UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Aplicación de la Ingeniería Civil al Problema de Erosión Playera en la Región de la Bahía de la Ventosa en Salina Cruz, Oaxaca.

T E S I S

Como requisito para obtener el título de

Ingeniero Civil

P r e s e n t a

Hugo Carmona Gómez

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Javier Gutiérrez Reynoso

MÉXICO, D.F. 2006

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS.

"Todo círculo debe ser cerrado para continuar siempre alcanzando objetivos y luchando por conseguir lo que uno siempre ha soñado, y no claudicar en el intento".

El culminar con este trabajo de tesis, el cual es el fruto de un largo aprendizaje académico a lo largo de mi estancia en la Facultad de Ingeniería, y que es el inicio de mi vida profesional; el cual, no habría sido posible sin el apoyo de cada una de las personas que han estado a mi lado en las victorias y aún más importante en las derrotas, por ello quiero dedicar este trabajo a cada una de ellas, y demostrarles de esta manera que no fue en vano todo su esfuerzo y sufrimiento que pasaron a mi lado para hacer realidad nuestro sueño.

Quiero agradecer a mis padres ***Roberto Carmona Morales*** y ***Epifanía Gómez Guerrero***, su siempre atinada guía en los momentos más difíciles de mi vida académica y en familia, ya que su ejemplo y sus consejos siempre me motivaron a ser el mejor, y no permitirme declinar en el largo camino del triunfo.

A mis hermanas ***Karina Carmona Gómez*** y ***Liliana Carmona Gómez***, pues pocos hermanos podemos alegrarnos de haber pasado momentos tan llenos de vida como los que hemos pasado, y haberme dado lecciones de vida tan importantes.

Al amor de mi vida ***Alma Yadira Herrera Vigueras***, la persona que me inspira todos los días, pues en ella es quién ahora he depositado todo mi amor y mi esperanza; gracias por tus consejos que me han ayudado a ser cada día mejor ser humano, gracias también y por tu comprensión y tus jalones de orejas porque sin ellos no habría terminado este trabajo.

Quiero agradecer también al ***Ing. Javier Gutiérrez Reynoso***, por haber fungido como mi director de tesis, y por haberme brindado la primera oportunidad dentro de este maravilloso mundo de la Hidráulica Marítima, ya que nadie habría confiado en un pasante, y usted lo hizo.

Gracias al ***Ing. Jesús G. Huidobro González***, por su valiosa amistad, por haberme apoyado incondicionalmente, por haberme brindado sus

consejos que me encaminaron a desarrollarme profesionalmente y por darme la confianza de desarrollar ingeniería de verdad.

A todo el ***Staff Técnico y Administrativo de CYTSA y ALEPH***, por darme la oportunidad de formar parte de su excelente grupo y haberme ofrecido su confianza; a los ingenieros: ***Fernando Javier de la Paz López, Julián Javier Gallegos Gallegos***, ***Carlos Fernando Álvarez Herrera***, ***Ramón Alejandro Huidobro González*** y al ***P.F. José Antonio Yáñez Monroy (el amigüito),*** gracias a todos por haber hecho que mi estancia no haya sido una rutina.

Gracias también a mis ***ABUELOS***, ***TIOS*** y ***PRIMOS***, con quiénes he pasado momentos que siempre estarán en mi corazón.

Agradezco también a cada uno de mis ***COMPAÑEROS*** de la Facultad de Ingeniería, con quiénes pasé los momentos académicos que formaron mi amor por ésta profesión.

Y gracias a la ***Universidad Nacional Autónoma de México***, ***MI ALMA MATER***, por haberme brindado su cobijo y darme la oportunidad de estudiar esta noble carrera.

Y gracias especialmente a la ***FACULTAD DE INGENIERIA*** y a cada uno de los ***PROFESORES***, que en ella me enseñaron a amar mi profesión y que me dieron las armas para desempeñarme como un ***Profesionista de Excelencia***.

A todos ***USTEDES***, dedico este esfuerzo con el ideal de que sea una pequeña huella que han dejado en mi corazón, y que ha formado todo lo que soy y seré a lo largo de mi vida profesional.

Gracias.

INDICE DE LA TESIS.

Titulo: **"APLICACIÓN DE LA INGENIERÍA CIVIL AL PROBLEMA DE EROSIÓN PLAYERA EN LA REGIÓN DE LA BAHÍA DE LA VENTOSA, SALINA CRUZ OAXACA"**

Objetivo: *Conjuntar y aplicar los conocimientos de las áreas de la Ingeniería Civil para la identificación y solución de la problemática de erosión playera, haciendo uso de la tecnología y técnica disponibles.*

INTRODUCCIÓN

CAPITULOS.

Capitulo 1 ANTECEDENTES.

1.1 Aspectos Generales de la Bahía de La Ventosa..... 1

1.2 Problemática General de la Erosión Playera..... 4

1.2.1 Causas de la Erosión de la Línea Playera..... 4

1.3 Conclusiones..... 8

Capitulo 2 NOCIONES DE BALANCE DE SEDIMENTOS Y DINÁMICA LITORAL.

2.1 Procesos de sedimentología..... 9

2.1.1 Balance de Sedimentos y Transporte Litoral..... 9

2.1.2 Transporte Fluvial..... 12

2.1.3 Transporte Eólico..... 18

2.2 Dinámica Litoral..... 18

2.2.1 Régimen de Playas..... 18

2.2.2 Fenómeno de Acreción y Recesión de Playas..... 18

2.2.3 Medidas para la Preservación de Playas y Obras de Protección..... 19

2.3 Conclusiones..... 22

Capitulo 3 ASPECTOS JURÍDICOS DE LA ZONA FEDERAL MARÍTIMO TERRESTRE.

3.1 Conceptos Básicos de la Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros. 23

3.2 Delimitación y Reglamentación para las Construcciones en la Zona Federal Marítimo Terrestre..... 25

3.3 Aspectos Jurídicos Asociados a la Pérdida o Ganancia de Terrenos al Mar..... 27

3.4 Conclusiones..... 29

Capitulo 4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA SOLUCIÓN DE LA EROSION PLAYERA.

4.1 Generalidades..... 30

4.2 Parámetros Físicos de Diseño..... 33

4.2.1 Características Generadoras del Oleaje..... 33

4.2.2. Oleaje Normal y Ciclónico..... 41

4.2.3. Marea Astronómica..... 56

4.2.4 Mareas Lunares 57

4.2.5 Marea Solar..... 57

4.2.6 Marea de Tormenta..... 59

4.2.7 Corrientes Marinas Superficiales 60

4.2.8 Determinación de la Base de Diseño 62

4.3 Elementos de Protección Costera..... 65

4.3.1 Rompeolas y Escolleras..... 66

4.3.2 Espigones..... 73

4.4 Conclusiones..... 77

Capitulo 5 REHABILITACIÓN DEL FRENTE PLAYERO EN LA BAHÍA DE LA VENTOSA, SALINA CRUZ OAXACA: EJEMPLO DE APLICACIÓN.

5.1 Antecedentes..... 78

5.2 Descripción de los Procesos Físicos en la Bahía de La Ventosa..... 79

5.2.1 Oleaje Normal..... 79

5.2.2 Oleaje Extremal..... 80

5.2.3 Marea Astronómica..... 81

5.2.4 Marea Meteorológica 82

5.2.5 Propagación Matemática del Oleaje 83

5.2.6 Comportamiento Sedimentológico de la Playa 85

5.3 Diseño de las Obras de Protección..... 92

Capitulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones..... 98

6.2 Recomendaciones..... 100

ANEXO

BIBLIOGRAFIA

INDICE DE LAS TABLAS

Tabla 2.1 Tamaño hidráulico w=f(d) (Según V.N. Goncharov) 16

Tabla 2.2 Tamaño hidráulico w=f(dt) (Según V.N. Goncharov) 16

Tabla 4.1 Escala de *BEAUFORT* para la caracterización de los vientos 36

Tabla 4.2 Clasificación de las olas por su periodo (Munk-Kinsman)..... 43

Tabla 4.3 Características de las Teorías del Oleaje más empleadas 49

Tabla 4.4 Fórmulas empleadas en la teoría lineal de olas progresivas (Pequeña Amplitud) 50

Tabla 4.5 Rangos de altura local y distante 53

Tabla 4.6 Fórmulas para evaluar la magnitud de las corrientes paralelas a la costa..... 61

Tabla 4.7 Criterios para evaluar el Run-Up..... 63

Tabla 4.8 Valores recomendados de KD para determinar el peso de las unidades de coraza (criterio sin daño y mínima roción, según CERC)..... 68

Tabla 4.9 Graduación de tamaños, según el CERC..... 70

Tabla 4.10 Coeficientes de capa y porosidades de varios tipos de elementos de coraza..... 71

Tabla 5.1 Datos de Oleaje Normal en aguas profundas..... 80

Tabla 5.2 Planos de Marea de la zona de Salina Cruz, Oaxaca..... 82

Tabla 5.3 Mareas Meteorológicas, que tuvieron influencia sobre las costas de la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca..... 83

Tabla 5.4 Geometría de la Sección Transversal del Cauce..... 90

Tabla 5.5 Arrastre de Sedimentos por parte del Río Tehuantepec..... 91

Tabla 5.6 Tabla resumen del peso de los elementos que conforman las estructuras de protección..... 96

ÍNDICE DE LAS FIGURAS

Figura 1.1 Localización de la zona de estudio (Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca)..... 1

Figura 1.2 Vista aérea sobre el área del Puerto de Salina Cruz, en donde al fondo se aprecia la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca..... 2

Figura 1.3 Mapa de la República Mexicana, en la cual se muestran los ciclones que han penetrado el territorio nacional..... 3

Figura 1.4 Vista de la erosión que presenta la zona de estudio, provocado por oleajes de tormenta, que se impactan directamente sobre la playa. Es visible el nivel tan severo de erosión que se presenta, haciendo visible la cimentación de la subestación eléctrica..... 4

Figura 1.5 Diagrama esquemático de olas de tormenta que liberan su energía sobre la playa y las dunas..... 6

Figura 1.6 Fotografía aérea de una estructura construida por el hombre, se puede apreciar a la salida del río Tuxpan, como es retenido el sedimento al lado de la escollera norte, caso contrario sucede con la perdida de material a consecuencia de la barrera artificial colocada por el hombre para evitar que se azolve el canal de acceso al puerto de Tuxpan, Ver..... 7

Figura 2.1 Diagrama esquemático de entradas y salidas de material, mediante un balance de sedimentos, se muestran las líneas de frontera u los puntos de aporte y perdida de material..... 10

Figura 2.2 Diagrama esquemático de los factores físicos que influyen en aporte y las perdidas del sedimento..... 12

Figura 2.3 Relación del Tamaño Hidráulico en Función de las dimensiones de las partículas arrastradas..... 17

Figura 2.4 Diagrama que muestra los perfiles de verano e invierno –Fenómeno de Incremento y Recesión de Playas..... 19

Figura 2.5 Vista de la Escollera que se encuentra en San Sebastián Miami Florida. Se aprecia como la arena se va depositando en la parte superior haciendo que crezca la playa; caso contrario sucede en la parte de la escollera de abajo, donde se percibe el daño por erosión que se ha causado..... 20

Figura 2.6 Vista del Rompeolas que se encuentra en Puerto Progreso, Yucatán..... 21

Figura 2.7 Vista de la de un Dique Marino, que se encuentra en Bridlington Inglaterra, la fotografía data del año 1900. Se aprecia que este dique se construyó a partir de bloques de concreto..... 21

Figura 2.8 Vista de los Espigones que se encuentran en Tampa Bay, Florida. En la imagen se observa que los espigones se emplearon como medida de solución para ganarle terreno al mar..... 22

Figura 3.1 Esquema de los elementos que componen una Playa..... 23

Figura 3.2 Esquema de la manera en que se mide la Zona Federal Marítimo Terrestre..... 24

Figura 3.3 Esquema que muestra la franja que limita la Zona Federal Marítimo Terrestre en cuerpos de agua que desembocan en el mar.....25

Figura 3.4 Esquema de la manera en que se mide la Zona Federal Marítimo Terrestre, en la desembocadura de un río.....26

Figura 4.1 Diagrama esquemático de una onda senoidal.....32

Figura 4.2 Diagrama esquemático del área de generación del FETCH.....34

Figura 4.3 Diagrama esquemático de la distribución del viento.....38

Figura 4.4 Carta sinóptica de Tiempo.....39

Figura 4.5 Escala de Viento Geostrófico.....40

Figura 4.6 Diagrama de la velocidad del viento a 10 m sobre el nivel del mar (U_{10}), para diferentes temperaturas entre el aire y el agua.....41

Figura 4.7 Esquema de la Asimetría de las olas de Temporal.....44

Figura 4.8 Vista aérea de los frentes de ola.....44

Figura 4.9 La refracción en el oleaje puede producir una disminución en la longitud y aumento en la altura de ola.....45

Figura 4.10 Vista del fenómeno de refracción del oleaje.....46

Figura 4.11 Vista del fenómeno de difracción del oleaje sobre una bahía.....46

Figura 4.12 Vista del momento en el que el oleaje comienza a romper sobre la costa.....47

Figura 4.13 Vista del momento en el que un oleaje extremal se impacta sobre una estructura de protección.....56

Figura 4.14 Diagrama de una onda de marea.....57

Figura 4.15 Diagrama de los Planos de Marea.....58

Figura 4.16 Diagrama de la Marea de Tormenta.....59

Figura 4.17 Diagrama de la formación de una Ola Run-Up.....63

Figura 4.18 Figura que muestra el rebase de una ola sobre una estructura (Ola Overtopping).....64

Figura 4.19 Sección Transversal de una Escollera o un Rompeolas.....67

Figura 4.20 Sección Transversal de una Escollera para oleaje rompiente.....70

Figura 4.21 Sección Transversal de una Escollera para oleaje no rompiente.....70

Figura 4.22 Modificaciones que sufre la línea de costa por la presencia de un sistema de espigones.....73

Figura 4.23 Perfil constructivo de un espigón.....75

Figura 5.1 Vista de los daños ocasionados a la infraestructura y líneas eléctricas en la zona de la Bahía de la Ventosa Salina Cruz, Oaxaca.....78

Figura 5.2 Vista del satélite donde se muestra el Huracán Alma (28 de mayo del 2002), así como la trayectoria que siguió en el periodo del 24 de mayo al 1° de junio de 2002. 79

Figura 5.3 Gráfica Altura de Ola vs Periodo de Retorno..... 81

Figura 5.4 Malla empleada para realizar la Propagación de Oleaje de la Bahía de la Ventosa..... 84

Figura 5.5 Vista del material sedimentado, que se encontró en la playa, y que sirvió como muestra, para realizar las pruebas de caracterización. 86

Figura 5.6 Transporte Litoral REF/DIF Larras..... 87

Figura 5.7 Malla de Simulación de Evolución Playera..... 88

Figura 5.8 Análisis de Estabilización Playera..... 88

Figura 5.9 Análisis de Estabilización Playera, considerando una pared marginal..... 89

Figura 5.10 Registros de Precipitación Media en la Cuenca del Río Tehuantepec 91

Figura 5.11 Balance de Sedimentos de la Bahía la Ventosa, en Salina cruz, Oax..... 92

Figura 5.12 Respuesta de la playa, mediante las relaciones Y/d_s contra L_s/L_g. 95

Figura 5.13 Localización de los diferentes sectores de un dique rebasable. De Vidal et al. (1992)..... 96

Figura 5.14 Sección transversal tipo del rompeolas sumergido..... 96

Figura 5.15 Arreglo en planta de la protección marginal, en la Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oax. 97

INTRODUCCION

La costa, en su sentido más amplio, se nos presenta como un escenario al que casi nadie es ajeno. La evolución de las costumbres sociales hace que cada vez sea mayor la cantidad de personas que se instalan en la zona costera, de manera estable o circunstancial, razón por la cual cada uno de nosotros posee una idea de lo que es la costa, más o menos acertada y frecuentemente vinculada a su particular percepción del paisaje costero al que se está acostumbrado. Es de hecho muy frecuente escuchar al constante visitante de una playa en verano, comentar que año con año, lo cambiada que esta la costa sin imaginarse siquiera el porque de tal fenómeno.

Lo más impactante del mar son las olas y, de hecho al hablar del mar lo relacionamos inmediatamente con olas, sol y playa; pero no pasa por nuestra mente el fenómeno de disipación de energía que se presenta al romper las olas en las costas y los problemas que conlleva como la erosión, claro que esto puede ser función de diferentes factores que unidos pueden dar forma a una problemática que no es ajena a las playas de nuestro país.

La disminución en la profundidad del fondo marino al acercarse a la línea de playa provoca entre otros el rompimiento de las olas ocasionando turbulencia en el flujo y por consiguiente la puesta en suspensión de material granular y del arrastre del mismo, originando un movimiento paralelo y transversal a lo largo de la línea de playa, al cual se le da el nombre de transporte litoral, éste a su vez forma parte de un proceso más complejo que se llama balance de sedimentos involucrando otros factores, dando como resultado la formación y existencia de playas.

Sin embargo otros aspectos importantes son la condición de la morfología de la región y las características de la zona, que son las causantes de que las franjas costeras se modifiquen a lo largo del año, gracias a los cambios estacionales y de dirección, en los cuales las costas tienden a estabilizarse de manera natural a su perfil teórico y alineamiento ante el embate repetido del oleaje sobre ella, lo cual provoca una recesión en invierno y un crecimiento costero en verano.

La disponibilidad del transporte litoral está en función del transporte fluvial, que es el encargado de abastecer de material granular al mar para continuar con el transporte litoral, sin embargo, al conjuntarse estos problemas y los eventos extremales que afectan con frecuencia a las zonas playeras, provocan que sean susceptibles a procesos de pérdida de sedimentos, incluyendo la mínima alteración que el ser humano puede provocar, al realizar obras que sirven como protección.

Es sorprendente que en la actualidad sea difícil predecir con exactitud el comportamiento morfológico de las playas esto porque el ser humano es incapaz de ofrecer una solución totalmente efectiva para contrarrestar los efectos causados por la naturaleza.

La erosión playera es uno de los problemas que más se presenta en las costas del mundo entero, y un verdadero reto para los ingenieros que buscan soluciones contundentes para darle frente al problema de erosión que hasta ahora no se ha logrado.

Por ello es necesario comprometerse como ingeniero, y no abandonar la labor de actualizar y buscar nuevas alternativas para desarrollar investigaciones completas que lleven a una solución más efectiva que proponga nuevas teorías, con ello lograr un verdadero equilibrio entre las acciones de la naturaleza y las soluciones que planteen los ingenieros sobre el problema que se ha presentado a lo largo de la historia de las playas.

OBJETIVO

El desarrollo de esta tesis no pretende dar una solución contundente al problema de erosión playera; su fin es el hacer conciencia en la mente del ser humano para dejar de lado su soberbia y darse cuenta del papel que desarrolla en el mundo, además de comprometerse a dar lo mejor de si para lograr el equilibrio entre la naturaleza y el hombre.

Este equilibrio se consigue conociendo las causas que originan la erosión en las playas ya sea por los efectos naturales o los causados por el hombre, para ello es necesario no subestimar todos los procesos que se presentan en la línea de playa y el mar, como la dinámica litoral que es uno de los procesos más importantes dentro de las formaciones de playas, porque el no darles la importancia a estos procesos nos llevaría a un mal diseño de las obras de protección, de ahí la importancia de adentrarse al estudio de los efectos que originan la erosión y la formación de las playas, en este sentido, el objetivo del presente trabajo.

Es aplicar y conjuntar los conocimientos de las áreas de la Ingeniería Civil para la identificación y comprensión del comportamiento litoral y de las soluciones de la problemática de erosión playera, haciendo uso de las técnicas disponibles.

Para tener un panorama más amplio del fenómeno anteriormente expuesto y cumplir con el objetivo antes mencionado, se ha desarrollado la siguiente tesis, la cual consta de seis capítulos, que se describen a continuación.

En el capítulo 1, se hace una explicación general de la problemática de erosión playera, partiendo de las causas naturales y las inducidas por el hombre, desde una visión global, incluyendo los aspectos que intervienen en dicho fenómeno (erosión), complementado este capitulo con una conclusión.

En el capítulo 2, se darán las nociones de balance de sedimentos y la dinámica litoral, los efectos físicos causados por la interrupción del transporte litoral, incluyendo al final una conclusión.

Para el capítulo 3, se tratan particularmente los aspectos jurídicos y de reglamentación de la construcción de obras civiles en la zona federal, incluyendo los aspectos jurídicos asociados a la problemática de erosión playera, este capítulo también se complementa con conclusiones.

En el capítulo 4, se hace referencia a las consideraciones de diseño para la solución de la erosión playera, incluyendo los elementos de protección, los parámetros de diseño para cada uno de ellos y las conclusiones respectivas.

En el capítulo 5, se realizará el planteamiento práctico para la rehabilitación del frente playero en la Bahía de La Ventosa, Salina Cruz Oaxaca, incluyendo la descripción de los procesos físicos actuantes en la zona y la solución al problema de erosión en el lugar y sus impactos sobre las obras de infraestructura que ahí existen.

Y finalmente en el capitulo 6, se expondrán las conclusiones y las recomendaciones basadas en los resultados obtenidos en el capitulo anterior.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES.

Es común relacionar al ingeniero civil con la construcción de casas, carreteras, presas, obras de alcantarillado y agua potable, etc.; sin embargo, los alcances de ésta noble profesión son tan amplios y variados, que van desde el dseño y construcción de obras en tierra firme hasta estructuras costa afuera, en donde la capacidad del ingeniero se pone constantemente a prueba.

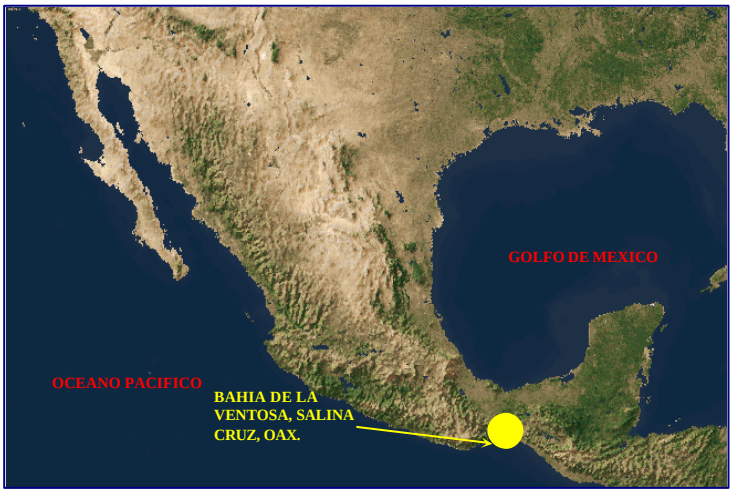
En la frontera entre la tierra y el océano, ocurren fenómenos tan complejos que se requiere entender las causas que los originan, como la ***dinámica litoral*** que ocurre en las costas. Éste a su vez, provoca otros efectos que tales como el transporte litoral, erosión, cambios en el perfil de la playa, etc.

En la presente tesis se propone dar la solución más factible técnicamente, para el problema de erosión playera en la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca. A continuación se presentan los aspectos generales de la Bahía de la Ventosa, para conocer más acerca de la zona de estudio y del problema de erosión que se presenta en la zona.

1.1. Aspectos Generales de la Bahía de La Ventosa.

Se ubica al Sureste del estado de Oaxaca dentro de la Región Hidrológica No. 22, llamada Subregión Tehuantepec –ver figura 1.1-, los principales suelos con que cuenta la zona son el *litosol*, el *regosol eútrico* y *acrisol húmico*, todos ellos susceptibles a la erosión y pobres en nutrientes. Respecto a la vegetación se encuentra formada por ecosistemas que varían desde bosque *aciculifolio* y *caducifolio*, hasta selva mediana, baja cadicifolia y manglar. A esta diversidad de especies vegetales se agrega la gran riqueza en su fauna, que debe protegerse ya que muchas de esas especies están en peligro de extinción.

