción estándar.  
 El núcleo y la zona exterior formada por un núcleo de construcción estándar y la zona exterior formada por un núcleo de construcción estándar.  
**MATERIAL** - Clase A: piedra de 10 a 70 Ton, 20% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase B: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase C: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase D: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase E: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase F: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase G: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase H: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase I: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase J: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase K: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase L: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase M: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase N: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase O: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase P: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase Q: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase R: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase S: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase T: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase U: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase V: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase W: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase X: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase Y: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.  
 Clase Z: piedra de 10 a 70 Ton, 30% de piedra de 70 Ton, 30% de piedra de 10 a 70 Ton.



SECCION DEL CANAL DE LA BATIMETRICA 0.00

**RESUMEN DE MATERIALES**

CLASIFICACION	ELEMENTOS	PUENTE	
		SECCION	TIPO DE TUBO
1	A	100	100
2	B	100	100
3	C	100	100
4	D	100	100
5	E	100	100
6	F	100	100
7	G	100	100
8	H	100	100
9	I	100	100
10	J	100	100
11	K	100	100
12	L	100	100
13	M	100	100
14	N	100	100
15	O	100	100
16	P	100	100
17	Q	100	100
18	R	100	100
19	S	100	100
20	T	100	100
21	U	100	100
22	V	100	100
23	W	100	100
24	X	100	100
25	Y	100	100
26	Z	100	100

**EVOLUCION PLAYERA AL PIE DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION**

INGENIERIA DE PUERTO MADERO, CHIAPAS

INGENIERIA agosto de 1985

INDICADO

ZANZAN

9