Figura 1.1 Localización de la zona de estudio (Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca).

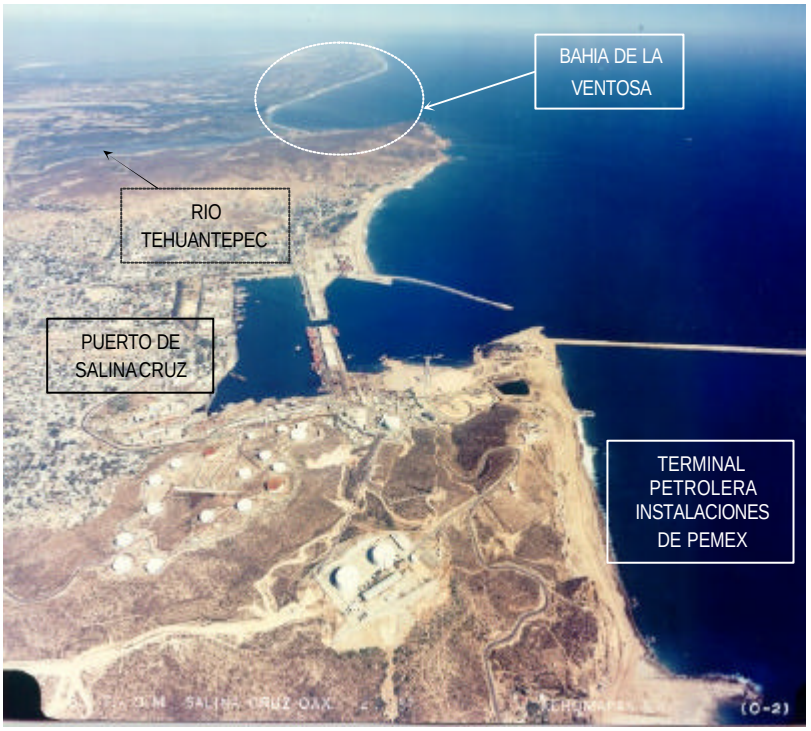


FUENTE: Microsoft, Marca Registrada

Formada por la cuenca de la corriente del Río Tehuantepec, presentando una orografía muy abrupta, en cuyo centro corre el Río Tehunatepec en dirección Oeste-Este. Su longitud es de aproximadamente 240 Km, sus afluentes son numerosos, siendo los más sobresalientes el Río de la Virgen, Tequisistlán y San Antonio.

El Río Teuantepec abastece el vaso de la Presa Benito Juárez, aguas abajo descarga al Océano Pacífico en la Bahía de la Ventosa –ver figura 1.2-, el escurrimiento virgen se genera en las subcuencas de la región, donde una parte del volumen se dedica a usos consuntivos, otra parte significativa se pierde por la evaporación, además de que una parte de este volumen se exporta hacia la cuenca Los Perros –en la Subregión Complejo Lagunar-, el restante volumen es limitado para la oferta actual de aguas superficiales de la zona obteniendo un déficit en el transporte del Río Tehuantepec.

Figura 1.2 Vista aérea sobre el área del Puerto de Salina Cruz, en donde al fondo se aprecia la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca.



FUENTE: Consultoría Yáñez-Taylor, S.A. de C.V.

En lo concerniente a los embalses, únicamente cuenta con la presa Benito Juárez la cual es empleada como presa de derivación, por otro lado el balance de aguas subterráneas de la zona está considerada como sobreexplotada; es decir, que el volumen de agua para la regeneración con que cuenta es menor a la requerida.

Por su posición geográfica, sus características orográficas y accidentada topografía, está expuesta a la ocurrencia de acontecimientos climatológicos extremos. Entre los que esta el comportamiento eólico intenso en la zona de la Bahía de la Ventosa –de ahí el nombre-,

también importantes las sequías significativas que se han presentado en los últimos años, reduciendo considerablemente el cauce de los ríos.

Sin embargo los eventos extremales más importantes que se han presentado en la zona son los llamados superhuracanaes, sistemas ciclónicos de gran extensión con intensidades de vientos superiores a los 200 km/hr, identificados como de grado 5, con una enorme fuerza destructiva. De acuerdo a los registros existentes de los 160 huracanes que han surcado el pacífico 16 (11%) tocaron tierra en las costas del la zona, por lo que la probabilidad de que un huracán ingrese a la región es de un huracán cada 1.6 años.

Las investigaciones arrojan que la frecuencia y magnitud de los huracanes se puede intensificar, por lo que es pertinente contar con actualización tecnológica y la realización de planes y programas prevención de desastres.

Los huracanes que azotan cada año las costas del Istmo de Tehuantepec, han provocado la pérdida de material en la playa de la Bahía de la Ventosa, en donde este problema ha tenido alcances dramáticos como se aprecia en la figura 1.3.

Figura 1.3 Mapa de la República Mexicana, en la cual se muestran los ciclones que han penetrado el territorio nacional.

FUENTE: Programa Nacional Hidráulico de la Comisión Nacional del Agua (2001-2006).

Los problemas de erosión que sufre esta zona, son resultado de los oleajes extremales, que impactan directamente la playa, disipando la energía del oleaje sobre ella. Esto ha provocado que en un lapso de 5 años se haya retraído la playa varios metros –ver figura 1.4-, según algunos testimonios de nativos de la zona, el problema es constante, cada vez que un huracán azota las costas del Océano Pacifico.

Para tratar de comprender ampliamente las causas que originan la erosión en las playas, a continuación se listan las causas naturales y las inducidas por la acción del hombre.

Figura 1.4 Vista de la erosión que presenta la zona de estudio, provocado por oleajes de tormenta, que se impactan directamente sobre la playa. Es visible el nivel tan severo de erosión que se presenta, haciendo visible la cimentación de la subestación eléctrica.

FUENTE: Ondeo Degremont, Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca.

1.2. Problemática General de la Erosión Playera.

1.2.1. Causas de la Erosión de la Línea Playera

En la naturaleza se presentan fenómenos relacionados con los procesos costeros, tal es el caso del oleaje, cuyo efecto sobre las costas es necesario considerar cuando se piensa en el diseño de las estructuras de protección, dentro de estos efectos se encuentran la evolución playera, el transporte litoral en la zona, el balance de sedimentos, entre otros. Sin embargo si alguno de estos procesos se interrumpe es probable que ocasione erosión en la playa haciendo un cambio dramático en la morfología playera. Una explicación del fenómeno de erosión.

El fenómeno de erosión en las costas se debe a que la cantidad de material que se pierde es mayor a la que se aporta por diferentes medios naturales de abastecimiento, tales como: ríos, viento y transporte litoral, etc. Para el estudio de la erosión se ha dividido en dos partes; la primera es por efectos causados por la naturaleza como son: las tormentas, mareas y elevaciones del nivel del mar, el segundo tipo son los efectos causados por el hombre que son resultado del diseño y localización errónea de las estructuras de protección. En ambas situaciones se presentan modificaciones en el equilibrio natural entre el material que se pierde y el depositado.

A continuación se listan las causas de erosión playera por medios naturales y los inducidos por el hombre haciendo una breve explicación de cada uno de ellos.

i) Causas Naturales.

a) *Incremento del nivel de mar*. El incremento del nivel del mar se presenta por diversos factores tales como mareas, deshielos, entre otros, que originan corrientes, arrastre de sedimentos y por ende erosión, dando como resultado el ajuste del perfil natural de la playa.

b) *La variabilidad en el suministro del sedimento a la zona litoral*. Los patrones de cambio en el clima a escala mundial causan una reducción en la ocurrencia de lluvias por lo que los ríos -grandes abastecedores de sedimentos en la zona costera- no tendrán la fuerza de arrastre necesaria para transportar los sedimentos; es decir, llegará menos sedimento al mar, y frecuentemente, el oleaje no experimentará cambios importantes en su régimen dando como resultado erosión en la zona.

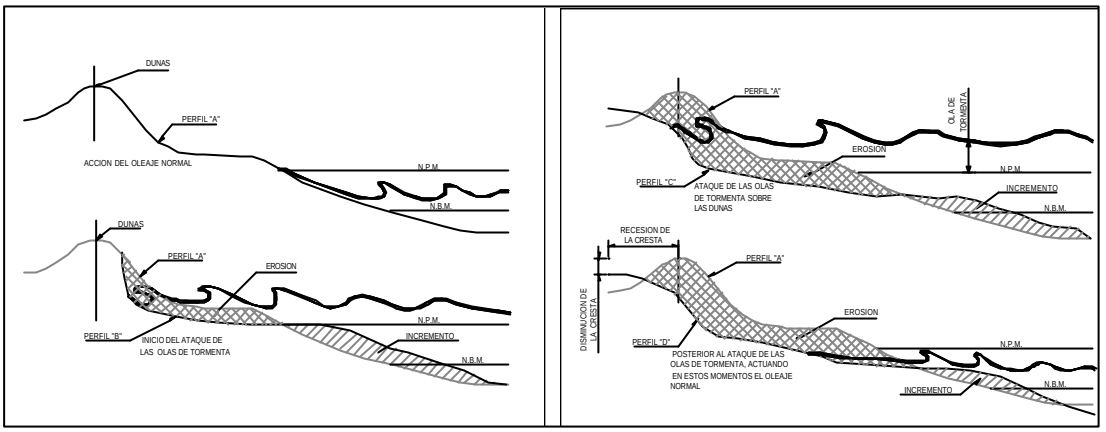
c) *Las olas de tormenta*. Las olas de tormenta causan que la arena sea transportada mar a dentro quedando en bancos de arena temporales, -ver figura 1.5- posteriormente parte de la arena la recobra la playa por medio del transporte litoral cuando se presenta un oleaje suave. Pero en la mayoría de los casos parte del material se pierde en las profundidades del mar.

d) *Olas de marejada*. Las olas de marejada son un fenómeno que ocurre durante periodos de tormenta y son olas de severa acción. Las olas provocan que se desborde el agua hacia la playa arrastrando el material hacia los bancos de arena dentro del mar, provocando pérdida del material y por ende erosión en la playa.

e) *Transporte Eólico*. Se presenta cuando el viento actúa haciendo perder arena, causando una erosión significante. En varias partes del mundo, se presenta en dunas altas, mas allá de la zona activa de la playa. Esas dunas pueden representar un gran volumen de los sedimentos con que cuenta la playa.

f) *Transporte litoral*. La arena es transportada a lo largo de la playa por las olas que rompen en la costa. Si el volumen de sedimento acarreado es mayor a la capacidad de generación natural, el resultado será la erosión.

Figura 1.5 Diagrama esquemático de olas de tormenta que liberan su energía sobre la playa y las dunas.



FUENTE: Shore Protection Manual.

g) *Reacomodo del sedimento playero*. El reacomodo del sedimento en la costa por la acción de las olas da como resultado la selección y/o redistribución de las partículas de los sedimentos a lo largo de la línea de playa de acuerdo al tamaño o las propiedades hidráulicas de las partículas. Es importante considerar las propiedades del material para el diseño de los proyectos de alimentación de las playas, porque el volumen del material perdido por los embates de las olas y el material retenido en la zona de rompiente debe ser equilibrado con relación a un balance de sedimentos. Para mejores resultados se recomienda completar el material con granos similares en tamaño y granulometría a la distribución original que presentaba el material de la playa.

ii) Causas Inducidas por el Hombre.

a) *Disminución de la playa por la extracción de material*. Se presentan problemas asociados a la erosión cuando se extrae la arena con fines de explotación sin haber desarrollado un balance de sedimentos en la zona.

b) *Interrupción del material transportado*. Este factor es probablemente la causa más importante de erosión playera vinculada con el hombre que emplea obras de protección –escolleras, espigones y rompeolas, ver figura 1.6-, para estabilizar las entradas de los canales de acceso a los puertos que han sido dragados con anterioridad, interrumpiendo el transporte litoral. Esas estructuras no solo pueden reducir el régimen de transporte litoral a lo largo de la línea de costa sino que también reduce el material que alimenta a las playas.

c) *Reducción del abastecimiento en la zona litoral*. Los ríos que son la mayor fuente de sedimentos hacia el mar, muchas veces reducen su capacidad de abastecimiento por las estructuras construidas en la zona donde desemboca al mar, atrapando el material y por consiguiente reduciendo su máxima capacidad de transportación ocasionando erosión en la costa.

d) *Concentración de la energía de las olas en la playa*. La construcción de obras de protección –un muro vertical, como ejemplo- en cualquier parte de las zonas activas de la playa puede disminuir la cantidad de sedimentos por la turbulencia generada en la disipación de la energía del oleaje, provocando socavación.

e) *Variación en el nivel del mar*. Al incrementar la sección en las entradas de navegación se ocasionan cambios en la carrera de marea permitiendo la entrada de olas más grandes en el recinto portuario y playas adyacentes. Un incremento en la carrera de la marea ocasionaría erosión en la cara frontal de la costa y un cambio en el perfil playero.

f) *Cambios de la protección natural de la costa*. El dragado de las barras cerca de la playa y en los bancos de arena puede cambiar el modelo de dispersión de energía en una cara frontal de la costa incrementando la energía de las olas que se impactan sobre la sección de la playa, ocasionando erosión.

Figura 1.6 Fotografía aérea de una estructura construida por el hombre, se puede apreciar a la salida del río Tuxpan, como es retenido el sedimento al lado de la escollera norte, caso contrario sucede con la perdida de material a consecuencia de la barrera artificial colocada por el hombre para evitar que se azolve el canal de acceso al puerto de Tuxpan, Ver.

FUENTE: Consultoría Yáñez-Taylor, S.A. de C.V.

g) *La remoción de material playero*. En muchas partes del mundo la extracción de material de relleno para zonas con problemas de erosión se realiza subestimando el balance de sedimentos en la zona; es decir, se extrae mayor cantidad de material a la capacidad de regeneración que tiene la playa por

medios naturales -transporte litoral- lo que conlleva a un problema de erosión en la zona.

1.3. Conclusiones.

Cuando se desea plantear una solución a un problema dado, es necesario conocer las causas que lo originan, de esta manera el objetivo de este primer tema es el de dar una explicación de las causas que ocasionan la pérdida de material –arena- en las playas de todo el mundo. Estas causas se dividen en dos; las naturales y la que induce el hombre.

El hombre es el causante del desequilibrio natural a escala mundial y la erosión en las playas no es la excepción, por ello surge la necesidad de conocer las ventajas y las desventajas al momento de desarrollar ingeniería en las costas.

Por otro lado es necesario conocer todos los aspectos físicos que presenta la zona de estudio, para tomar la mejor alternativa de solución, de esta manera también se incluyeron los aspectos generales de la zona en estudio –Bahía de la Ventosa en Salina Cruz, Oaxaca-.

CAPITULO 2

NOCIONES DE BALANCE DE SEDIMENTOS Y DINAMICA LITORAL.

2.1 Procesos de Sedimentología.

Cuando llega el sedimento al mar, da paso a la formación de playas y acantilados siendo estos la frontera entre el mar y la tierra, estas formaciones con el paso del tiempo van creciendo o disminuyendo su superficie conforme los ríos van abasteciendo de material a la zona o, a diversos factores físicos que afectan directamente a la morfología de las playas[1].

A continuación en este capitulo se describirán los factores físicos que intervienen en la morfología de las playas y los efectos que producen sobre la línea de costa.

2.1.1 Balance de Sedimentos y Transporte Litoral.

Primero definiremos lo que es el balance de sedimentos, es la cuantificación de los aportes de material al mar por diversos medios –como son los ríos, el viento, etc.-, y las pérdidas de material que tiene la playa por causas naturales o inducidas por el hombre (descritos en el capitulo anterior). Una manera de apreciar este proceso es mediante un volumen de control; en el cual se puede observar que el balance de sedimentos no es otra cosa que poner en práctica el principio de continuidad y conservación de la masa sobre el transporte litoral –ver figura 2.1-.

El rango de tiempo en el cual cambia la arena en un sistema depende de la entrada (Q_i^+) y salida de sedimento en un sistema (Q_i^-). El balance de sedimentos se ve reflejado por las ganancias y las perdidas de material reflejadas en la erosión o deposito de sedimento en la playa.

a) Elementos del Balance de Sedimentos.

A los procesos de incremento en la cantidad de arena en un volumen de control definido se le conoce como aporte (Q_i^+), y a los procesos de disminución de la cantidad de arena se le conoce como pérdida(Q_i^-). Usualmente, al aporte se le identifica con el signo positivo, y a la pérdida con el signo negativo; pero en algunos procesos (como el transporte litoral que es uno de los más importantes) está en función de ambos factores; esto es, está ligado al aporte y a la pérdida de material en el volumen de control.

b) Punto de Aporte y Pérdida.

Es el nombre que se le da al aporte (q_i^+) o la pérdida (q_i^-) de arena a través de un punto en la frontera del volumen de control, a menudo el incremento en la carrera de la marea se le considera como un punto de pérdida, a estos puntos se les expresa generalmente con unidades de volumen por año.

[1] Morfología de las Playas. - Es el estudio de la forma del perfil de la playa.

c) Línea de Aporte y Línea de Pérdida.

Es el lugar del volumen de control donde las pérdidas y los aportes cruzan un segmento extenso de la frontera, a la cantidad de material que cruza esta línea se le expresa con las unidades de volumen por año por la longitud de playa, la siguiente convención se emplea para desarrollar un balance de sedimentos.

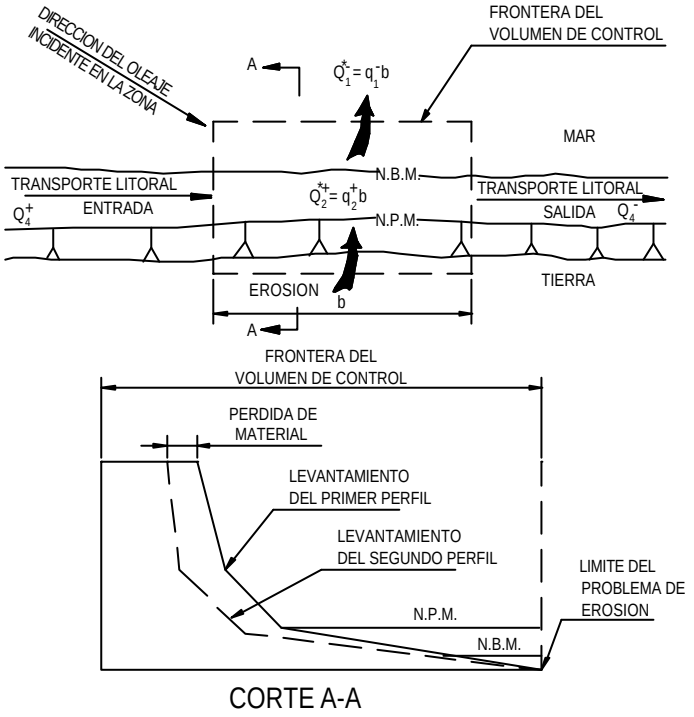
Qi+; Se le denomina al aporte

Q_i^-; Se le denomina a la pérdida

qi+; Se le denomina a la línea de aporte

qi-; Se le denomina a la línea de pérdida

Figura 2.1 Diagrama esquemático de entradas y salidas de material, mediante un balance de sedimentos, se muestran las líneas de frontera o los puntos de aporte y perdida de material.



CORTE A-A

FUENTE: Shore Protection Manual.

La longitud de la línea de playa sobre la cual la línea de aporte es activa se le denomina b_i, y el total de la contribución de la línea de aporte o de pérdida se le denomina por las letras Q_i^{*+} o Q_i^{*-}, por lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_i^* = b_i\, q_i \qquad \text{.....(1)}$$

Muchas veces para conocer la pérdida o el aporte es usado una fracción k_i de una parte del total del transporte litoral, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$Q_i^* = k_i\, b_i\, q_i \text{.....(2)}$$

En un balance de sedimentos completo, la diferencia entre el aporte de material y la pérdida debe ser igual a cero, en casos frecuentes el cálculo del balance de sedimentos es realizado para estimar la erosión en las playas en una zona dada.

La cantidad calculada será el resultado de la ecuación conocida entre la diferencia de aportes y pérdidas. El total del balance es mostrado a continuación:

$$\sum aporte + \sum pérdida = 0 \text{ , ó}$$

$$\sum aporte_{conocido} + \sum pérdidas_{conocido} = \sum aporte_{buscado} + \sum pérdidas_{buscado}$$

$$\sum_{i=1}^{4} Q_i^{+} + \sum_{i=1}^{4} Q_i^{*+} - \left(\sum_{i=1}^{3} Q_i^{-} + \sum_{i=1}^{3} Q_{\ i}^{*-} \right) = 0 \text{ .....(3)}$$

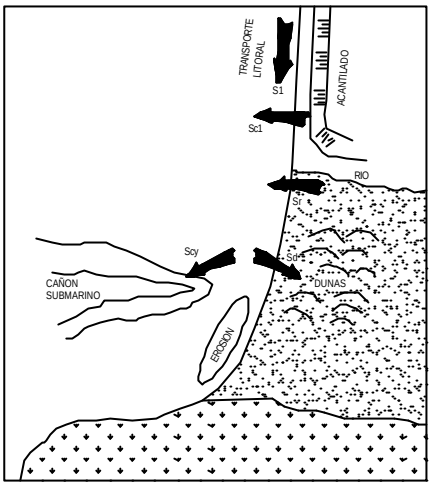
El Q_i^* es obtenido empleando la ecuación (1) y apropiadamente q_i y b_i, el subíndice i, es igual a 1,2,3 o 4.

d) Frontera del balance de sedimentos.

Las fronteras son importantes para cuantificar el volumen de material que entra y sale de la zona de estudio en una unidad de tiempo, la escala de tiempo es muy importante para conocer la concentración de material presente en el volumen de control. Las fronteras se delimitan por líneas paralelas y perpendiculares a la zona de control formando un cuadrado en el área de estudio, donde existan cambios del sistema litoral.

Estas fronteras se emplean en el estudio de estabilización de playas donde se presenten problemas de erosión severos y sea necesario conocer el volumen de material perdido en la zona.

Figura 2.2 Diagrama esquemático de los factores físicos que influyen en aporte y las perdidas del sedimento.



FUENTE: Beach Processes and Sedimentation.

2.1.2. Transporte Fluvial.

La principal fuente de sedimentos en las playas son los ríos que están en función de las características físicas de la zona tales como: la elevación, el tipo de rocas que se encuentran en la zona, la densidad de la vegetación y el clima, los que determinan la cantidad y el tipo de material que transportan los ríos. Otro factor importante son los estuarios presentes en la zona que se localizan entre los ríos y las costas, teniendo la función de trampas de material ocasionando un déficit en la zona de la playa.

La evaluación de material transportado por los ríos es el volumen más importante que debe ser cuantificado, por la importancia que tiene sobre el aporte hacia el mar de sedimentos que acarrea en todo su recorrido.

Se ha establecido que este proceso de desplazamiento de sedimentos resulta posible para velocidades medias de la corriente.

$$v < 1.5\sqrt{gH}$$

donde:

H: es la profundidad de la corriente.

g: es la gravedad.

v: es la velocidad media.

La velocidad de suspensión v_s es la velocidad media a la cual todos los sedimentos pasan al estado de suspensión, y al mismo tiempo es también la mínima velocidad media de la corriente para la cual no hay precipitación:

$$v_s = 1.77 v_c \left(\frac{H}{d_s} \right)^{\frac{1}{12}}$$

donde:

H: es la profundidad de la corriente.

d_s: es la profundidad del suelo erosionado en m.

v_c: es la velocidad de crítica.

v_s: es la velocidad de suspensión.

Por eso se le denomina también velocidad de no-enlodamiento y crítica. La velocidad de suspensión constituye el criterio para la separación en arrastre de fondo y suspensión.

Según I. Latyshenkov.

$$v = 1.6 \sqrt{gd} \left(\frac{H}{d} \right)^{0.2}$$

El grado de saturación de la corriente por transporte en suspensión se caracteriza a menudo por la turbiedad, que es la cantidad de sedimentos en peso o volumen contenidos en la unidad de volumen de la corriente.

Se denomina capacidad de transporte a la máxima turbiedad de la corriente ρ_T para condiciones hidráulicas fijadas.

$$r = 4 \frac{\sqrt{Hi}}{n^2 w}$$

donde:

ρ: es la capacidad de transporte en (g/m^3).

n: es el contenido en porcentaje de gruesos.

ω: tamaño hidráulico medio ponderado de los acarreos.

Los transportes se distribuyen en profundidades de manera no uniforme.

La mayor cantidad se desplaza junto al fondo, y la mínima junto a la superficie libre. Los transportes se caracterizan por los tamaños de sus partículas (granulometría), por su peso específico y por el comportamiento de las partículas en el agua.

El peso específico de las partículas sólidas del suelo oscila, comúnmente, de $2.4 * 10^3$ a $2.8 * 10^3$ Kg/m^3; los suelos de arena grava suelen tener un peso especifico de $2.65 * 10^3$ kg/m^3.

En general, el tamaño de los sedimentos se caracteriza por el diámetro medio pesado de las partículas, determinado generalmente por *análisis mecánico*.

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i p_i}{P}$$

donde:

di: diámetro de la fracción.

pi : peso de la fracción dada.

P: peso de toda la muestra.

$$P = \sum_{i=1}^{n} p_i$$

La principal característica hidráulica de los arrastres, es el tamaño hidráulico ω; así como la velocidad uniforme de caída de una partícula, la cual está en función del su peso específico de la partícula y de la temperatura del agua.

Existe un parámetro adimensional análogo al número de Reynolds, que determina el régimen de circulación de la corriente alrededor de la partícula:

$$\mathrm{Re}_w = \frac{wd}{v}$$

donde:

ω: es el tamaño hidráulico.

d: diámetro de la partícula.

v: coeficiente de viscosidad cinemática del agua.

El tamaño hidráulico ω se determina experimentalmente o por cálculo. Para rodamiento laminar de la partícula, se aplica la fórmula teórica de Stokes:

$$w = \frac{g_1 - g}{24m} d^2 \text{ [mm/s]}$$

donde:

γ1: peso especifico

d: diámetro de la partícula sólida

γ: peso especifico

μ: coeficiente de viscosidad dinámica del agua.

La fórmula es válida para $Re_\omega \leq 1.0$, y ,$d \leq 0.15$ mm. para $1.0 < Re_\omega \leq 240$, y, 0.15 mm < d ≤1.5 mm, el tamaño hidráulico puede determinarse por la fórmula:

$$w = \sqrt[3]{\frac{(g_1 - g)^2}{rm}} bd \quad \text{[mm/s]}$$

donde:

ρ:densidad del agua

β: coeficiente empírico que tiene en cuenta la disminución de la influencia de la viscosidad con el incremento del diámetro de la partícula, para pode calcularlo se requiere de la siguiente ecuación:

$$b = 0.081 \lg 83\left(\frac{3.7d}{0.15}\right)^{1-0.03T}$$

donde:

T: temperatura del agua, °C.

Para $R_{e\omega} > 240$, y, d > 1.5 mm:

$$w = \sqrt{\frac{2g(g_1 - g)d}{1.75g}} \text{ [mm/s]}$$

donde:

g: aceleración de la caída libre.

En la Figura 2.3 se muestra gráficamente la relación entre las dimensiones de las partículas y su tamaño hidráulico. Las curvas fueron trazadas por V. N. Goncharov para $\gamma_1 = 2.65 \times 10^3$ kg/m^3. La escala empírica de V. N. Goncharov para ω, considerada como la más exacta en la actualidad, se muestran en las tablas 2.1 y 2.2; sin embargo, si no se conoce el régimen de desplazamiento de la partícula, entonces es aplicable la fórmula de Rubey válida para cualquier número de Reynolds:

$$w = F\sqrt{dg\left(\frac{r_w - r}{r}\right)}$$

donde:

ρω: densidad media del material de arrastre.

ρ: densidad del agua.

d: diámetro medio de las partículas de arrastre.

μ: coeficiente de viscosidad dinámica del agua.

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36m^2}{gdr\left(r_m - r\right)}}$$

Para d < 0.1 cm, resulta, en el sistema CGS, F = 0.816.

Tabla 2.1 Tamaño hidráulico w=f(d) (Según V.N. Goncharov).

d, mm	w, mm	d, mm	w, mm	d, mm	w, mm
1.50	164.40	6.00	329.00	17.50	662.00
1.75	178.00	7.00	355.00	20.00	602.00
2.00	190.00	8.00	380.00	22.50	637.00
2.50	212.50	9.00	403.00	25.00	672.00
3.00	232.50	10.00	425.00	27.50	706.00
4.00	258.50	12.50	477.00	30.00	736.00
5.00	300.00	15.00	520.00	40.00	870.00

Tabla 2.2 Tamaño hidráulico w=f(dt) (Según V.N. Goncharov).

Diámetro Partícula d, mm	Tamaño hidráulico mm/seg, para temperatura °C				
	10	15	20	25	30
0.001	0.00068	0.00079	0.0009	0.001	0.0011
0.010	0.065	0.079	0.090	0.100	0.110
0.015	0.154	0.178	0.210	0.225	0.253
0.020	0.274	0.316	0.360	0.400	0.450
0.030	0.618	0.710	0.810	0.900	1.012
0.040	1.099	1.253	1.440	1.600	1.800
0.050	1.717	1.973	2.270	2.500	2.812
0.070	2.510	2.880	3.250	3.650	4.100
0.100	5.120	5.880	6.630	7.440	8.370
0.150	11.500	13.250	14.900	16.750	18.840
0.200	17.110	18.760	20.420	22.050	23.720
0.250	22.670	24.390	25.020	27.650	29.320
0.300	28.310	29.950	31.320	33.260	34.920
0.400	30.510	41.160	42.920	44.960	46.120
0.500	50.710	52.360	54.020	55.650	57.32
0.600	61.910	63.560	63.220	65.850	64.520
0.700	73.110	74.760	73.420	78.060	70.720
0.800	84.310	83.960		89.260	90.020
0.900	95.710	97.330		100.460	102.120
1.000	106.710	108.66		111.650	113.120
1.200	129.110	130.76		134.06	135.720
1.500	162.710	164.660		167.660	160.220

Nota: Se denomina caída libre a la de una partícula sólida aislada en un gran volumen de agua. Se denomina caída perturbada al descenso simultáneo de una ***nube*** de partículas. El tamaño hidráulico en este caso se expresa por la velocidad de la caída uniforme del centro de gravedad de la ***nube***, que es siempre inferior a la velocidad de la caída libre de las partículas.

El caudal de arrastre de fondo para velocidades de arranque se puede obtener de la fórmula de V. N. Goncharov:

$$q_{fon} = 2.08\left(\frac{v}{v_x}\right)\left(\frac{d}{H}\right)^{1/10}(v - v_x)d\ ,$$

o de la fórmula de I. I. Levi para $\frac{d}{h} > \frac{1}{300_{41}}$

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i\, p_i}{P}$$

donde:

q_{fon}: caudal de acarreos de fondo en kg/s para 1 m de ancho de la corriente.

v: velocidad media de cálculo de la corriente.

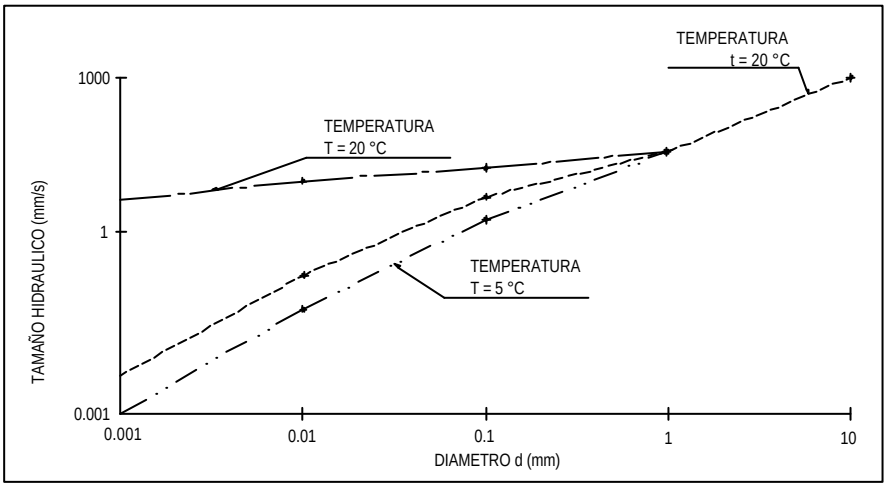
V_x: velocidad media de la corriente

V_x : velocidad media de la corriente, que corresponde a la velocidad de arranque de las partículas

d: diámetro medio de la partícula.

H: profundidad de la corriente.

Figura 2.3 Relación del Tamaño Hidráulico en Función de las dimensiones de las partículas arrastradas.



FUENTE: Beach Processes and Sedimentation.

2.1.3. Transporte *Eólico.*

El viento es también una fuente importante de aporte de sedimento hacia las costas, comúnmente los vientos van en dirección a la costa, siendo muy efectivo en la remoción de arena de la playa y de las dunas cercanas a ella, y sus volúmenes son considerados importantes en la perdida y ganancia de arena en las playas.

El volumen total de arena esta dividido por el tiempo que requiere para la formación del área de dunas, siendo estimadas por el rango de perdidas y ganancias de material. El aprovechamiento más usual es medido por el rango en el cual las dunas van ganando o perdiendo terreno con respecto a la línea de playa.

2.2. Dinámica Litoral.

2.2.1. Régimen de playas.

El perfil de la playa puede verse modificado como efecto de un mecanismo natural, que es causado por el rompimiento y la disipación de energía de las olas sobre el frente playero, ya que las playas sirven como amortiguador protegiendo las dunas y las costas, de la acción intensa de las olas.

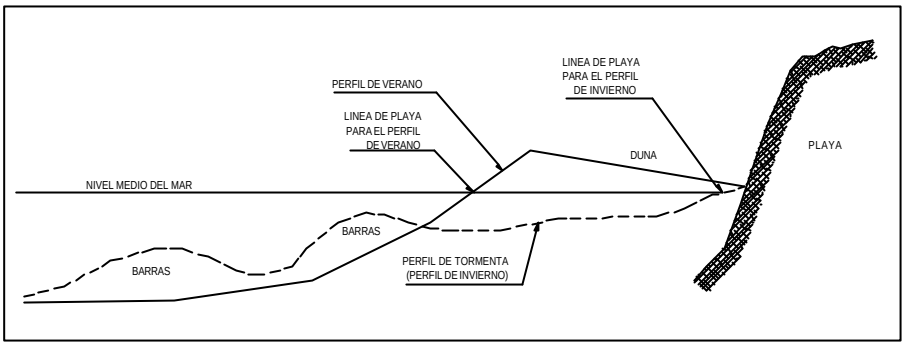
Uno de los aspectos más importantes de una playa es la dinámica litoral particular para cada una de ellas, que es el resultado de la pérdida o ganancia de material de sedimento granular, que constantemente se presenta en respuesta a los cambios del oleaje, y que ocurren entre la línea de mar y la playa. De esta manera, se puede entender al perfil de una playa en términos de cómo está condicionado a los cambios del oleaje y de la cantidad de sedimento presente en la zona.

Sin embargo, las mareas producen fluctuaciones en el nivel del mar sobre la costa. Las variaciones estaciónales pueden ser detectadas por medio del incremento de 10 cm con respecto a la playa. Este incremento es causado por las lluvias de tormenta, las descargas de los ríos, los cambios de temperatura en el agua. Otro factor para el cambio en los niveles del mar es causado por los deshielos en los glaciales por más de 100 años. Los niveles del agua han cambiado en más de 100 m en los últimos 20 000 años.

2.2.2. Fenómeno de incremento y recesión de playas.

Los cambios en el perfil playero son frecuentes en dos épocas del año y son conocidas como *perfil de verano* y *perfil de invierno*. El *perfil de verano* es caracterizado por un crecimiento de la zona playera, en donde el perfil tiene una pendiente muy suave y la profundidad del mar es muy pequeña, este fenómeno se presenta por que el oleaje en esta época del año es muy suave. Caso contrario con el *perfil de invierno* en el cual se retrae la línea de playa y la profundidad del mar se hace más profunda, el oleaje en época de invierno es muy intenso; sin embargo el volumen de sedimento en ambas etapas ese el mismo, y esto sucede porque la arena en época de invierno se concentra en barras dentro del mar, de está manera queda claro que los cambios en el perfil de la playa están asociados a las condiciones del oleaje.

Figura 2.4 Diagrama que muestra los perfiles de verano e invierno –Fenómeno de Incremento y Recesión de Playas.



FUENTE: Beach Processes and Sedimentation.

El perfil de la playa también puede ser modificado por diferentes factores físicos presentes en las costas como el viento, las mareas, la dirección del transporte de sedimentos y el aporte que tienen los ríos hacia el mar. Por esta razón es importante realizar un balance de sedimentos en la zona para conocer el volumen de sedimento que entra y sale por los límites del área en estudio.

2.2.3. Medidas para la Preservación de Playas y Obras de Protección.

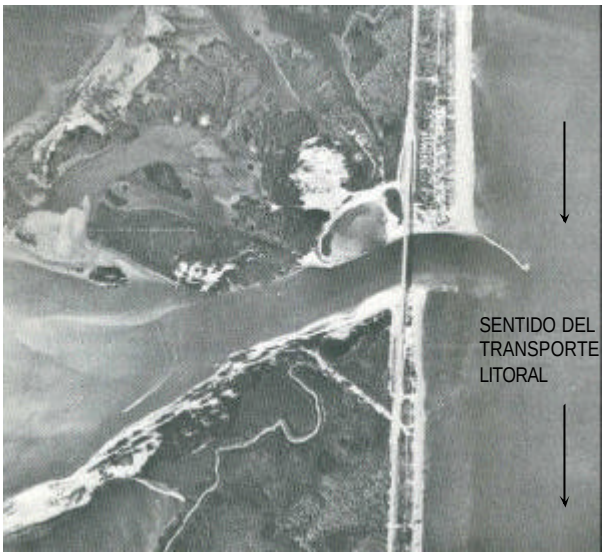
Cuando se estabiliza una playa, se tiene la certeza de que la playa puede tender al equilibrio natural, en donde las olas cumplirán únicamente con la redistribución de la arena mediante las fuentes de aporte natural. Sin embargo cuando las *escolleras*, *rompeolas* u otras estructuras marinas son construidos en la costa, el equilibrio natural puede verse modificado, en algunos casos con consecuencias devastadoras.

Algunos de los casos más severos de la erosión pueden ser atribuidos a estas obras, que modifican en gran medida el equilibrio natural de la playa. Razón por la cual es necesario conocer el uso que se le da a cada una de las obras de protección.

Escolleras. Son construidas en las desembocaduras de los ríos, que en muchos de los casos son accesos a los recintos portuarios, teniendo como fin el de estabilizar el canal de acceso al puerto y protegerlo de las olas de tormenta, además de impedir la formación de barras en la desembocadura a consecuencia del transporte litoral. Las escolleras generalmente se extienden desde la desembocadura del río hasta más allá de la zona de rompiente.

Como la arena se mueve a lo largo de la playa bajo un proceso natural en el que las olas rompen con cierto ángulo respecto a la línea de playa, convirtiendo a la estructura en un obstáculo en los procesos del transporte litoral de la zona. De ésta manera la arena se acumula sobre una parte de la escollera haciendo que la línea de playa se extienda. Al mismo tiempo, se presenta erosión después de la segunda escollera -respecto al sentido del transporte litoral-, y más abajo se continúa con el transporte litoral.

Figura 2.5 Vista de la Escollera que se encuentra en San Sebastián Miami Florida. Se aprecia como la arena se va depositando en la parte superior haciendo que crezca la playa; caso contrario sucede en la parte de la escollera de abajo, donde se percibe el daño por erosión que se ha causado.



FUENTE: Beach Processes and Sedimentation.

La construcción de escolleras interrumpe el movimiento natural de la arena a lo largo de la playa además de causar erosión en las playas adyacentes a las estructuras.

Rompeolas. Son estructuras las cuales protegen una parte de las playas, proveyendo la playa de una barrera artificial en contra de las olas. Los rompeolas son construidos en varios tipos, pero generalmente se ligan a tierra en uno de sus extremos, extendiéndose hasta más allá de la zona de rompiente.

Figura 2.6 Vista del Rompeolas que se encuentra en Puerto Progreso, Yucatán.

FUENTE: www.puerto-progreso.com.mx

Otra variación de los rompeolas, son los construidos paralelos a la costa, los cuales no tienen ningún punto de unión con la playa. Estas estructuras tienen la finalidad de reducir la energía de las olas antes de llegar a la playa, además de reducir la capacidad de las olas para realizar el transporte litoral en la zona.

Diques Marinos. Son construidos a partir de bloques de concreto sólido, acero, tablaestacas, etc., edificados a veces como muros verticales; sin embargo estos elementos fomentan la erosión en las costas al pie de la estructura, -ver figura 2.7-.

Figura 2.7 Vista de la de un Dique Marino, que se encuentra en Bridlington Inglaterra, la fotografía data del año 1900. Se aprecia que este dique se construyó a partir de bloques de concreto.

FUENTE: Beach Processes and Sedimentation.

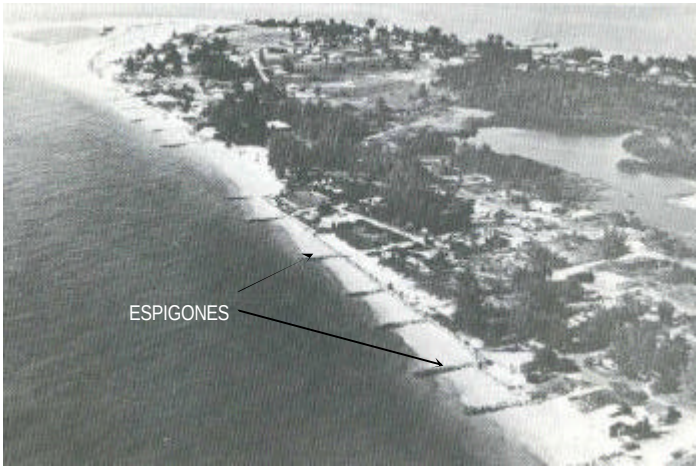
La fuerza del oleaje se ve reflectada en el muro, ocasionando una posible falla en la estructura. Comúnmente los diques deben ser construidos lejos de las áreas adyacentes a las costas frente a la línea de playa, ya que si este tipo de estructura se usará como una solución al problema de erosión; provocaría que la línea de playa continuara retrayéndose.

Espigones. Este tipo de estructura se construye de manera perpendicular a la playa, y su función principal es la de atrapar literalmente el sedimento que pasa por medio del transporte litoral en la zona. Esta estructura se emplea frecuentemente para la rehabilitación de una playa que ha sufrido de una gran perdida de material –erosión-.

Son relativamente cortas en longitud, en comparación con las anteriores estructuras; su longitud varía entre los 10 m y los 200 m. En su forma son muy parecidas a las escolleras; sin embargo, su función es muy diferente, ya que obstruyen el paso del transporte litoral de la zona, provocando que el material se quede confinado entre los espigones.

Para proteger una longitud amplia de playa con problemas de erosión, es necesario emplear varios espigones -como se muestra en la figura 2.8-. El segmento de playa entre dos espigones comienza a crecer conforme a los factores físicos que se van presentado a lo largo del año.

Figura 2.8 Vista de los Espigones que se encuentran en Tampa Bay, Florida. En la imagen se observa que los espigones se emplearon como medida de solución para ganarle terreno al mar.



FUENTE: Beach Processes and Sedimentation.

2.3. Conclusiones.

Los procesos de sedimentología son muy importantes para realizar un buen estudio para la realización de proyectos sobre la rehabilitación de las playas con problemas de erosión, ya que no se tiene los conocimientos correctos sobre el comportamiento de la playa no se podrán obtener buenos resultados al momento de proponer una solución viable al problema de erosión.

Por otro lado debemos tener en cuenta que la morfología de las playas es particular de cada una de ellas, por esta razón es importante conocer el comportamiento histórico de la playa, para entender su comportamiento.

Con relación a las estructuras que se pretenden desarrollar en una zona dada, se deben evaluar los efectos positivos y los negativos que tendrían sobre el transporte de sedimentos para evitar problemas de erosión.

CAPITULO 3

ASPECTOS JURÍDICOS DE LA ZONA FEDERAL MARÍTIMO TERRESTRE.

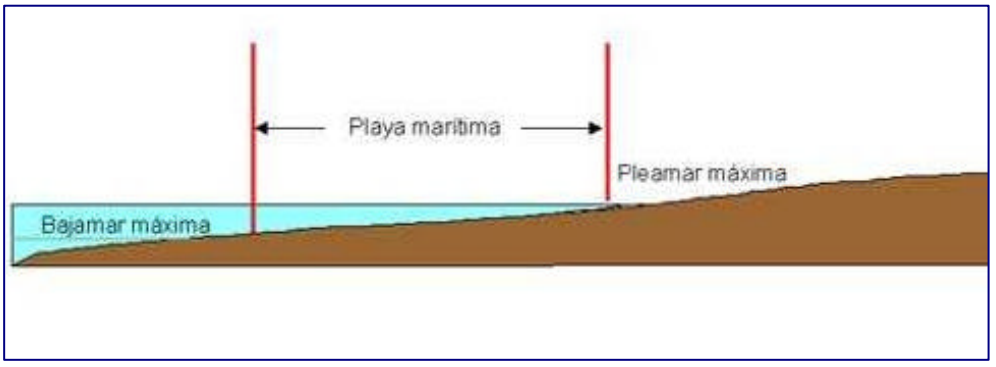
3.1 Conceptos Básicos de la Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros.

El incluir este tema tiene el propósito de comprender la importancia que desempeñan las leyes y reglamentos para regir las playas de nuestro de país, ya que cuenta con 17 estados costeros con una extensión litoral de más de 11 mil km, distribuidos en 166 municipios costeros. En donde por disposición legal, corresponde al Gobierno Federal a través de la *SEMARNAT* el administrar las playas, La *Zona Federal Marítima Terrestre* y los terrenos ganados al mar o a cualquier otro depósito de aguas marítimas; por tal motivo describiré conceptos básicos con los que la *Dirección General de la Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros* denomina a cada uno de los componentes de las playas (litorales marítimos).

El Territorio sobre el que el Estado ejerce su soberanía, sirve de asiento a su población y esta delimitado por fronteras naturales (litorales marinos) y artificiales (fronteras definidas en tratados Internacionales). Sobre estos patrimonios, el Estado tiene las facultades en un acto administrativo.

- *Las Playas*, se definen como las partes de tierra que por virtud de la marea cubre y descubre el agua, desde los límites de mayor reflujo hasta los límites de mayor flujo anuales -ver figura 3.1-.

Figura 3.1 Esquema de los elementos que componen una Playa.



FUENTE: Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros; México, 2002.

- *La Zona Federal Marítimo Terrestre*, está constituida por una franja de 20 m de ancho sobre la tierra firme, transitable y contigua a dichas playas o, en su caso a las riberas de los ríos, desde la desembocadura de estos en el mar, hasta 100 m río arriba -ver figura 3.2-.

Figura 3.2 Esquema de la manera en que se mide la Zona Federal Marítimo Terrestre.

FUENTE: Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros; México, 2002.

- *Los Terrenos Ganados al Mar*, se obtienen cuando por causas naturales o artificiales se rellena o azolva una parte de la costa y se define como la diferencia entre la delimitación de Zona Federal Marítimo Terrestre anterior y la nueva.

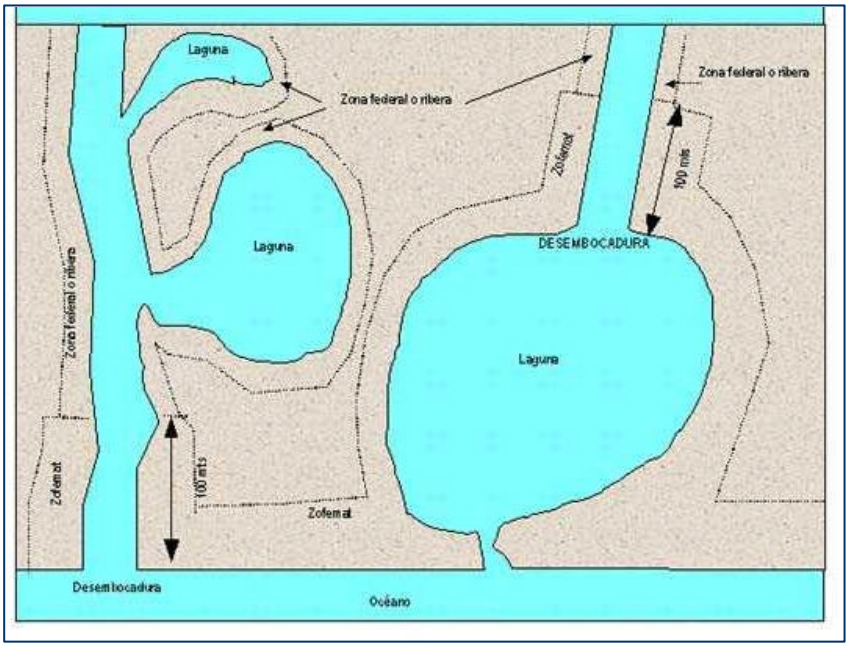
  Si se ganan terrenos al mar, los límites de la *Zona Federal Marítimo Terrestre* se establecerá, de acuerdo con la nueva configuración física del terreno, de tal manera que la superficie de tierra que está entre el límite de la nueva Zona Federal Marítimo Terrestre y el límite de la Zona Federal Marítimo Terrestre original.

- *Ambientes Costeros*, son los humedales, marismas, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar y de sus litorales o zonas federales.

- *Cayos y arrecifes*, la totalidad de la superficie de los cayos y arrecifes ubicados en el mar territorial, constituirán Zona Federal Marítimo Terrestre.

- *Lagos, lagunas, esteros o depósitos de aguas naturales de aguas marinas*, en el caso de este grupo de cuerpos de agua que se comunican directa o indirectamente con el mar, la franja de 20 m de Zona Federal Marítimo Terrestre se contará a partir del punto a donde llegue el mayor embalse anual o límite de la pleamar -ver figura 3.3-.

Figura 3.3 Esquema que muestra la franja que limita la Zona Federal Marítimo Terrestre en cuerpos de agua que desembocan en el mar.



FUENTE: Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros; México, 2002.

- *Marinas*, en el caso de marinas artificiales, no se delimitaran Zona Federal Marítimo Terrestre, cuando entre dichas marinas o esteros y el mar medie una Zona Federal Marítimo Terrestre. La Zona Federal Marítimo Terrestre correspondiente a las marinas que no se encuentren en ese supuesto (marinas artificiales), no interfiera con el uso o destino de sus instalaciones.

3.2 Delimitación y Reglamentación para las Construcciones en la Zona Federal Marítimo Terrestre.

Desde los inicios del siglo XIX se ha hecho referencia a la franja de 20 m, inicialmente como delimitación de las playas de las cuales formaban parte del territorio nacional, en un principio se le conocía a esa franja con el nombre de playa dándole el carácter de propiedad o bien de dominio público, hoy en día el nombre que se le ha dado a esta franja es el de Zona Federal Marítimo Terrestre (ZFMT).

El Reglamento de la ZOFEMATAC en su artículo 2° establece algunos conceptos que se requiere conocer para una mejor comprensión de dicho reglamento.

Artículo 2°. Para los efectos del presente Reglamento se entenderá por:

I. Ley: La Ley General de Bienes Nacionales;

II. Secretaría: La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología; y

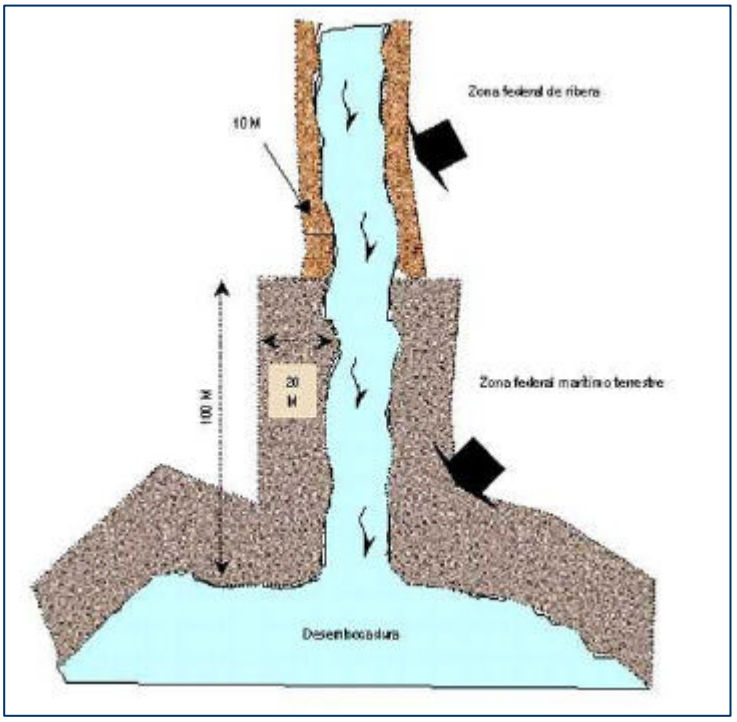
III. Reglamento: El presente Reglamento.

Los aspectos técnicos que se consideran para delimitar la ZFMT en las playas y en las desembocaduras de los ríos se describen en el artículo 3° del *Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar,* Donde cita textualmente lo siguiente:

Artículo 3°. La Zona Federal Marítimo Terrestre se deslindará y delimitará considerando la cota de pleamar máxima observada durante treinta días consecutivos en una época del año en que no se presenten huracanes, ciclones o vientos de gran intensidad y sea técnicamente propicia para realizar los trabajos de delimitación.

Para el caso de los ríos, la ZFMT la determinará la SEMARNAT, desde la desembocadura de estos hasta el punto en el que el nivel de flujo anual sea mayor, lo que no debe exceder los doscientos metros; para la *Ley General de Bienes Nacionales* es de cien metros –ver figura 3.4-.

Figura 3.4 Esquema de la manera en que se mide la Zona Federal Marítimo Terrestre , en la desembocadura de un río.



FUENTE: Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Zona Federal Marítimo Terrestre y Ambientes Costeros; México, 2002.

En la determinación de la ZFMT, el Reglamento hace mención en el artículo 4° de dicho reglamento.

Artículo 4°. La ZFMT se determinará únicamente en áreas que en un plano horizontal presenten un ángulo de inclinación de 30° o menos.

En el uso de playas el artículo 7° en su fracción II establece los términos de la construcción sobre la línea de playa, haciendo mención a lo siguiente:

Artículo 7°, Fracción II. Se prohíbe la construcción e instalación de elementos y obras que impidan el libre tránsito por dichos bienes, con excepción de aquéllas que apruebe la Secretaría atendiendo a las normas de desarrollo urbano, arquitectónicas y las previstas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la de Protección al Ambiente...

Para delimitar la Zona Federal, la ley establece las bases necesarias dentro del artículo 10°, citando lo siguiente:

Articulo 10°. El Gobierno Federal a través de la Secretaría, establecerá las bases de coordinación para el uso, desarrollo, administración y delimitación de las playas, de la Z.F.M.T., terrenos ganados al mar o a cualquier otro depósito que se forme con aguas marítimas, solicitando al efecto la participación de los Gobiernos Estatales y Municipales, sin perjuicio de las atribuciones que este Reglamento otorga a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y otras dependencias competentes.

Cuando por la naturaleza del proyecto se haga necesaria la obtención de más de una concesión, permiso o autorización que corresponda otorgar a la Secretaría, ésta instrumentará los mecanismos que permitan que su estudio, trámite y resolución se realicen de manera conjunta.

Si para la realización del proyecto se requiere el otorgamiento de concesiones, permisos o autorizaciones además de por la Secretaría, por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes u otra dependencia, se deberá establecer la coordinación necesaria a fin de facilitar su resolución simultánea.

3.3 Aspectos Jurídicos Asociados a la Pérdida o Ganancia de Terrenos al Mar

En algunas ocasiones los terrenos quedan invadidos por el mar lo cual se denomina *Erosión Playera* provocando la perdida de material granular de las costas, para este caso el artículo 18° del *Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar,* hace mención de lo siguiente:

Articulo 18°. Cuando de manera definitiva y permanente algún terreno quede invadido por el agua del mar, la Secretaria realizará el deslinde, identificación topohidrográfica –topobatimétrica- y amojonamiento de la nueva Zona Federal Marítimo Terrestre. Los terrenos que integran la nueva Zona Federal Marítimo Terrestre pasarán por ese hecho a ser propiedad de la Nación, de acuerdo con la legislación en materia, pero a sus antiguos propietarios tendrán derecho de preferencia para que se les concesionen, conforme a las disposiciones aplicables.

Se entiende que un terreno ha quedado invadido de manera definitiva y permanente cuando haya permanecido invadido por el agua del mar por un lapso ininterrumpido mayor a los ciento ochenta días naturales y del estudio que se realice no se prevea su retiro gradual.

Los propietarios de los terrenos colindantes o aledaños a la Zona Federal Marítimo Terrestre, deberán dar aviso por escrito a la Secretaría cuando tengan conocimiento debido a los movimientos marítimos se estén cubriendo de agua algunos terrenos. En este caso, los interesados darán aviso asimismo de la ejecución de obras de defensa, mismas que deberán sujetarse a los requisitos técnicos que establezca la propia Secretaría, en coordinación, en su caso, con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

De la misma forma en la *Ley General de Bienes Nacionales* describe en su Articulo 51° la manera en la que procedería el *Estado* si se presentará un problema de Erosión en la línea de playa, establece lo siguiente:

Articulo 51°(Ley General de Bienes Nacionales). En el caso de que la Zona Federal Marítimo Terrestre sea invadida total o parcialmente por las aguas, o que estas lleguen inclusive a invadir terrenos de propiedad particular colindante con la Zona Federal Marítimo Terrestre, ésta se delimitará nuevamente en los términos de esta Ley y sus reglamentos. Las áreas de los terrenos que pasen a formar parte de la nueva Zona Federal Marítimo Terrestre perderán su carácter de propiedad privada. Pero sus legítimos propietarios tendrán el derecho de preferencia para que se les concesione, con forme a lo establecido por esta Ley.

La *Ley General de Bienes Nacionales* y *El Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar* tienen mucha similitud en sus artículos refiriéndose al Fenómeno de Erosión en las Playas, en los cuales la Zona Federal siempre estará limitada por la franja de 20 m respecto al Nivel de Pleamar Máxima registrada.

Para el caso en el que no se presente una erosión en la playa, por medio de terrenos ganados al mar, el reglamento menciona en su artículo 5° lo siguiente:

Artículo 5°. Las playas, de la ZFMT y los terrenos ganados al mar, o a cualquier otro depósito que se forme con aguas marítimas, son bienes del dominio público de la Federación, inalienables e imprescriptibles y mientras no varíe su situación jurídica, no están sujetos a la acción reivindicatoria o de posesión definitiva o provisional.

Corresponde a la SEMARNAT poseer, administrar, controlar y vigilar los bienes a que se refiere este artículo, con excepción de aquellos que se localicen dentro del recinto portuario, o se utilicen como astillero, varaderos, diques para talleres de reparación naval, muelles y demás instalaciones a que se refiere la *Ley de Navegación y Comercio Marítimos*; en estos casos la competencia corresponde a la *Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT)*.

Cuando un particular o una empresa deseen ganar terrenos al mar deberán tener autorización de las instituciones competentes, tal como lo expresa el siguiente artículo del *Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar*:

Articulo 39°: Sólo podrán ejecutarse obras para ganar artificialmente terrenos al mar o a cualquier otro depósito de aguas marítimas, con la previa autorización de la Secretaría y con la intervención que corresponda en el ámbito de su competencia a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, las que determinarán la forma y Términos para ejecutar dichas obras.

Cuando se trate de obras portuarias o marítimas, la supervisión y vigilancia la ejercerá la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Lo anterior hace referencia a los terrenos ganados al mar por medios artificiales, sin embargo en algunas ocasiones las causas que originan este incremento son de manera natural, el reglamento hace referencia a este caso en el siguiente artículo:

Articulo 40°: Cuando por causas naturales se descubran y ganen terrenos al mar o a cualquier otro depósito de aguas marítimas, corresponderá a la Secretaría realizar los estudios técnicos necesarios para identificar y deslindar dichos terrenos.

Para la concesión de terrenos ganados al mar, el articulo 42° de dicho Reglamento estipula lo siguiente:

Articulo 42°: Los terrenos ganados al mar o a cualquier otro depósito de aguas marítimas en forma natural, deberán preferentemente destinarse al servicio de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, Estatal o Municipal, para el cumplimiento de los fines públicos a su cargo.

Cuando dichos terrenos no sean aptos para destinarse a fines Públicos, la Secretaria podrá otorgar concesiones o permisos a favor de particulares para su uso, aprovechamiento o explotación.

3.4 Conclusiones

En este capitulo presenté los conceptos básicos de la Zona Federal Marítimo Terrestre, así como la reglamentación para la construcción de infraestructura en la esta zona, además los escenarios que se presentan cuando por causas naturales o artificiales se provoca erosión en las playas o en el caso contrario de la ganancia de terrenos al mar de manera natural o artificial.

El enfoque que se le da al presentar en este capitulo en la presente tesis, es el de conocer la reglamentación que aplicaría cuando ocurriera erosión en la costa y afectará a terrenos cercanos al mar y que de un momento a otro se presentaran fenómenos naturales extremos los cuales provocarían la recesión de la playa, ocasionando que la ZFMT cambiara de lugar afectando los predios de particulares ocasionando que las condiciones de propiedad cambiaran de tal manera que pasarían de ser dueños a concesionarios.

En uno de los artículos del *Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar*, estipula que todo proyecto para la restitución de la playa deberá tener autorización de las Instituciones correspondientes para realizar dicho proyecto. De esta manera si se desea dar una solución al problema de erosión en la zona que ha quedado invadida por el mar, debe darse conocimiento a las instituciones competentes en material de la limitación de la Zona Federal Marítimo Terrestre.

CAPITULO 4

CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA SOLUCION DE LA EROSION PLAYERA.

4.1 Generalidades.

Una vez identificados los factores naturales y artificiales que provocan la erosión en las playas; así como los artículos de leyes y reglamentos que hacen referencia a la pérdida y ganancia de terrenos al mar los cuales se mencionaron que en capítulos anteriores, es momento de proponer una solución que contribuya a mitigar la pérdida de material granular en las costas sin alterar de manera importante el medio ambiente existente en la zona.

Las soluciones que se propongan deben contar con un análisis previo de los parámetros físicos que imperan en la zona, sin embargo antes de iniciar con el diseño es importante conocer algunas definiciones empleadas en el estudio de la Hidráulica Marítima, las cuales a continuación se mencionan:

Onda (ola):

Es la ondulación de la superficie libre del líquido.

Cresta de la onda:

Punto donde el perfil de la onda tiene mayor altura. También se entiende como la zona del perfil arriba del nivel medio de la onda.

Valle de la Onda:

Punto donde el perfil de la onda tiene el nivel más bajo. También se entiende la como la zona del perfil bajo el nivel medio de onda.

Altura de Onda (H):

Distancia vertical medida entre la cresta y el valle de la onda.

Altura del Perfil (h):

Desnivel entre cualquier punto de la superficie de la onda y el nivel de reposo.

Amplitud de Onda (a):

Se toma como la distancia entre la cresta y el nivel medio de la onda.

Longitud de Onda (L):

Distancia horizontal entre dos crestas o valles consecutivos.

Periodo de Onda (T):

Tiempo que transcurre para que pasen dos crestas o valles consecutivos por la misma sección.

Frecuencia de Onda (f):

Es el recíproco de su periodo.

Celeridad de la Onda (C):

Velocidad con que se traslada la onda a través de la superficie del líquido (C=L/T).

Tren de Ondas:

Es un conjunto de ondas cuyo periodo es constante, no así su altura.

Aguas Profundas:

Se presenta esta condición cuando la celeridad de la onda no es afectada por la profundidad y solo depende de su periodo, a las variables relacionadas con esta condición se les agrega el subíndice 0.

Aguas Intermedias o de Transición:

Es la condición que se presenta entre aguas profundas y someras, en este caso la celeridad depende del periodo de la onda y de la profundidad del agua.

Aguas Someras o Poco Profundas:

En este caso la celeridad depende únicamente de la profundidad y por tanto es independiente del periodo de la onda. A las variables relacionadas con esta condición se les agrega el subíndice b.

Esbeltez de la Onda:

Se define como la relación entre la altura y longitud de la onda. Esta relación tiene un valor máximo de 1/7 para aguas profundas y de 1/10 para las someras.

Propagación:

Es el término utilizado para describir el paso de una onda a través de la superficie del líquido.

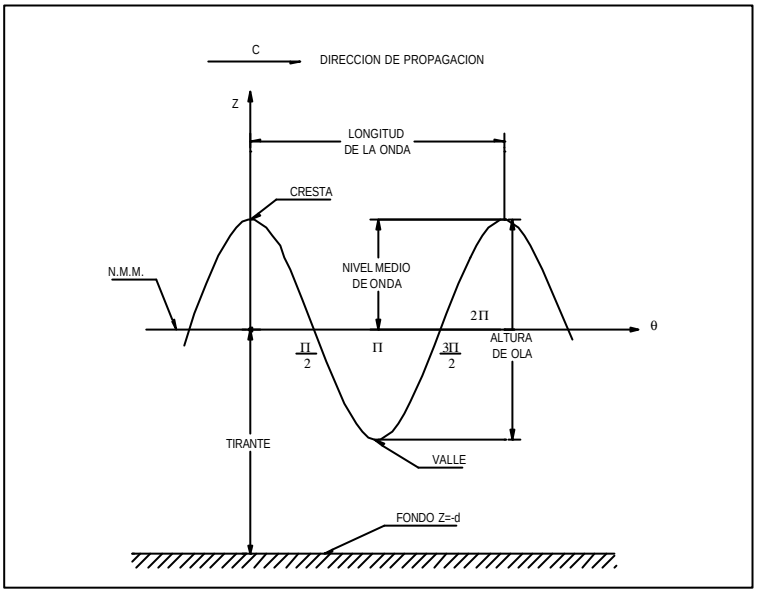
Milla Náutica:

Es la unidad de longitud que se utiliza frecuentemente para expresar distancias; es igual a 1.852 km.

Nudo (knout):

Es la unidad de velocidad e igual a una milla náutica por hora; la velocidad del viento o la celeridad de la onda, generalmente se expresan con esta unidad.

Figura 4.1 Diagrama esquemático de una onda senoidal.



FUENTE: U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual.

Braza (fathom):

Es la unidad de longitud que generalmente se utiliza para expresar la profundidad del terreno en las cartas marinas; es igual a 1.8288 m.

Nivel Medio de Onda:

Es el nivel que establece que el área de la cresta arriba de él sea igual al área del valle bajo ese mismo nivel –ver figura 4.1-.

Nivel Estático o de Reposo:

Nivel de la superficie del agua antes de que pase la onda, es decir es el nivel de la superficie sin ondas, a la distancia entre este nivel y el medio de la onda, se designa como Δy.

Una vez conocidas las definiciones empleadas dentro del estudio de la *Hidráulica Marítima* se procederá a conocer los *Parámetros Físicos* empleados en el diseño de las obras de protección.

4.2 Parámetros Físicos de Diseño.

Los estudios preliminares necesarios para el diseño de una estructura son el principio de cada proyecto para que una estructura de protección sea realmente funcional, constructivamente factible y económica, ya que las condiciones físicas son particulares en cada lugar del mundo, por ello es indispensable realizar un estudio preliminar de las características físicas imperantes en la zona de estudio.

A continuación se listarán y desarrollarán los parámetros físicos necesarios para el diseño de una obra de protección.

4.2.1 Características Generadoras del Oleaje.

Para conocer el posible oleaje que se presenta en la zona se necesita determinar el área de la generación y posteriormente, como el viento es el que genera el oleaje, se obtiene la velocidad y la duración del viento que se presenta en la zona, para realizar lo anterior es necesario utilizar la información suministrada en cartas o mapas de superficie que indican la ubicación de las isobaras –son líneas que representan las variaciones de presión dentro de los mapas y cartas-, la velocidad del viento en algunos puntos y la dirección en los frentes de aire. Conocidos el *Fetch*, la velocidad del viento y su duración se aplican los métodos de predicción del oleaje –ver el punto 4.2.2 Predicción del Oleaje-.

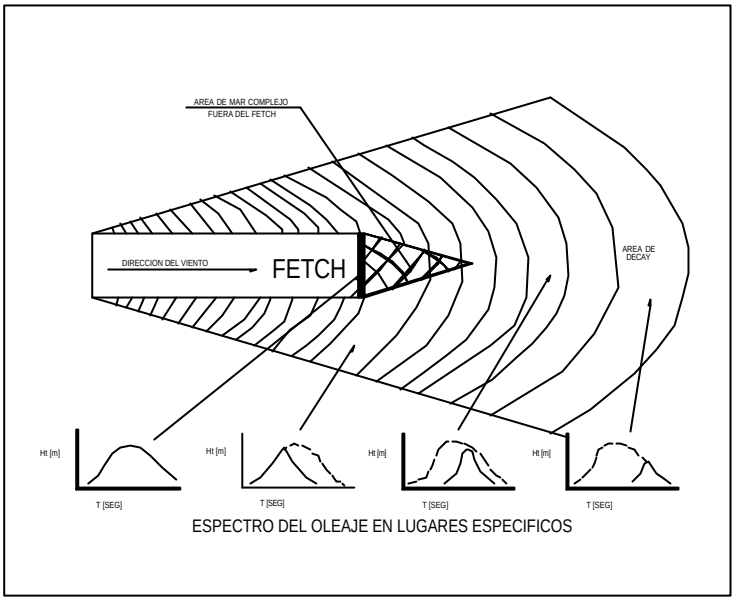
4.2.1.1 Fetch

El *fetch* es un área donde sopla el viento y por lo tanto es donde se generan las olas, su nombre está referido a la máxima longitud que tiene dicha zona, medida a lo largo de la dirección en donde actúa el viento sobre la superficie del mar. Su obtención se realiza con la ayuda de los mapas de superficie en los cuales se presentan las isobaras y las condiciones atmosféricas, las cuales permiten observar la posición y desarrollo de los fenómenos meteorológicos que ocurren en la zona de estudio.

La zona de generación esta acotada por una variable llamada *fetch*, el cual esta definido como la longitud donde sopla el viento, en dirección hacia el punto de la zona de estudio –ver figura 4.2-.

Para un *fetch* con isobaras casi rectas, las olas se desplazan en ángulos de 30° con respecto a la dirección promedio de los vientos. Por otro lado si las isobaras son curvas por lo general el ángulo en el que se desplazan las olas son de 45° respecto a la dirección promedio del viento.

Figura 4.2 Diagrama esquemático del área de generación del FETCH.



FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

Para la determinación o delimitación del *fetch* intervienen los siguientes factores:

a) *Separación entre Isobaras*

Cuando existen grandes distancias entre las isobaras, la velocidad del viento es pequeña y si la distancia (*decaimiento*) entre la costa y la terminación de la zona de generación es de más de 1,000 km y una velocidad del viento de 10 m/s (*20 nudos*) o menor no es de importancia. Por ello el tener espacios grandes entre isobaras indica que se presenta una frontera de la zona de generación.

b) *Frentes Meteorológicos*

La forma de las isobaras cambia continuamente haciendo que las masas de aire tengan movimientos, estos movimientos son el resultado de los frentes meteorológicos que se presentan en la zona de generación, estos frentes se clasifican en cuatro: *frente frío, frente caliente, frente estacionario y el frente ocluido (cerrado)*, cada uno de ellos aparece indicado en los mapas de superficie por medio de símbolos.

c) *Línea de Costa*

Las líneas de costa o de tierra para el caso de lagos, lagunas, ríos, bahías, áreas de mar rodeadas de manera total o parcial por tierra, forman una frontera natural para la delimitación del *fetch*.

d) *Aproximación*

Este punto se refiere a la aproximación con que se realizaron los mapas de superficie, ya que la información que se utiliza, generalmente, es muy limitada (para el caso de México). Por lo que la falta de precisión en la construcción de las isobaras, pude provocar errores en la estimación de la zona de generación y de igual manera en la obtención del *fetch*.

Una vez conocidos los factores que intervienen la determinación y la delimitación del *fetch*, el siguiente paso es conocer el procedimiento para la obtención de la zona de generación y la determinación del *fetch*, el cual a continuación se lista.

El procedimiento a seguir para la obtención de la del *fetch*, es el siguiente: A partir de las isobaras y tomando en cuenta su curvatura se pueden delimitar la zona de generación; para ello hay que considerar que el viento real forma un ángulo de 10° a 15° con la dirección del viento estimada en los mapas de superficie. Sin embargo se ha observado que las olas se mueven en ángulos de 30° a 45° con respecto a la dirección de las isobaras, dependiendo de la curvatura de éstas.

Por lo anterior las ondas pueden desplazarse hacia ambos lados de las isobaras, a 30° si las isobaras son rectas, y 45° si son curvas, esto se toma en cuenta para delimitar la zona de generación.

Así de esta manera las isobaras cercanas al punto de interés y se busca una tangente que forme con ellas un ángulo de 30° a 45° y que el punto en estudio esté contenido sobre uno de los lados de dicho ángulo. Los puntos de tangencia de las isobaras se unen con un segmento de recta, determinando de esta manera la zona de generación. Del polígono que resulta, se elige el vértice más distante al punto en estudio, y trazando una recta entre ellos se obtiene el *fetch*.

1. Para un punto dado, el punto *i* ubicado en la isobara *j*, se traza una línea tangente de tal manera que uno de los lados del ángulo formado por la línea tangente y la dirección del viento, sea de 45°, pase por el punto A en estudio. Para la frontera superior la prolongación de la línea tangente y para la inferior la dirección del viento considerado.

2. La zona de generación se forma una parte, uniendo los puntos de frontera calculados en el paso anterior y por la línea de costa o en su defecto hasta la última isobara, antes de que su separación se amplíe o se tenga información.

3. Del polígono que resulta, se elige el vértice más distante al punto en estudio y trazando una recta entre ellos se tiene el *fetch*, que es la distancia entre el vértice más alejado del punto en estudio y el límite de la zona de generación, y la longitud de la zona de decaimiento, que es la distancia entre el límite de generación y el punto de estudio.

   Sin embargo esto muchas veces no se cumple ya que en ocasiones, solo se cuenta con zonas de generación y no con zonas de decaimiento.

4.2.1.2 Velocidad del Viento

El viento es el movimiento de las masas de aire en la atmósfera con relación a la superficie terrestre, originado por la diferencia de densidades de masas de aire y diferentes temperaturas. Sin embargo los movimientos de las masas de aire en otras direcciones se denominan corrientes de aire.

Los vientos son corrientes horizontales que fluyen con relativa proximidad a la superficie terrestre formándose por las diferencias de presión atmosféricas atribuidas a las variaciones de presión, de temperatura o de densidad. Los vientos se originan gracias a que el aire que se encuentra sobre la superficie terrestre o libre del agua, se calienta a tal grado que éste se dilata ocasionando que fluya hacia arriba, dejando en su lugar una zona de vacío o centro de bajas presiones batimétricas, sin embargo esta zona se llena con aire más denso que proviene de otras regiones de alta presión.

La acción del viento sobre la superficie libre del agua provoca un estado de agitación sobre éste, el cual es conocido con el nombre de oleaje, por otro lado, los elementos que caracterizan a un viento se listan a continuación:

a) Dirección.

La dirección del viento se mide mediante el uso de una veleta, según los 360° geográficos en intervalos de 10°, para la caracterización de la dirección sobre el mar se emplean 16 rumbos de la rosa de viento, en el cual cada punto cardinal representado, es la dirección en la que sopla el viento, es decir, si un viento esta representado en el punto cardinal Este, esto significa que el viento es generado en el mismo punto cardinal Este.

b) Intensidad.

Es la velocidad con la que sopla el viento, expresada en m/s o en nudos (milla náutica / metros), la cual es medida por medio de los anemómetros.

Sin embargo, en la actualidad se hace uso del radar de viento para la determinación de la dirección y velocidad del viento en una zona determinada. En el mar la velocidad del viento se expresa en unidades de la escala *BEAUFORT* (modificada), -ver tabla 4.1-

Tabla 4.1 Escala de *BEAUFORT* para la caracterización de los vientos.

Grado	Nombre	Velocidad del viento a 10 m (km/h)	Condiciones del mar
0	Calma	0 a 1	Mar llana
1	Ventolina	1 a 5	Ondulación pequeña en la superficie, no hay producción de espuma.
2	Flojito	6 a 11	Olas cortas y bajas que no rompen; mar rizada.

3	Flojo	12 a 19	Oleaje que comienza a romper, poca espuma, mar rizada.
4	Bonacible	20 a 28	Olas de poca altura, borregos de espuma, marejadilla.
5	Fresquito	29 a 38	Se acentúa la longitud de las olas, generalización de borregos de espuma, esporádicamente rociones de espuma, marejada.
6	Fesco	39 a 49	Se inicia la formación de grandes olas, que rompen, rociones de espuma al aire, mar gruesa.
7	Frescachón	50 a 61	Crece la mar, mar muy gruesa.
8	Duro	62 a 74	Olas de gran altura, las crestas se despiden espuma pulverizada, mar arbolada.
9	Muy duro	75 a 88	Olas muy grandes, balances pronunciados, la espuma empieza a afectar la visibilidad.
10	Temporal	89 a 102	Olas considerables, mar blanca de espuma, balances fuertes.
11	Borrasca	103 a 117	Olas extraordinariamente altas, visibilidad escasa a causa de la espuma.
12	Huracán	> a 118	Atmósfera y mar completamente llenas de espuma, visibilidad casi nula.

FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

A continuación se listan las fuerzas que intervienen en la generación del viento:

a) Fuerza Centrífuga.

Es la fuerza que pretende sacar a las partículas de aire de su órbita.

b) Fuerza de Presión

El gradiente de presiones definido como la diferencia de valores de dos líneas de igual presión o isobaras contiguas que se encuentran a una distancia perpendicular de un grado geográfico, es una fuerza real de presión y origina un viento geostrófico[1].

[1] Viento geostrófico: Es una forma de estimar la velocidad real de la atmósfera libre. Se caracteriza por poseer isobaras rectas y paralelas, con un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y el gradiente de presiones. Para predecir el oleaje en los cuerpos de agua se emplean las cartas sinópticas de tiempo que presentan curvas isobáricas con variación a cada 3 o 4 milibares.

c) Fuerza de Fricción

La velocidad del viento disminuye cuando hace contacto con diversos obstáculos que se encuentran a su paso, provocando que el aire circule con cierta inclinación.

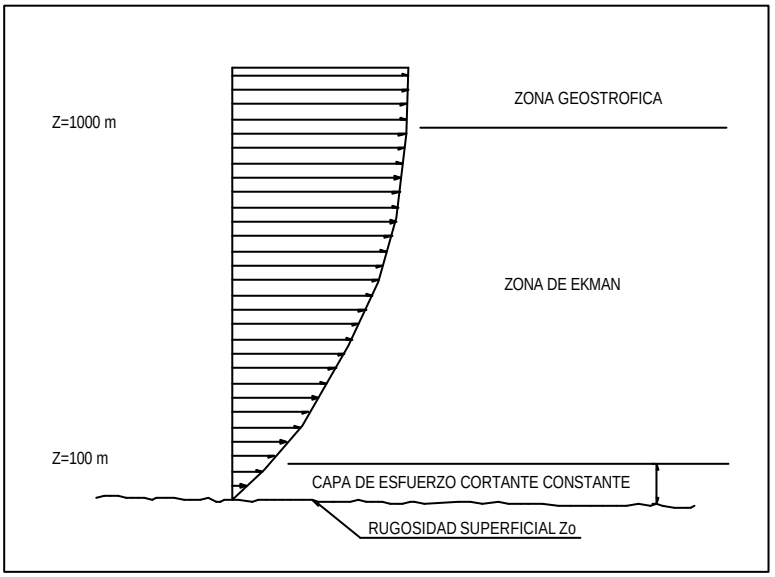
d) Fuerza de Coriolis

Su origen se encuentra relacionado con la velocidad de rotación de nuestro planeta, lo que provoca que las partículas sufran desviaciones aparentemente a la derecha en su trayectoria en el Hemisferio Norte; y a la izquierda en el Hemisferio Sur.

La energía cinética con la que cuentan los vientos huracanados, es la energía que ocasiona la mayoría de los daños, esto sucede porque la fuerza de los vientos aumenta de manera geométrica con respecto a la velocidad.

En la figura 4.3, se aprecian los vientos arriba de los 1,000 m de altura los cuales se comportan de acuerdo a un balance geostrófico, sin embargo, el comportamiento del viento debajo de esta altura, los vientos se ven afectados por la cercanía de la superficie del libre del mar provocando que se distorsione el campo de vientos, así como la velocidad y su dirección, los cuales están en función de la altura sobre la superficie media, rugosidad de la superficie, diferencia de la temperatura entre el aire y el mar y los gradientes horizontales de temperatura.

Figura 4.3 Diagrama esquemático de la distribución del viento.



FUENTE: U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual.

Bajo la región geostrófica se halla la capa límite que se divide en dos partes, una de esfuerzo constante de 10 a 100 m de altura y sobre ésta la región de Ekman. Sin embargo para el diseño son considerados los vientos sostenidos (duración mayor o igual a un minuto), así

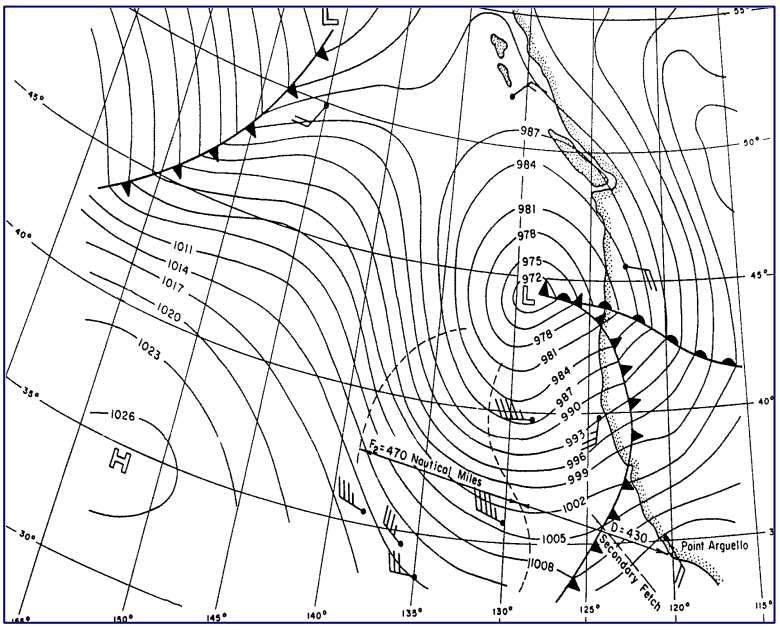
como las rachas (duración menor a un minuto). Los primeros se emplean para el cálculo de las cargas totales por viento de la estructura mientras que las rachas se usan para el diseño individual de algunos elementos de la estructura.

La velocidad del viento que actúa sobre la superficie del mar es llamada velocidad del viento real o formativo y se designa con la letra U; para la determinación de la velocidad del viento, es necesario equilibrar las cuatro fuerzas antes listadas o hacer uso de los mapas de superficie.

Los vientos en zonas costeras y con datos limitados sobre mediciones de viento formativo o generador del oleaje se hacen uso de métodos como el sugerido por el *U.S. Army Corps of Engineers*[2].

En la figura 4.4, se aprecia una carta sinóptica de tiempo del Océano Pacífico del 27 de octubre de 1950, a las 00:30 Z (00:30 horas del meridiano de Greenwich), en ella se observan las áreas de alta y baja presión, las flechas representan la dirección del viento.

Figura 4.4 Carta sinóptica de Tiempo.



FUENTE: U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual.

El procedimiento para calcular el viento real a 10 m de altura sobre el nivel medio del mar se describe a continuación:

a) Calcular el viento geostrófico, el cual requiere para el cálculo hacer uso de la figura 4.5, y de la ecuación que a continuación de muestra:

$$U_g = \frac{1}{r_a f}\frac{\Delta p}{\Delta n}$$

[2] "Coastal Engineering Manual", U.S. Army Corps of Engineers, (1996), págs. II-2-27 y II-2-28.

donde:

U_g velocidad del viento *geostrófico*, en nudos

$\Delta p/\Delta n$ gradiente horizontal de presiones

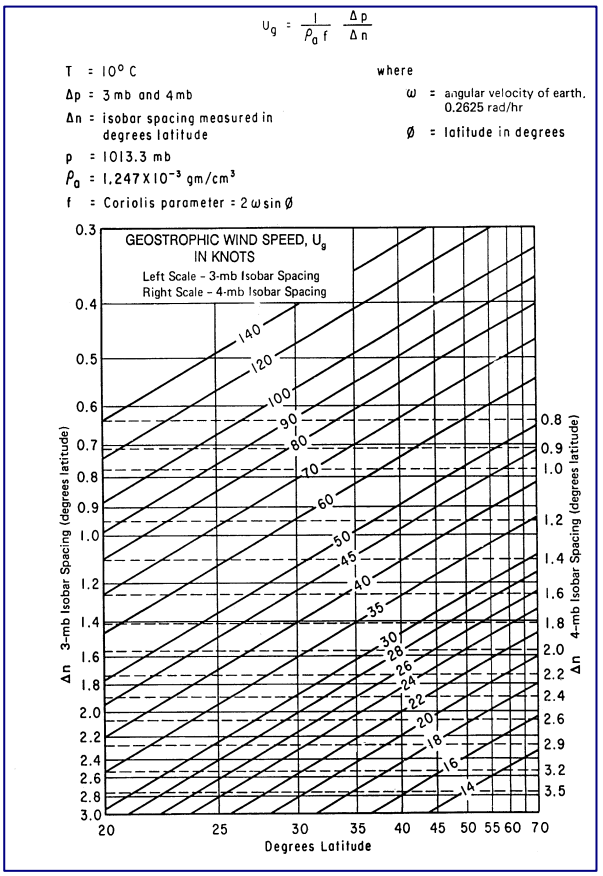
ρa densidad del aire, 1.247 kg/m^3

f parámetros de Coriolis. $f=2w\,sen\,f$.

ω velocidad angular de la tierra, w=0.2618 rad/hora.

ϕ latitud correspondiente al centro de gravedad de la zona de generación, en grados.

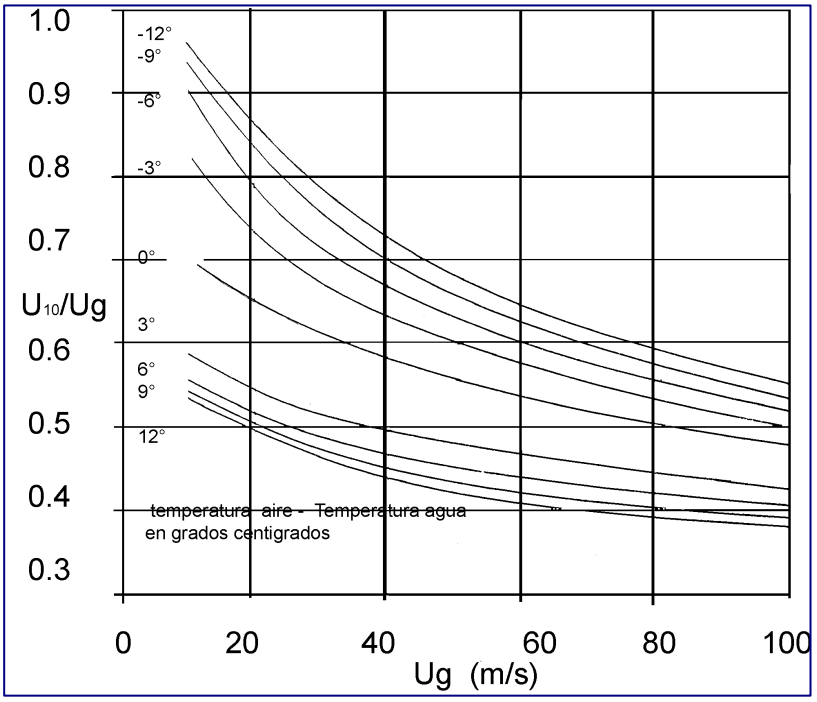
Figura 4.5 Escala de Viento Geostrófico.



FUENTE: U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual.

b) Con la diferencia de temperaturas del aire y del agua en grados centígrados y la obtención del viento geostrófico (obtenido en el inciso anterior), se calcula la velocidad del viento a 10 m de altura con ayuda de la figura 4.6.

Figura 4.6 Diagrama de la velocidad del viento a 10 m sobre el nivel del mar (U_{10}), para diferentes temperaturas entre el aire y el agua.



FUENTE: U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual.

4.2.2 Oleaje Normal y Ciclónico

Generalmente el oleaje que se impacta directamente contra los elementos de protección produce un estado de fatiga que provoca la falla estructural del elemento, usualmente los eventos de mayor magnitud (extremales) son el parámetro más importante dentro de un proceso de diseño de rompeolas y escolleras, a continuación se listan las características del oleaje normal y del oleaje ciclónico.

4.2.2.1 Oleaje Normal.

Una ola es una perturbación, inducida por fuerzas generadoras (viento, atracción gravitatoria, corrientes, sismo, etc.), y las fuerzas restauradoras o de equilibrio (Coriolis, gravitatoria, etc.) dentro de un medio continuo.

El oleaje es una sucesión de olas u ondas de gran magnitud que se forman en la superficie del agua creadas por la acción del viento, este transfiere su energía al mar provocando un oleaje creciente en longitud y altura, hasta que alcanza una velocidad igual a la del viento donde ya no es posible transmitir más energía al agua.

La batimetría del mar constituye un factor importante en la incidencia de la propagación del oleaje, por lo regular se presenta este fenómeno en aguas intermedias o someras. Además es importante aclarar que el oleaje no se comporta como un tren de carácter sinusoidal con ondulaciones, longitudes, periodos y alturas constantes, sino que por el contrario, esta integrado por varios trenes con características específicas en cada uno de ellos,

sin embargo para facilitar el estudio del fenómeno se considera aislar e idealizar una onda senoidal como la que se muestra en la figura 4.1.

En la figura anterior se identifican parámetros que a continuación se listan:

Periodo de la ola (T)

Es el tiempo necesario para que dos crestas o valles consecutivos pasen por el mismo punto.

Altura de Ola (H)

Distancia vertical que se mide entre la cresta y el seno de la ola.

Longitud de la Ola (L)

Distancia horizontal que se mide entre dos crestas o dos valles consecutivos.

Celeridad de la Ola (C).

Es la velocidad con la que se desplaza la ola.

$$C = \frac{L}{T}$$

Relación de Esbeltez de la Ola (g)

Es el parámetro empleado para definir las características de la ola.

$$g = \frac{H}{L}$$

Frecuencia Angular (w)

Es el recíproco del periodo, representando el número de olas que pasan por un punto dado por una unidad de tiempo, por lo regular se expresa en segundos.

$$w = \frac{2p}{T}$$

Número de Onda (k)

$$k = \frac{2p}{L}$$

Amplitud de Onda (a)

$$a = \frac{H}{2}$$

Profundidad Relativa

$$\frac{d}{L}$$

4.2.2.1.1 Clasificación de las Olas.

Por el hecho de que existe una gran variedad de olas que se presentan en los cuerpos de agua se hace necesario establecer algunos criterios para clasificarlas, en la tabla 4.2, se muestran estos criterios tomando en cuenta que se clasifican en función de su periodo.

Tabla 4.2 Clasificación de las olas por su periodo *(Munk-Kinsman)*.

Periodo	Tipo	Fuerza Generadora	Fuerza Restauradora
Menor a 0.1 s	Capilares	Viento	Tensión Superficial
0.1 s a 1 s	Ultragravedad	Viento	Tensión Superficial y de Gravedad
1 s a 30 s	Gravedad	Viento	Gravedad
30 s a 5 min	Infragravedad	Viento	Gravedad
5 min a 12 h	Largo Período	Tormentas y Tsunamis	Fuerza de Coriolis
12 h a 24 h	Largo Período	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis
Mayor a 24 h	Muy Largo Período	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis

FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

Una vez tipificadas las olas en función de su periodo, se establecerá a continuación la jerarquización referente a su tipología.

4.2.2.1.1.1 Olas de Temporal (Oleaje de Viento o SEA)

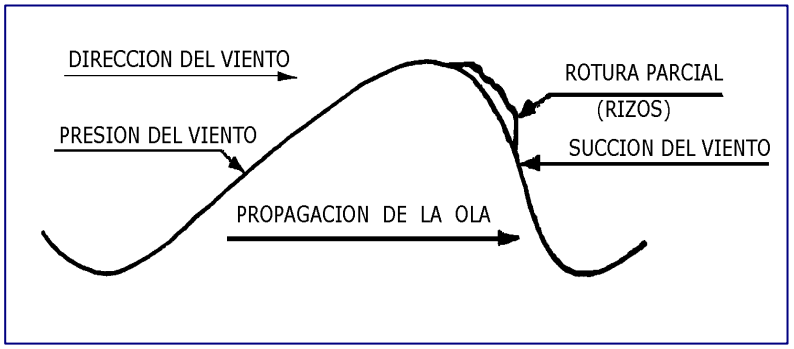
Siempre que un viento sople sobre la superficie libre del agua a lo largo de una línea o Fetch en una dirección constante en un intervalo de tiempo, este siempre generara un oleaje.

Siempre y cuando las olas se encuentren en un período de formación (en una zona de generación –Fetch-), se denominarán olas de temporal, oleaje local o SEA, además de que aún reciben energía del viento buscando alcanzar una relación de altura y longitud máxima para romper. Sin embargo, por la presencia de varios trenes de oleaje la condición de rompiente no es alcanzada generalmente.

Si se divide en celdas el área de generación, se tendrían ondas elementales con altura, periodo y direcciones diferentes, provocando que en a superficie libre del agua se presente un estado caótico.

Este tipo de oleaje (SEA), presenta periodos, amplitudes y longitudes de onda muy cortos, asociándoles una forma asimétrica con relación a su cresta, esto como consecuencia de la presión y fricción del viento sobre el lomo de la ola además de la succión que se genera sobre la cara frontal –ver figura 4.7-, este tipo de olas tiende a romper fácilmente en aguas someras.

Figura 4.7 Esquema de la Asimetría de las olas de Temporal.



FUENTE: "Ingeniería de Costas", Morral Carro, Rafael del.

4.2.2.1.1.2 Oleaje de Fondo o Swell

Las olas que han abandonado la zona de generación –Fetch-, reciben el nombre de *"Oleaje de Fondo o tipo Swell"*, estas ondas se propagan a través de áreas de extinción o de "*Decay"* en donde las olas se van atenuando suavemente generando espectros esbeltos, el comportamiento de estas olas se presenta en la figura 4.2.

Los trenes de oleaje se van dispersando de acuerdo a su dirección y frecuencia, ya que las ondas con periodos más largos viajan más rápido que las que tienen menor celeridad. Al acercarse estas ondas a la línea de costa los efectos del fondo comienzan a manifestarse mediante una componente que genera espectros de banda estrecha –ver figura 4.8-.

Figura 4.8 Vista aérea de los frentes de ola.

FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

Una vez tipificados los oleajes en función a su periodo y su tipología, es momento de conocer los fenómenos que intervienen para modificar el oleaje, estos fenómenos se listan a continuación:

4.2.2.2 Fenómenos que Modifican el Oleaje

Cuando el oleaje proveniente de aguas profundas se aproxima a la línea de costa su comportamiento se va modificando por efecto de la batimetría o en algunos casos por la presencia de estructuras. La importancia de los fenómenos es de consideración, ya que pueden provocar condiciones de inoperatividad en estructuras de protección, estos fenómenos se listan y explican a continuación:

a) Refracción.

Es definida como el cambio que experimenta en dirección de incidencia el tren de oleaje cuando se va acercando a la costa, el tren de oleaje tiende a hacerse paralelo a la batimetría variando continuamente su dirección y altura, provocando que la morfología de la playa se modifique –ver figura 4.9-. Los efectos que provoca la refracción sobre el tren de oleaje son la reducción de la celeridad seguida por la disminución de la longitud y un aumento en su altura.

Figura 4.9 La refracción en el oleaje puede producir una disminución en la longitud y aumento en la altura de ola.

FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

b) Reflexión.

Este fenómeno se presenta cuando un oleaje no rompiente incide sobre una estructura presentarse impacto, esto provoca que parte de la energía sea reflejada y la otra sea transmitida al interior de la estructura en caso de que esta sea permeable -ver figura 4.10-.

Entre más vertical y lisa sea la obra de protección más probables es que se presente la reflexión, además si las fases del oleaje entrante y reflejado coinciden pueden provocar fenómenos tales como *la resonancia o el de la onda estacionaria*.

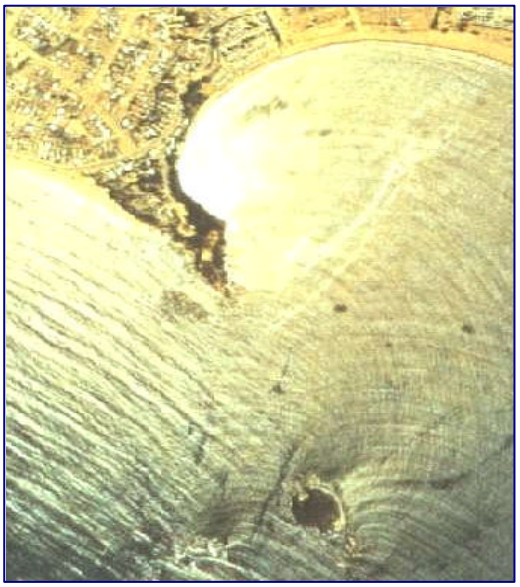
Figura 4.10 Vista del fenómeno de refracción del oleaje.

FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

c) Difracción.

Es la transferencia de energía de una zona a otra; esto sucede cuando el oleaje es interrumpido por un obstáculo que impide su paso a la zona posterior del mismo. A medida que el oleaje se ve modificado por el obstáculo, la altura de ola va disminuyendo generando las zonas de luz, penumbra y sombra -ver figura 4.11-.

Figura 4.11 Vista del fenómeno de difracción del oleaje sobre una bahía.



FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

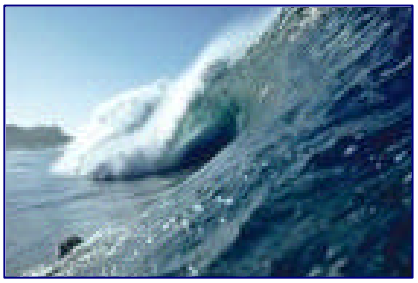
d) Rompiente.

Cuando observamos una playa lo primero que visualizamos es la manera en la que el oleaje se impacta sobre la arena, esto sucede porque al llegar la ola a zonas de agua someras la onda crece, se empina y disminuye su anchura, e impulsada por su misma velocidad pierde el equilibrio estrellándose sobre la playa.

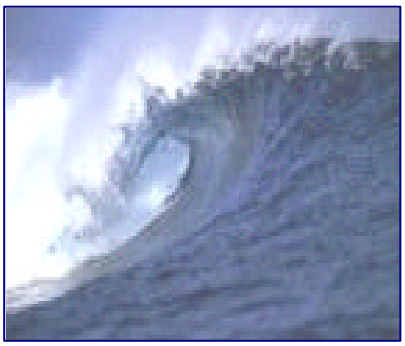
Si la pendiente del litoral es muy suave, las olas que provienen de distancias lejanas comienzan a rozar con el fondo marino, lo que provoca un retraso en su zona baja (a), mientras que la zona superior continua avanzando (b), lo que provoca la inestabilidad de la onda ocasionando que la onda adquiera mayor altura (c), y posteriormente su cresta caiga hacia delante y rompa sobre la línea de playa (d) -ver figura 4.12-.

Figura 4.12 Vista del momento en el que el oleaje comienza a romper sobre la costa.

a) Retrazo en su zona baja



b) Zona superior continua su avance



c) La ola se vuelve inestable

d) La ola rompe en la playa

FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

En cuanto una ola progresiva alcanza la profundidad de $H < 0.78d$ comienza a ser modificada por la presencia del fondo, lo que la convierte de onda de aguas profundas, a una onda de aguas someras, pero si el recorrido se vuelve inestable puede llegar a romper dependiendo de su relación de esbeltez y la cercanía del fondo con la superficie libre del agua.

Las olas que rompen sobre la costa se clasifican de la siguiente manera:

Spilling o Continua

Rompe suavemente y en su recorrido deja la superficie llena de espuma, sin que la línea de rompiente este bien definida.

Plungin o Rodante

La línea de rompiente se encuentra bien definida, con una gran disipación de energía al romper, lo que provoca mucha turbulencia.

Collapsing

Este tipo de rompiente se presenta cuando la cresta aun no rompe y la parte mas baja del frente de avance se empina y falla, provocando una superficie turbulenta e irregular.

Surging u Ondulante

Ocurre casi en la línea de playa, con una línea de rompiente bien definida.

Para poder cuantificar la magnitud del oleaje se efectúan diversas mediciones que van desde reportes proporcionados por embarcaciones hasta la instalación de instrumentos electrónicos (olométro y olimétros), los que proporcionan datos en tiempo real, además de cuantificar los parámetros que definen la ola, la dirección de propagación, los vientos, temperaturas, y presiones. La ubicación de estas estaciones forman parte de una malla con la que es posible cuantificar el oleaje de una manera confiable.

4.2.2.3 Teorías del Oleaje

Para el análisis y evaluación del oleaje existen diversas teorías, el uso de cada una de ellas depende de la precisión solicitada por el estudio. En la tabla 4.3 se listan las características de las teorías del oleaje más empleadas, sin embargo, no se puede sugerir emplear una teoría en particular, pues como ya se ha comentado, el uso de cada teoría esta limitado por la utilización y la aplicación en cada proyecto.

De las teorías que se muestran en la tabla 4.3, la *Teoría de Pequeña Amplitud* de Airy es la que comúnmente se emplea para los casos prácticos en la **Franja Marítimo-Costera** o en el caso de una primera aproximación. Las consideraciones que se deben seguir para desarrollar esta teoría se listan a continuación:

Tabla 4.3 Características de las Teorías del Oleaje más empleadas.

Nombre de la Teoría	Autor	Movimiento de las Partículas	Transporte de Masa
Lineal de onda larga	Airy	Oscilatoria	No
Lineal de pequeña amplitud	Airy	Oscilatoria	No
De pequeña amplitud	Stokes	Cuasi oscilatoria	Pequeño
Tricoidal	Gerstenr	Oscilatoria	No
Cnoidal	Korteweg y Devries	Cuasi oscilatoria	Pequeño
De la onda solitaria	Scott y Rusell	Translación	Si
De onda larga	Airy	Translación	Si

FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

i. El fluido es homogéneo e incompresible; lo que significa que su densidad es constante.

ii. Los efectos por tensión superficial son nulos; es decir, el número de onda es despreciable *(k=0)*.

iii. Los efectos causados por la Fuerza de Coriolis son despreciables *(F_c=0)*.

iv. La presión P_o de la superficie libre es uniforme y constante.

v. El fluido es considerado ideal, lo que significa que su viscosidad es nula *(u=0).*

vi. La onda en el análisis no se relaciona con ningún movimiento del agua.

vii. Se considera que el fondo es horizontal, fijo e impermeable.

viii. La amplitud de la onda es pequeña en relación con la profundidad y su forma invariable en el tiempo y el espacio.

ix. Las ondas son de cresta indefinida y planas *(X, Z)*.

De las hipótesis anteriores, las tres primeras se emplean en los proyectos de ingeniería, las tres siguientes pueden ser validas para condiciones particulares, sin embargo, las tres últimas invalidan la teoría para el caso de profundidades limitadas.

A continuación se presentan en la tabla 4.4 las fórmulas empleadas para estimar los valores de las variables que caracterizan una onda mediante onda utilizando la teoría lineal.

Tabla 4.4 Fórmulas empleadas en la teoría lineal de olas progresivas (*Pequeña Amplitud)*.

Profundidad Relativa	**Aguas Bajas** $\frac{d}{L_0}<\frac{1}{25}$	**Aguas Intermedias** $\frac{1}{25}<\frac{d}{L_0}<\frac{1}{2}$	**Aguas Profundas** $\frac{d}{L_0}>\frac{1}{2}$
Perfil de la Ola	La misma que ⇒	$y=\frac{H}{2}\cos 2p\left(\frac{x}{L}-\frac{t}{T}\right)=\frac{H}{2}\cos q$	⇐ La misma que
Celeridad de la Ola	$C=\frac{L}{T}=\sqrt{gd}$	$C=\frac{L}{T}=\frac{gT}{2p}\tanh\left[\frac{2pd}{L}\right]$	$C_0=\frac{gT}{2p}=1.56T$
Longitud de la Ola[3]	$L=CT=T\sqrt{gd}$	$L=\frac{gT^2}{2p}\tanh\left[\frac{2pd}{L}\right]$	$L=L_0=C_0T=\frac{gT^2}{2p}=$ $=1.56T^2$
Velocidad de Grupo[4]	$C_g=C=\sqrt{gd}$	$C_g=\frac{1}{2}\left[1+\frac{\frac{4pd}{L}}{senh\left(\frac{4pd}{L}\right)}\right]C=nC$	$C_g=\frac{1}{2}C_0=\frac{gT}{4p}$
Desplazamiento de las Partículas de Agua			
a) Horizontal	$x=-\frac{HT}{4p}\sqrt{\frac{g}{d}}senq$	$x=-\frac{H}{2}\frac{\cosh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{senh\left(\frac{2pd}{L}\right)}senq$	$x=-\frac{H}{2}e^{\left(\frac{2py}{L}\right)}senq$
b) Vertical	$d=\frac{H}{8}\left[1+\left(\frac{y}{d}\right)\right]\cos q$	$d=\frac{H}{8}\frac{senh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{senh\left(\frac{2pd}{L}\right)}\cos q$	$d=\frac{H}{2}e^{\left(\frac{2pd}{L}\right)}\cos q$
Energía de la Ola (Por Unidad de Área)	La misma que ⇒	$E=\frac{rgH^2}{8}$	⇐ La misma que
Velocidad de las partículas del agua			
a) Horizontal	$U=\frac{H}{2}\sqrt{\frac{g}{d}}senq$	$U=\frac{H}{2}\frac{gT}{L}\frac{\cosh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{\cosh\left(\frac{2pd}{L}\right)}\cos q$	$U=\frac{pH}{T}e^{\left(\frac{2py}{L}\right)}\cos q$
b) Vertical	$W=\frac{pH}{T}\left(1+\frac{y}{d}\right)senq$	$W=\frac{H}{2}\frac{gT}{L}\frac{senh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{\cosh\left(\frac{2pd}{L}\right)}senq$	$W=\frac{pH}{T}e^{\left(\frac{2py}{L}\right)}senq$

[3] $L=1.56T^2$ en el sistema métrico.

[4] Velocidad de Grupo.- Es la velocidad con la que se desplaza un grupo de olas o un tren de olas, la cual en general es diferente de la velocidad con que se desplaza una ola individualmente; siendo su magnitud normalmente inferior. La velocidad de grupo es importante, debido a que es con ella con la que desplaza la energía del oleaje. Sin embargo se presenta lo siguiente:

$$H_1 \neq H_2 \neq H_3 ..etc \qquad T_1 \neq T_2 \neq T_3 ..etc$$

Aceleración de las partículas del agua a) Horizontal	$a_x = \frac{pH}{T}\sqrt{\frac{g}{d}}\,sen q$	$a_x = \frac{gpH}{L}\frac{\cosh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{\cosh\left(\frac{2pd}{L}\right)}sen q$	$a_x = 2H\left(\frac{p}{T}\right)^2 * e^{\left(\frac{2py}{L}\right)} sen q$
b) Vertical	$a_y = -2H\left(\frac{p}{T}\right)^2 * \left(1+\frac{y}{d}\right)\cos q$	$a_y = \frac{gpH}{L}\frac{senh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{\cosh\left(\frac{2pd}{L}\right)}\cos q$	$a_y = -2H\left(\frac{p}{T}\right)^2 * e^{\left(\frac{2py}{L}\right)}\cos q$
Presión Subsuperficial	$P = \frac{Hrg}{2}\cos q - yrg$	$P = \frac{Hrg}{2}\frac{\cosh\left(2p\left(\frac{y+d}{L}\right)\right)}{\cosh\left(\frac{2pd}{L}\right)} * \cos q - yrg$	$P = \frac{Hrg}{2}e^{\left(\frac{2py}{L}\right)} * \cos q - yrg$
Potencia de la ola (por unidad de área)	$P = EC = EC = \frac{rgH^2L}{8T}$	$P = EnC = \frac{rgH^2L}{8T}n = \frac{rgH^2}{8}C_g$	$P = \frac{1}{2}EC_0 = \frac{rgH^2}{16}(1.56$

FUENTE: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual.

4.2.2.4 Descripción Estadística del Oleaje

Para la representación real del oleaje, este se idealiza mediante valores de una onda monocromática, mediante el procesamiento estadístico de registros, los cuales tienen valores de ola y periodo para un lapso de tiempo dado con una dirección específica, de esta manera se obtiene lo siguiente:

- Altura y periodo de la ola j, *(H_j, T_j)*
- Altura y periodos máximos en una muestra de n elementos. *($H_{máx}N$, $T_{máx}N$)*
- Altura y periodo significantes, los cuales son el promedio del tercio superior de los valores de un registro de oleaje. *($H_{1/3}$, $T_{1/3}$)*
- Altura y periodo n-enésimo, este valor representa el promedio n-enésimo de los valores altos del registro de oleaje. *($H_{1/n}$, $T_{1/n}$)*
- Altura y periodo medios. *($\overline{H}$, $\overline{T}$)*
- Altura de ola media cuadrática H_{rms}.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{N} H^2 f}{N}},$$

donde:

f , es la frecuencia.

Estudios posteriores realizados por Lounguet-Higgins determinaron que si se ordenaban los registros en alturas de mayor a menor, la distribución frecuencial de las alturas de ola se apega a una función de probabilidad de tipo Rayleight[5], con la función de densidad de probabilidad de las alturas *p(H)*, como se muestra a continuación:

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^{\ 2}} e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2}$$

Incluso, nos permite conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento con la altura de ola H_n, igual o mayor que H, como se indica en la siguiente ecuación:

$$p(H \geq H_n) = e^{-\left(\frac{H}{Hrms}\right)^2}$$

De esta manera se tienen las siguientes relaciones:

$$H_{1/3} = 1.416\ H_{rms}$$

$$H_{1/10} = 1.80\ H_{rms} = 1.27\ H_{1/3}$$

$$H_{1/100} = 2.36\ H_{rms} = 1.67\ H_{1/3}$$

$$H_{máx} = H_{rms}\ \sqrt{\ln(n)} = 1.86\ H_{1/3}$$

$$H_{1/n} = H_{rms}\ \sqrt{\ln\left(\frac{N}{n}\right)}$$

En el caso de los periodos de ola, para un mar completamente desarrollado, se acepta la distribución de probabilidad expresadas en las siguientes ecuaciones:

$$p(T)dT = 2.7\frac{T^3}{\overline{T}^4} e^{\left(-0.675\left[\frac{T}{\overline{T}}\right]^4 dT\right)}$$

$$T_{1/10} \approx T_{1/3}$$

$$T_{1/3} \approx 1.1\overline{T}$$

[5] Ver: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez Armando, pág. 95 y 96.

4.2.2.5 Registros Estadísticos de Oleaje

Es evidente que la medición directa del oleaje es un procedimiento el cual resulta un poco difícil de llevar a cabo por todos los procedimientos necesarios para la obtención de las alturas de ola y sus periodos, por esta razón, frecuentemente se hace uso de fuentes de información las cuales definen dichas alturas de ola y su correspondiente periodo. Estas fuentes se listan y describen a continuación:

4.2.2.5.1 CARTAS SEA AND SWELL

Estas cartas se editaron en Estados Unidos de Norteamérica, con información recopilada en el Océano Pacífico y las costas del Atlántico Norte, sus observaciones se realizaron desde embarcaciones en un periodo de 10 años. Esta publicación clasifica al oleaje como *SEA* o *SWELL*, como se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Rangos de altura local y distante.

Tipo de Oleaje	Rango (M)		
	Bajo	Medio	Alto
Local o sea	0.30 – 0.90	0.90 – 2.40	Mayor a 2.40
Distante o swell	0.30 – 1.82	1.82 – 3.65	Mayor a 3.65

FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

Es importante aclarar que la tabla anterior se considera al oleaje en calma para alturas menores a 0.30 m.

La información se muestra agrupando por áreas las observaciones mediante una rosa de oleaje donde se despliega gráficamente la frecuencia mensual recolectada dentro de ese periodo.

4.2.2.5.2 Ocean Wave Statisctics

Esta serie se editó en 1967 por Gran Bretaña con datos estadísticos de oleaje, la información proporciona: la dirección, periodo y altura de ola, para diferentes zonas, estas observaciones fueron realizadas por embarcaciones voluntarias.

El formato que utilizaban estas embarcaciones para llevar su registro contenía lo siguiente:

- Régimen: anual y estacional
- Dirección: azimut con variaciones a cada 10° y datos agrupados en sectores para 30°
- Alturas y periodos.

4.2.2.5.3 Wave Information Study (WIS)

Este sistema lo implementó el cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de Norteamérica, para tener registros del Golfo de México. Esta base de datos esta integrada por información de registros de por lo menos 20 años (observaciones desde 1956). Los datos que proporcionan estos registros son: alturas, periodos, direcciones, frecuencias y periodos de retorno del oleaje.

4.2.2.6 Predicción del Oleaje o Forecasting

Este procedimiento es empleado para conocer las características del oleaje a partir de perturbaciones meteorológicas, lo que lo hace un método fundamentado en datos estimados.

4.2.2.6.1 Método de Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB)

Este método consiste en la predicción del oleaje a partir de los campos de viento bajo las condiciones de oleaje totalmente desarrollado *(SWELL)* o parcialmente desarrollado *(SEA)*, éste último limitado por *Fetch* o por duración.

A continuación se describe la metodología para determinar las características del oleaje a la salida del campo en análisis:

- Identificar la fecha y hora de la carta sinóptica de tiempo.
- Establecer la distancia media entre isobaras, en grados de latitud.
- Conocer la latitud en grados del centro de la perturbación.
- Calcular la velocidad del viento geostrófico y del viento generador.
- Medir directamente en la carta sinóptica la longitud del *Fetch, en millas náuticas.*
- Evaluar la distancia de decaimiento en millas náuticas.
- Establecer la duración (tiempo en el cual el viento actúa con una magnitud y dirección específica) expresada en horas. Comparar la duración leída *($d_{mín}$)* con la real d, y:
  - *Si $d_{mín}$<d, sé continua con la lectura de T_F y H_F.*
  - *Si $d_{mín}$>d, con el valor de d se leen en la gráfica los valores posibles de Fetch, T_F y H_F bajo esa duración de viento.*
- T_F y H_F, periodo en segundos y altura de la ola en pies a la salida del *Fetch*.
- Calcular T_D y H_D, periodo en segundos y altura de la ola en pies del oleaje después de pasar por la zona de decaimiento.

4.2.2.7 Oleaje Ciclónico o Extremal.

La existencia de fenómenos meteorológicos sumamente destructivos que se presentan mar adentro generan oleajes llamados extremales que en muchos de los casos al impactarse sobre la playa y los elementos de protección transmiten su energía provocando destrucción a su paso, ya que este oleaje excede por mucho las condiciones de un oleaje normal –ver figura 4.13-.

Aunque no se conoce a ciencia cierta la altura de ola máxima que se puede alcanzar, se han propuesto modelos matemáticos para estimar la altura de ola significante en aguas profundas y el periodo en el punto de máxima velocidad del viento en eventos extremales. Así, de esta manera, para un huracán que se mueve con una velocidad aproximada de 30 km/h, se puede aplicar el *método del Huracán Estándar*, las ecuaciones básicas de este método se presentan a continuación:

$$H_c = 5.033\left[\frac{1+0.15av_c}{\sqrt{U_R}}\right]e^{\frac{R\Delta P}{6270}}$$

$$T_c = 8.6\left[\frac{1+0.076av_c}{U_R}\right]e^{\frac{R\Delta P}{6270}}$$

$$U_R = 0.865U_{máx} + 0.5v_c$$

donde:

H_c, T_c, representan la altura (m) y el periodo (s) ciclónico, a una distancia R del centro del Huracán.

α, coeficiente que toma en cuenta la variación de la velocidad.

V_c, velocidad de desplazamiento del huracán (km/h).

U_R, velocidad de viento a 10 m sobre el nivel del mar (km/h).

$U_{máx}$, velocidad máxima del viento.

$$U_{máx} = 20.19\sqrt{\Delta P - Rwsenq}$$

R, radio donde se presentan los vientos de mayor intensidad (km).

$$R = 28.52\tanh\left[0.0873q - 28\right] + 12.22e^{-\frac{\Delta P}{33.86}} + 0.2v_c + 37.22$$

ΔP, diferencia de presiones (mb), Pn-P0.

Pn, presión atmosférica normal, Pn = 1013 mb

P0, presión en el ojo del Huracán (mb).

θ, latitud del ojo del Huracán (°).

ω, velocidad angular de la tierra.

$$w = \frac{p}{12} \text{ (rad/h)}$$

Figura 4.13 Vista del momento en el que un oleaje extremal se impacta sobre una estructura de protección.

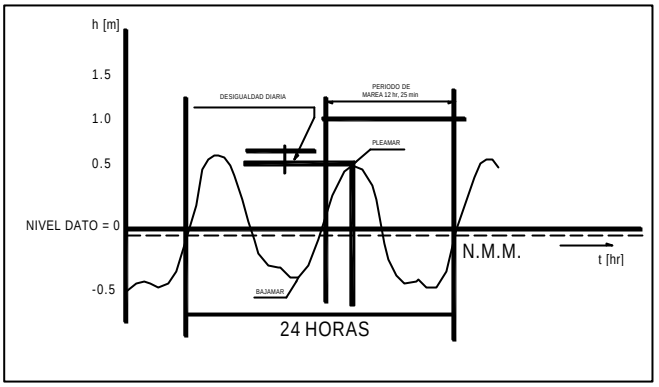
FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

4.2.3 Marea Astronómica

Primero es importante definir que es una marea, es la oscilación periódica del nivel del mar en un periodo largo, a continuación se muestran los elementos que caracterizan un ciclo de mareas –ver figura 4.14-.

Las mareas astronómicas son el ascenso y descenso periódico de los océanos, golfos y bahías, como resultado de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol sobre nuestro Planeta, en consecuencia este fenómeno está relacionado con las posiciones relativas entre los astros. En algunos lugares de la Tierra existen dos mareas por día, aunque en algunos sitios solo se presenta una cada 24 horas.

Figura 4.14 Diagrama de una onda de marea.



FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

La clasificación que se le da a las mareas se lista a continuación:

4.2.4 Mareas Lunares

La cercanía de la Luna con nuestro Planeta, es la principal causa de las mareas, esto sucede cuando la Luna se encuentra justo encima de un punto dado de la superficie terrestre, la cual ejerce una fuerza de atracción sobre la Tierra y el agua de los océanos, consiguiendo que el agua se eleve sobre su nivel normal. También el agua que cubre la porción de tierra más alejada de la Luna es sometida a está atracción, esto produce otra elevación que proporciona el fundamento de una segunda onda. La cresta de onda situada bajo la luna se llama marea directa, y la del lado diametralmente opuesto de la tierra recibe el nombre de marea opuesta.

4.2.5 Marea Solar

También el Sol provoca mareas, sin embargo por encontrarse más alejado de la Tierra que la Luna, su fuerza de atracción se reduce un 46% aproximadamente en comparación con la fuerza ejercida por la Luna.

Además existe una clasificación fundamentada en el número de pleamares y bajamares que se presentan en un día, a continuación se lista esta clasificación:

Diurnas

Son ondas que presentan una pleamar y una bajamar por ciclo, en un periodo de 24.50 horas.

Semidiurnas

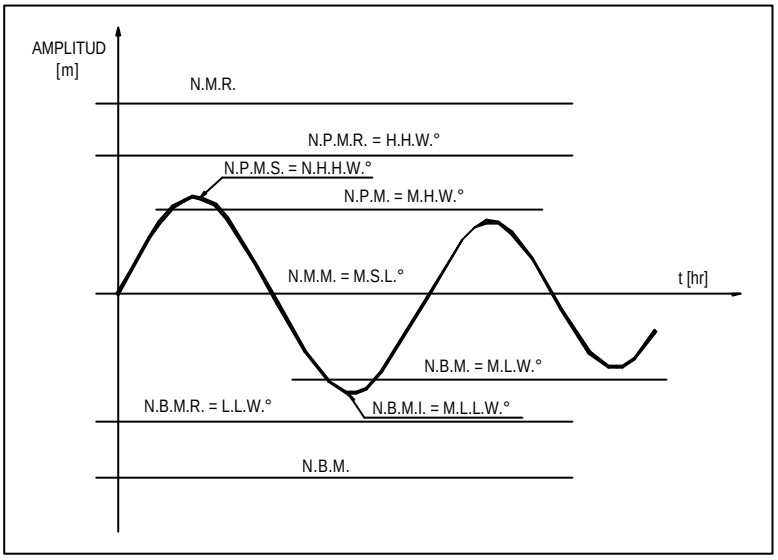
Este tipo de mareas presentan dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos consecutivos, con periodos de 12.25 horas cada uno y amplitudes similares.

Mixta

Este tipo de mareas exhiben dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos sucesivos con periodos de 12.25 horas. Cada periodo presenta amplitudes de onda diferentes, generando de ésta manera la desigualdad diaria definida como diferencia de altura entre los niveles de dos pleamares o bajamares continuos.

Una vez definido el tipo de marea se forman diversos planos –ver figura 4.15-, los cuales son valores medios obtenidos a partir del análisis de muchos registros de medición, a continuación se listan estos planos:

Figura 4.15 Diagrama de los Planos de Marea.



FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

Altura Máxima Registrada.

Corresponde al nivel más alto registrado en una estación, la cual esta asociada a eventos extremales.

Pleamar Máxima Registrada (NPMR o HHW).

Esta altura es debida a los efectos de marea periódica.

Nivel de Pleamar Media Superior (NPMS o NHHW)

Es el promedio de las dos pleamares superiores más altas registradas diariamente, durante un periodo considerado.

Nivel de Pleamar Media (NPM o MHW)

Promedio de todas las pleamares para un periodo considerado en la estación, para una marea diurna.

Nivel Medio del Mar (NMM o MSL)

Es el promedio de bajamares y pleamares para el periodo de registro.

Nivel de Media Marea (MM o MTL)

Es el plano equidistante entre la pleamar media y la bajamar media.

Nivel de Bajamar Media (NBM o MLW)

Es el promedio de todas las bajamares para un lapso de estudio en una estación, para el caso de una marea diurna ésta es igual al Nivel de Bajamar Media Inferior (NBMI).

Nivel de Bajamar Media Inferior (NBMI o MLLW)

Es el promedio de la más baja de las dos bajamares diarias registradas para un periodo dado.

Bajamar Mínima registrada (NBMR o LLW)

Es el nivel más bajo registrado debido a las fuerzas de marea periódica.

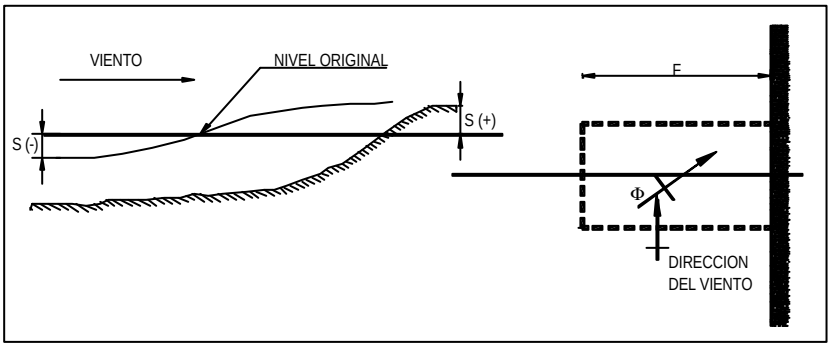
Altura Mínima Registrada

Es el nivel más bajo registrado, el cual esta vinculado a eventos extremos.

4.2.6 Marea de Tormenta

La marea de tormenta es un fenómeno que se presenta cuando los huracanes o ciclones con vientos muy fuertes provocan una corriente superficial obligando al agua a apilarse sobre la costa logrando que su nivel aumente, como se observa en la figura 4.16.

Figura 4.16 Diagrama de la Marea de Tormenta.



FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

A continuación se listan los dos tipos de mareas de tormenta:

Positivas

Son positivas cuando el viento sopla sobre la costa, provocando que el nivel del mar se incremente.

Negativas

Este tipo de mareas se presenta cuando hay una disminución en el nivel del mar, esto ocurre porque el viento sopla en dirección opuesta a la costa.

Si no se consideran las mareas de tormenta para el diseño de una obra de protección, o se obtiene una mala evaluación de su magnitud, pueden ocurrir daños severos sobre las estructuras, además de perder gran cantidad de material granular de la playa (erosión).

4.2.7 Corrientes Marinas Superficiales

Las corrientes marinas son movimientos, generalmente no periódicos, ya que las masas de agua se dan en distintas capas y a diferentes profundidades, son generadas por múltiples causas como pueden ser:

- La acción del viento sobre la superficie de agua.
- Las diferentes densidades sobre la masa líquida.
- La sobreelvación del nivel medio debido a mareas.
- La batimetría de la costa.

Los parámetros para definir a una corriente son la velocidad y la dirección. La dirección de una corriente se indica con el rumbo hacia donde se dirige; es decir, es diferente a la que se emplea en los vientos, ya que para estos se considera de donde soplan. La velocidad con la que expresamos las corrientes es en nudos (1 nudo = 1 milla náutica por hora = 1.853 km/h).

Por el proceso de generación se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Corrientes oceánicas.
- Corrientes inducidas por el viento.
- Corrientes producidas por el oleaje.
- Corrientes por mareas.

Las corrientes que son producidas por el oleaje, son el principal generador del movimiento del sedimento sobre la línea de costa y en función de su dirección de movimiento se clasifican de la siguiente manera:

4.2.7.1 Corrientes Perpendiculares a la Costa

Son originadas por la necesidad de evacuación de volúmenes de agua sobrante, que ha sido empujada y acumulada contra la playa por la acción del oleaje y del viento. Esto se observa por la sobreelevación del nivel del mar en la zona de rompiente.

4.2.7.2 Corrientes Paralelas a la Costa

A este tipo de corrientes se les atribuye el transporte litoral a lo largo de la playa, esto gracias a que al momento de romper las olas provocan que los sedimentos se encuentren en suspensión provocando su transporte a lo largo de la línea de costa.

No debemos olvidar que el transporte litoral es el de mayor trascendencia al diseñar estructuras costeras. En la tabla 4.6 se muestran ecuaciones para cuantificar la magnitud de las corrientes.

Tabla 4.6 Fórmulas para evaluar la magnitud de las corrientes paralelas a la costa

Autor	Expresión
Longuet-Higgins (modificada)	$V = 20.7m\left(\frac{g}{H_b}\right)^{\frac{1}{2}} sen(2ab)$
Inman-Quinn	$V = \left[\left(\frac{1}{4x^2} + y\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2x}\right]^2$
Galvin	$V = gT\tan(b)sen(2ab)$

FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

donde

$$x = \frac{(108.3H_b \tan(b)\cos(2ab))}{T}$$

$$y = Cbsen(ab)$$

$$Cb = \sqrt{2.28gH_b}$$

V, velocidad de la corriente longitudinal, en ft/s.

m, pendiente de la playa en la zona de rompiente.

g, aceleración de la gravedad, en ft/s2.

Hb, altura de la ola rompiente, en ft.

αb, ángulo de incidencia del oleaje en la zona de rompiente, en grados.

β, ángulo de la pendiente de la playa, en grados.

T, periodo del oleaje, en segundos.

Para la medición de las corrientes se hace uso de diversos aparatos y dispositivos, de entre los cuales destacan los corrientrómetros, que pueden ser mecánicos o eléctricos. Estos dispositivos se introducen al agua desde una lancha y registran la velocidad con base en una propela calibrada y un contador de revoluciones. Actualmente se emplean dispositivos instalados en el mar, los cuales proporcionan información en tiempo real.

4.2.8 Determinación de las Bases de Diseño

Una vez que se conocen los parámetros meteorológicos que actúan sobre las estructuras de protección, ahora se abordarán los criterios necesarios para el diseño de estas obras.

4.2.8.1 Altura y Periodo de la Ola de Diseño

El oleaje de diseño generalmente se define mediante estudios que involucran el análisis de eventos extremales, ajustados a una distribución de probabilidad y asociados a un periodo de retorno, como por ejemplo la distribución de probabilidad de *Gumbel*[6]. Sin embargo en muchos casos se hace mediante el ensayo de un modelo reducido con un oleaje irregular.

Para elegir una ola de diseño, es necesario conocer las características de la estructura, su posición ente el oleaje rompiente, para cumplir con esta elección se requiere de lo siguiente:

- Rotura de la ola antes de llegar a la estructura.
- La estructura debe estar situada en la zona de rompiente.
- Provocar que la ola rompa por medio de la estructura, en este sentido no se controla la altura del oleaje.

En general la altura de ola de diseño se especifica en función del tipo de estructura que se construirá, de esta manera se listan los valores que corresponden a cada estructura.

- Para estructuras rígidas, en donde la altura de ola de magnitud grande puede provocar la falla del elemento generalmente se establece como $H_{1/100}$, la cual corresponde a la altura promedio del 1% de las olas más altas del registro.
- En el caso de estructuras semirígidas, la altura de ola de diseño está ubicada dentro del rango de $H_{1/10}$ a $H_{1/100}$.
- Para estructuras de enrocamiento o flexibles, la altura de diseño puede ser H_s o $H_{1/3}$.

[6] Ver "Manual de Diseño de Obras Civiles, Avenida de Diseño A1.10", Instituto de Investigaciones Eléctricas, C.F.E.

Lamido de la ola (Run-up)

El run-up, es definido como la elevación máxima del levantamiento de las olas sobre el nivel muerto del mar –ver figura 4.17-, este fenómeno es inducido por la presencia de estructuras marítimas y/o la profundidad, por esta razón en aguas profundas no influye su comportamiento. De esta manera, este parámetro define la elevación de la corona de una estructura. Si por algún motivo no se estima de manera adecuada, su magnitud puede ocasionar problemas en la estabilidad sobre la estructura.

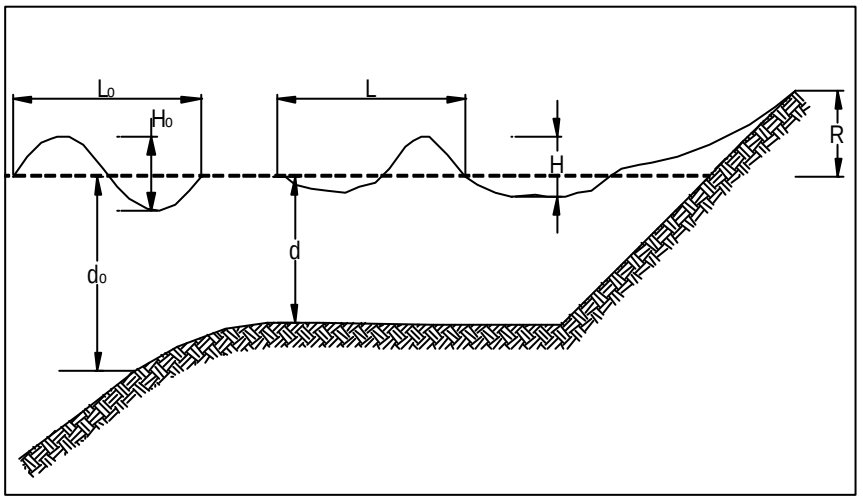
A continuación se listan en la tabla 4.7, algunos criterios para definir el *Run-Up*:

Tabla 4.7 Criterios para evaluar el *Run-Up*.

Autor	Fórmula	Aplicaciones y Observaciones
Ahrens	$\frac{Ru}{H}=\frac{a}{1+(bx)}$	a, b son función de la porosidad del talud
Gonbak	$Ru = Ru\left(1.397-0.132\frac{d}{H}\right)$	Para 0.9<d/H<3.0, donde Ru es el valor del run-up calculado para condiciones de aguas profundas
Gonbak	$Ru = Ru\left(0.864\frac{d}{H}+0.5\right)$	Para 0.0<d/H<0.9 y Ru es el valor del run-up pero para aguas profundas
Hunt	$Ru = xH$	Para taludes lisos y valores de $0.5\leq\xi\leq2$

FUENTE: "Ingeniería de Costas", Frías Valdez, Armando.

Figura 4.17 Diagrama de la formación de una Ola Run-Up.



FUENTE: "Coastal Engineering Vol. 4 ", Silvester, R.

De acuerdo a los estudios realizados, se ha observado que el *Run-Up* y el *Run-Down*[7] se incrementan cuando crece el valor del número de *Ibarren* y *Nogales* ξ y con mayor rapidez si se trata de una ola rompiente es del tipo *Plunging*.

$$x = \frac{\tan(a)}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

donde

H, altura de ola de lado expuesto al mar.

L0, Longitud de ola para aguas profundas.

α, ángulo formado por el talud y la horizontal.

4.2.8.2 Rebase de la Ola (Overtopping)

En algunas ocasiones el *Run-Up* excede la altura de las estructuras marítimas en la parte de la corona, a este fenómeno se le llama Rebase de la Ola o Overtopping[8]. Este rebase es capaz de generar serios daños a la estructura, ocasionándole socavaciones, movimiento de los elementos de la coraza en el lado expuesto, pérdida de la estabilidad por asentamiento de los elementos, etc. –ver figura 4.18-.

Figura 4.18 Figura que muestra el rebase de una ola sobre una estructura (Ola Overtopping).

FUENTE: http: //dante.esmartdesign.com/thumbs/images/

[7] *Run-Down*. Significa bajada de la ola.
[8] Su nombre en inglés

4.3 Elementos de Protección Costera.

Una vez conocidos los parámetros físicos y de diseño de las obras de protección marítima, es conveniente conocer cada una de estas estructuras, así como sus características y métodos para diseñar cada una de ellas.

Las obras de protección marítima se pueden categorizar atendiendo a múltiples parámetros como son:

a) Comportamiento Estructural.

   i) Rígidas.

   ii) Flexibles.

b) Estructuración de la Sección Transversal.

   i) Homogéneas.

   ii) Heterogéneas.

c) Posición ante las Fuerzas de Oleaje.

   i) Amortiguan el Oleaje.

      - Neumáticos e Hidráulicos.
      - Flotantes.
      - Coronamiento Sumergido.

   ii) Impiden el Paso al Oleaje.

      - A Talud.
      - Verticales.
      - Mixtos.

d) Cantidad de Agua que Fluye por la Estructura.

   i) Permeables.

   ii) Impermeables.

e) Configuración en Planta.

   i) Paralelas Entre Sí.

   ii) Convergentes.

iii) Paralelas a la Costa.

El tipo de estructura de protección depende de las condiciones de oleaje, la longitud necesaria para que las arenas no penetren al interior de un puerto y para la rehabilitación de las zonas donde se presente erosión, cada una de estas estructuras tiene una función en particular; por esta razón, a continuación se listarán de manera general algunas de ellas; así como, los criterios de diseño y el uso que se les da.

4.3.1 Rompeolas y Escolleras

Ambas obras se diseñan en forma similar aunque su tamaño y propósito sea diferente. Éstas obras se construyen con rocas de gran tamaño o elementos artificiales de concreto. Están formados por un cuerpo –tronco- y por un morro, el cuerpo se inicia desde la playa o costa hasta un poco antes del final de la estructura; el morro lo constituye la zona final siendo esta parte, la más expuesta al oleaje. En el morro se colocan los elementos más pesados y sus secciones transversales deben ser simétricas a diferencia del cuerpo; es decir, se colocan los mismos elementos en el lado expuesto y en el lado protegido.

Los rompeolas son estructuras que se construyen en el mar para reflejar y disipar la energía del oleaje proveniente de aguas profundas, su principal objetivo es el de proteger o formar recintos portuarios, ya que en algunos casos su corona se emplea como muelle.

Las escolleras, por otro lado, se utilizan para evitar que se azolve del canal de navegación en la desembocadura de un río o evitar la entrada de material a la obra de toma de una planta termoeléctrica o nucleoeléctrica.

A continuación se listan las capas que forma la sección transversal de estas obras de protección:

Corza (capa primaria). Es la parte exterior de la estructura y esta formada por una o dos capas de elementos, los cuales deben resistir la acción directa del oleaje.

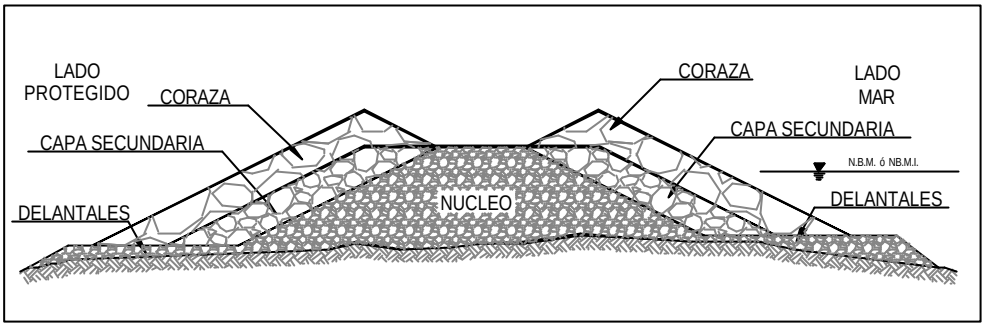
Capa Secundaria. Sirve para soportar los elementos de coraza y además sirve como filtro para evitar que salgan los elementos de la capa en que se apoya. Puede formarse un rompeolas con una o más capas secundarias, cada una de las cuales se debe formar con dos capas de elementos.

Núcleo. Este sirve como soporte y relleno a del rompeolas y es del tipo masivo.

Delantales. Su objetivo principal es el de proteger a la estructura contra la socavación al pie de la misma, el espesor recomendado es mayor a 0.50 metros y su longitud debe ser mayor a 5.00 metros en el lado expuesto al oleaje incidente, sin embargo para el lado protegido su espesor es el mismo y en donde hay variantes es en su longitud ya que se recomienda construirlas en un rango de 1.50 a 2.00 metros. La mayoría de las ocasiones se construyen con elementos iguales a los del núcleo. Es importante no omitir su construcción ya que de no hacerlo se corre el riesgo de que la estructura no sea estable.

Filtro y apoyo. Se emplea al momento de la construcción para evitar el hundimiento de las piedras debido a la acción del oleaje y las corrientes, además de evitar que la arena del fondo sea succionada y extraída de entre los espacios que existen entre los elementos de las capas superiores, cuando se presentan eventos extremales en la zona.

Figura 4.19 Sección Transversal de una Escollera o un Rompeolas.



Para el diseño de un rompeolas o de una escollera, es necesario obtener la geometría de las diversas secciones transversales a lo largo de le estructura y el peso de los elementos que forman cada una de las capas.

Se listan a continuación los factores que se deben considerar para el diseño y los datos necesarios.

a) Características del oleaje de diseño, asociado a un periodo de retorno, por lo regular el periodo de retorno que se emplea para el diseño de estas estructuras equivale a 50 años.

b) Características del oleaje cerca de la estructura influenciado por la batimetría (refracción).

c) Cerciorarse si en la zona en que se colocará la estructura se encuentra frente a la zona de rompiente o no.

d) Conocer la distancia a la que se encuentran los bancos de roca, el peso específico y el tamaño de los mayores bloques que se pueden extraer.

e) En caso de utilizar elementos prefabricados, se debe conocer el peso específico del concreto y su forma.

f) Conocer el peso específico del agua en que estará sumergida la estructura.

g) Seleccionar el ángulo de inclinación del talud.

Las anteriores recomendaciones están basadas en observaciones y mediciones efectuadas en laboratorio y campo. A continuación se explican los parámetros para obtener el diseño de un rompeolas o una escollera:

4.3.1.1 Peso de los Elementos de la Coraza

Las expresiones empleadas para el diseño del peso de los elementos de la coraza, son empíricas y se obtuvieron mediante la calibración de ensayos en modelos dentro de laboratorios. La ecuación que se presenta a continuación está en función de la altura de la ola de diseño y fue propuesta por Hudson basándose en la fórmula de Iribarren.

$$W = \frac{g_s H^3}{K_D (S_s - 1)^3 \cot q}$$

donde:

W, peso del elemento en la coraza, en kg.

γs, peso específico del elemento que va a formar la coraza, en kg/m3.

Ss, densidad de sólidos, es igual a γs/γ, donde γ es el peso específico del agua.

H, altura de la ola de diseño frente a una sección o tramo de rompeolas o escollera.

θ, ángulo del talud de la estructura con respecto a la horizontal, en grados.

KD, coeficiente de estabilidad, -ver tabla 4.8 –

Tabla 4.8 Valores recomendados de KD para determinar el peso de las unidades de coraza (criterio sin daño y mínima roción, según CERC).

Tipo de elementosen la coraza	n (1)	Colocación	Cuerpo (tronco) de la escollera KD (4)		Morro de la escollera KD		Talud
			Ola rompiente	Ola no rompiente	Ola rompiente	Ola no rompiente	cot q
Roca de cantera							
Lisa y redondeada	2	Azar	2.1	2.4	1.7	1.9	1.5 a 3.0
Lisa y redondeada	>3	Azar	2.8	3.2	2.1	2.3	(5)
Rugosa y angulosa	1	Azar (2)	(2)	2.9	(2)	2.3	(5)
Rugosa y angulosa	2	Azar	3.5	4.0	2.9 2.5 2.0	3.2 2.8 2.3	1.5 2.0 3.0
Roca y angulosa	>3	Azar	3.9	4.5	3.7	4.2	(5)
	2	Especial (3)	4.8	5.5	3.5	4.5	(5)
Tetrápodo y Cuadrípodo	2	Azar	7.2	8.3	5.9 5.5 3.7	6.6 6.1 4.1	1.5 2.0 3.0
Tribar	2	Azar	9.0	10.4	8.3 7.8 7.0	9.0 8.5 7.7	1.5 2.0 3.0
Dolos	2	Azar	22.0 (6)	25.0 (6)	15.0 13.5	16.5 15.0	2.0 (7) 3.0
Cubo modificado	2	Azar	6.8	7.8	--	5.0	(5)
Hexápodo	2	Azar	8.2	9.5	5.0	7.0	(5)
Tribar	1	Uniforme	12.0	15.0	7.5	9.5	(5)

(1) Número de elementos de la capa de coraza
(2) El uso de una capa de coraza formada con un solo elemento de roca sujeta a olas rompientes no es recomendada y sólo bajo condiciones especiales para olas no rompientes. Cuando se empleen las rocas se deben colocar cuidadosamente.
(3) Colocación especial con el eje longitudinal de la roca puesto en dirección perpendicular al paramento de la escollera.
(4) Aplicable en taludes comprendidos entre 1:1.5 y 5:1.
(5) Hasta no tener más información disponible acerca de la variación de KD con respecto al talud, el uso de KD deberá limitarse a taludes comprendidos entre 1.5:1 y 3:1. esto se debe a que los resultados de algunas pruebas indican dependencia del valor de KD con el talud.
(6) Datos disponibles únicamente para taludes 2:1.
(7) *Pendientes mayores de 2:1 no son recomendables en la actualidad.*

FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

La estructuración de la coraza se puede hacer a partir de elementos prefabricados o por roca, es importante señalar que cuando se emplean elementos prefabricados en la coraza, las capas subyacentes se dimensionarán considerando el peso de los elementos de la coraza como si fueran roca. Lo anterior se debe a que los elementos prefabricados generalmente reducen el peso y espesor de la capa ya que su estabilidad se basa en la trabazón que desarrollan.

4.3.1.2 Peso de los Elementos de la Capa Secundaria y del Núcleo

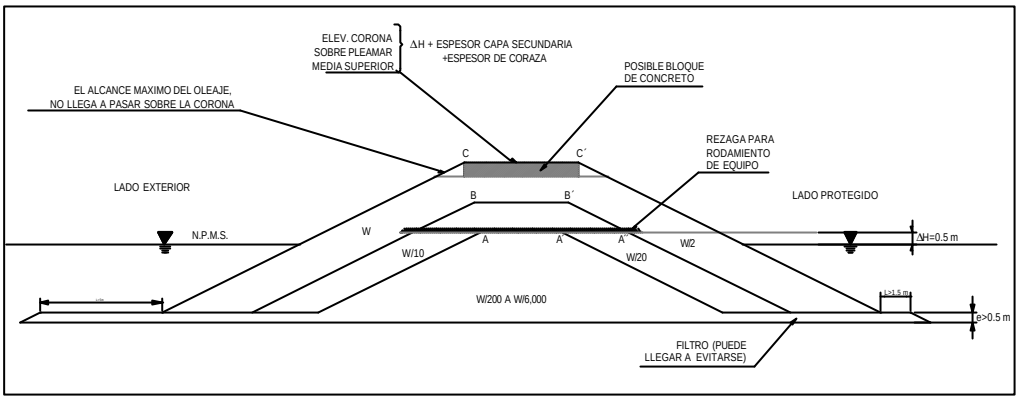
Para la obtención de los pesos de los elementos que integran la capa secundaria y el núcleo, se recomienda utilizar las figuras 4.20 y 4.21. La primera en caso de que el oleaje rompa sobre la estructura; y la segunda, para la condición de no rompiente. Utilizando estas recomendaciones se garantiza la estabilidad de la estructura.

4.3.1.3 Distribución de Tamaños a lo Largo de la Escollera o Rompeolas

La profundidad del mar a lo largo de la obra de protección será variable, lo que influye directamente sobre la ola de diseño para cada sección; sin embargo, el tener elementos de diferente tamaño y peso de una sección a otra no es práctico desde el punto de vista constructivo, razón por la cual se recomienda dividir de 2 a 4 zonas el cuerpo de las obras de protección, las cuales tendrán una ola de diseño considerando la condición de rompiente en cada una de ellas, a excepción de la zona donde se encuentra el morro, ya que el oleaje en este punto puede romper o no.

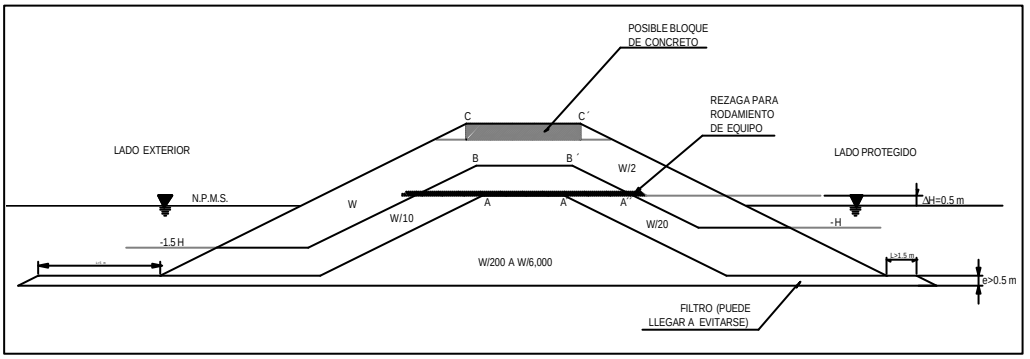
Tomando en cuenta que se dividió el cuerpo de la escollera o rompeolas en varias zonas, y en consecuencia los tamaños y pesos de la roca serán diferentes, a continuación se presenta la tabla 4.9, que indica los diferentes rangos de valores de peso para cada capa.

Figura 4.20 Sección Transversal de una Escollera para oleaje rompiente.



FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Figura 4.21 Sección Transversal de una Escollera para oleaje no rompiente.



FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Tabla 4.9 Graduación de tamaños, según el CERC.

Capa o Zona	Peso Teórico	Pesos reales comprendidos entre
Coraza	W	(1.25 y 0.75)W
	W/2	(1.25 y 0.75)W/2
Secundaria	W/10	(1.30 y 0.70)W/10
	W/20	(1.30 y 0.70)W/20
Núcleo	W/200 y W/4,000	W/200 y W/4,000
	W/200 y W/6,000	W/200 y W/6,000

FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

4.3.1.4 Diseño de la Sección Transversal

Para dimensionar la sección transversal se deben considerar los siguientes factores:

Ancho de la Corona

El ancho mínimo constructivo de la corona, tanto para la coraza como para la capa secundaria, se determina por medio de la siguiente expresión:

$$B = nK_{\Delta}\left(\frac{W}{g_s}\right)^{\frac{1}{3}}$$

donde:

n, número de elementos; el máximo recomendado es de 3.

K_{Δ}, coeficiente de capa; se obtiene de la tabla 4.10.

W, peso de un elemento en la corona, en kg

γ_s, peso específico del elemento, en kg/m^3.

El ancho de la corona queda definido por la ecuación anterior; mientras la capa secundaria esta en función de la geometría. Sin embargo, generalmente el ancho queda determinado por las características constructivas de la sección, por lo que se recomienda que sea lo suficientemente grande para permitir el paso de los equipos de construcción.

Tabla 4.10 Coeficientes de capa y porosidades de varios tipos de elementos de coraza.

Elemento de coraza	n	Colocación	Coeficiente de capa K_D	Porosidad (P), en porcentaje
Roca de cantera (lisa)	2	Volteo	1.02	38
Roca de cantera (rugosa)	2	Volteo	1.15	37
Roca de cantera (rugosa)	>3	Volteo	1.10	40
Cubo modificado	2	Volteo	1.10	47
Tetrápodo	2	Volteo	1.04	50
Quadrípodo	2	Volteo	0.95	49
Hexápodo	2	Volteo	1.15	47
Tribar	2	Volteo	1.02	54
Dolos	2	Volteo	1.00	63
Tribar	1	Uniforme	1.13	47

FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

4.3.1.5 Elevación de la Corona

En estructuras de protección el nivel de la corona es un factor importante, el cual generalmente depende de la función de la obra, ya que en el caso de rompeolas sumergidos, estos pueden quedar incluso por debajo de la superficie del agua.

Por otro lado, si la función es la de evitar el paso de sedimento en la desembocadura de un río, el nivel de corona de 1 metro puede ser mas que suficiente, ya que el transporte litoral se presenta muy cerca de la línea de playa y del fondo además de que la altura del oleaje normal es muy pequeña.

Si el objetivo de una obra de protección es reducir la altura de ola en el lado protegido y crear las condiciones adecuadas para permitir las maniobras dentro de un puerto, la corona debe ser suficientemente alta para reducir la magnitud del oleaje que se propaga desde aguas profundas.

De esta manera la altura de la corona estará en función de la altura de ola, la batimetría de la zona y los niveles de marea y del Run-Up.

4.3.1.6 Espesor de la Coraza, de la Capa Secundaria y del Número de Elementos de la Coraza

El espesor ya sea de la coraza o de la capa secundaria se determina mediante una expresión semejante a la empleada en la obtención del ancho de corona, sin embargo ahora *n* será el número de capas que forman al espesor y que por lo general es igual a 2.

$$e = nK_{\Delta}\left(\frac{W}{g_s}\right)^{\frac{1}{3}}$$

donde:

n, número de capas.

K_{Δ}, coeficiente de capa; se obtiene de la tabla 4.10.

W, peso de un elemento en la corona, en kg.

γs, peso específico del elemento, en kg/m^3.

A continuación se muestra la ecuación con la que se obtiene el número de elementos en un área A del talud.

$$N = nK_{\Delta}\left(1-\frac{P}{100}\right)\left(\frac{g_s}{W}\right)^{\frac{2}{3}}A$$

donde:

N, número de elementos.

K_{Δ}, coeficiente de capa; se obtiene de la tabla 4.10.

W, peso de un elemento en la corona, en kg.

γs, peso específico del elemento, en kg/m^3.

n, número de elementos que forman la capa.

A, área de la capa; generalmente se escoge un área unitaria de 10 a 100 m^2.

4.3.2 Espigones

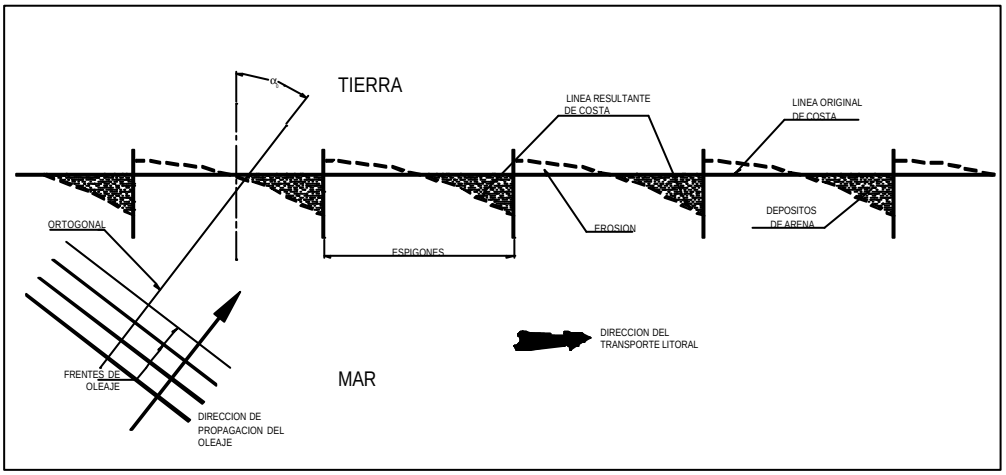
Son estructuras de protección costera que se construyen para conservar el perfil de la playa, o en algunos casos para estabilizar una zona que presenta problemas de erosión, reduciendo significativamente el acarreo litoral. Los espigones generalmente se construyen perpendiculares a la playa y se prolongan desde un punto tierra adentro de posible regresión de la línea de playa hasta una profundidad suficiente para estabilizarla.

Sin embargo los espigones perpendiculares a la línea de playa no protegen de manera definitiva a una playa contra la erosión, ya que un fuerte oleaje paralelo a la costa puede mover la arena de la playa y ponerla en la zona de rompiente (cambio de perfil de verano a invierno, ver capitulo 2).

Sin embargo, una protección más pertinente la producen los espigones separados y paralelos a la costa, los segundos pueden ser sumergidos -también llamados diques rebasables-, provocan que el impacto visual sea nulo, además de cumplir una función como los arrecifes naturales, que son una barrera de protección de las playas contra los embates del oleaje incidente y del oleaje extremal.

La línea de playa entre espigones tiende a alinearse con los frentes de onda como se muestra en la figura 4.22. En la figura se muestra la configuración general esperada de la línea de playa para un sistema de dos o más espigones. Esto es considerando un transporte litoral y un oleaje permanente en una sola dirección. En la figura α_0 es el ángulo que forman las ortogonales con respecto a la dirección de los espigones.

Figura 4.22 Modificaciones que sufre la línea de costa por la presencia de un sistema de espigones.



FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

4.3.2.1 Tipos de Espigón

Los espigones se clasifican en permeables o impermeables, altos y bajos, y fijos o ajustables. Estos espigones pueden ser construidos por pantallas de madera, de acero o concreto, o bien ser una barrera formada de piedra, elementos prefabricados de concreto u otro material.

Además pueden estar unidos o no a la costa. Los primeros pueden colocarse perpendicularmente, además de tener forma de L o T, mientras que los separados de la costa pueden ser paralelos a ella o formar un cierto ángulo con respecto a la línea de playa.

Los espigones unidos a la playa se utilizan en protección de playas y los segundos para estabilizar la entrada de lagunas litorales (sin navegación) o entradas de obra de toma. Los primeros son los más utilizados, además de ser los más económicos, en caso contrario los espigones separados de la costa son poco flexibles para hacerles modificaciones.

4.3.2.2 Dimensiones de un Espigón

Las dimensiones de los espigones dependen de la fuerza del oleaje que van a resistir, tipos de espigón, material con el que se va a construir y los métodos de construcción que se empleen; todos estos factores quedan bajo la consideración del diseño estructural.

Por otra parte la longitud, perfil y espaciamiento entre espigones se obtiene del análisis del funcionamiento del conjunto tomando en cuenta, direcciones y volúmenes del transporte litoral a lo largo del año. No existe un criterio definitivo y probado para diseñar eficientemente una protección con espigones que trabaje satisfactoriamente bajo cualquier circunstancia; sin embargo, existen algunas recomendaciones obtenidas de la experiencia lograda en el diseño operación, de varias protecciones; estas recomendaciones se listan a continuación.

a) Perfil – altura y longitud del espigón.

Para el diseño de un espigón se requiere considerar tres secciones o partes:

i) Tramo horizontal en la costa (berma).

ii) Tramo intermedio con pendiente.

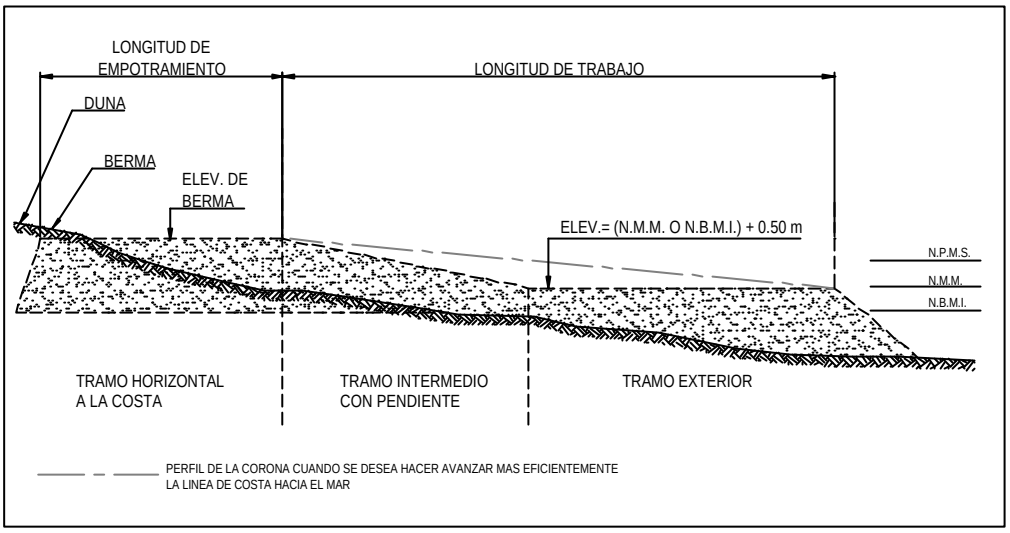
iii) Tramo exterior en el mar –ver figura 4.23-.

El primer tramo horizontal se extiende desde el lugar de la playa cuya elevación corresponde al nivel de pleamar máxima superior (NPMS), hasta donde se requiera anclar el espigón para evitar que la acción del mar lo separe de la costa. La altura mínima de la corona del espigón en ese tramo es la elevación de la berma (en algunos casos la elevación está entre +2.00 y +3.00 m sobre el nivel medio del mar).

El tramo intermedio del espigón debe ser lo más paralelo a la pendiente de la playa, y termina al llegar a la elevación del tercer y último tramo dentro del mar.

El tramo dentro del mar, lo constituye la última parte del espigón. La altura de la corona de este tramo se escoge lo más baja posible para permitir solo la entrada del equipo de construcción durante el ciclo de la marea baja. Este tramo por lo regular alcanza las cotas –2.00 a la –4.00 m, sin embargo, se puede construir espigones sin este último tramo.

Figura 4.23 Perfil constructivo de un espigón.



FUENTE: "Manual de Diseño de Obras Civiles (Hidrotecnia, A.2.13. Hidráulica Marítima)", Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas.

b) Espaciamiento entre espigones.

El espaciamiento entre espigones está en función de su longitud dentro del mar y de la incidencia del oleaje. La longitud dentro del mar, se mide desde la línea de playa hasta el extremo o morro del espigón.

Cuando no hay disponibilidad de transporte litoral o se desea una protección inmediata, se deben rellenar con arena para formar artificialmente las playas entre los espigones. Esto se puede realizar bombeando arena del fondo marino o transportando dicho material de playas cercanas.

Pero si la dirección del oleaje varía y en consecuencia también el transporte litoral cambia de dirección a lo largo del año, lo cual es frecuente, se recomienda que la separación entre los espigones sea de 2 a 3 veces su longitud dentro del mar. Esta longitud disminuye cuando la arena se deposita entre los espigones. La longitud que debe tomarse en cuenta en el diseño es la que finalmente se obtenga después de que se haya efectuado el relleno de arena sobre la playa.

c) Tamaños de los elementos que forman un espigón.

Este apartado solo se refiere a espigones que se construyan con roca, ya que el criterio de diseño es similar al indicado para los rompeolas y las escolleras.

El CERC recomienda que el espigón se construya utilizando el mismo material en toda su sección, variando el peso W de los elementos entre los límites que se presentan a continuación, siempre y cuando la altura del oleaje normal no exceda el 1.50 m.

$$0.22W_{50} < W < 3.6W_{50} \text{ , para } H \leq 1.50 \text{ m}$$

donde:

$$W_{50} = \frac{g_s H^3}{K_{rr}\left(\frac{g_s - g}{g}\right)^3 \cot q}$$

K_{rr}, coeficiente de estabilidad; igual a 2 para condición de oleaje rompiente y 2.5 para oleaje no rompiente.

Sin embargo, si el oleaje es mayor a 1.50 m, el material debe ser más uniforme. Su peso, W, se calcula sustituyendo K_D en lugar de K_{rr} en la ecuación anterior, los valores de K_D se muestran a continuación:

K_D = 3.9, para oleaje rompiente

K_D = 4.5, para oleaje no rompiente

La variación de los pesos debe estar comprendida entre 1.25 W y 0.75 W. Como no es fácil formar tres capas como en el caso de los rompeolas o las escolleras, la coraza del espigón se apoya directamente sobre el núcleo cuyos elementos tienen un peso comprendido entre W/10 y W/20.

Se recomienda colocar el espigón sobre un filtro sintético que evite el paso y movimiento ascendente de la arena por el cuerpo de éste. En caso de que no se coloque el filtro, el espigón presentará asentamientos a lo largo de largo de la zona de rompiente.

El ancho de la corona se obtiene de manera semejante al de los rompeolas o escolleras; sin embargo como los elementos son generalmente pequeños, regirá el ancho mínimo constructivo, el cual dependerá del tipo de equipo que se utilizará para su construcción.

d) Erosión

En una protección con espigones se presentan varias zonas con erosiones que conviene observar para evitarlas al máximo o evitar darles mantenimiento a los espigones, las principales causas se listan a continuación:

- Erosión local en el lado corriente debajo de un espigón cerca del empotramiento.
- Erosión local al pie del talud del morro debida a la acción del oleaje y las corrientes.

- Erosión local al pie del talud del espigón por cambio considerable del perfil de playa.

- Erosión situada corriente debajo de la zona protegida por los espigones, ya que recién construidos pueden detener casi todo el transporte litoral.

Por lo anterior, la longitud de empotramiento del espigón debe ser tal, que la erosión producida por la interrupción del transporte litoral, no deje al descubierto el arranque de la estructura.

Una vez que se conocen las obras de protección, la función que desempaña cada una y los métodos de diseño, ya es posible saber que tipo de estructura emplearemos para dar una solución confiable al problema de erosión.

En el capitulo siguiente abordaré el problema de aplicación, una vez que ya se cuenta con los elementos necesarios para dar una solución efectiva.

4.4 Conclusiones.

La información que se presentó este capitulo es de gran importancia para entender los términos que comúnmente se manejan dentro de la *Hidráulica Marítima*.

Se estudiaron los Parámetros Físicos que se presentan entre la playa y el mar; éstos son importantes para comprender la naturaleza de los fenómenos que ocurren en esta frontera y que muy pocas veces debido a su complejidad nos damos tiempo para entenderlos. Aunque es importante considerarlos al momento de diseñar cualquier estructura en la costa, porque de ellos depende el buen funcionamiento de la obra que propongamos.

Cada una de las estructuras que se mostraron dentro de este capitulo desempeñan una función diferente, y el problema de erosión debe ser tomado como algo serio, no es conveniente dar una solución sin sustento técnico, ni tampoco se tienen soluciones generales. En consecuencia la selección de la obra de protección se encuentra en función de los problemas específicos del sitio.

CAPITULO 5

REHABILITACIÓN DEL FRENTE PLAYERO EN BAHIA DE LA VENTOSA, SALINA CRUZ, OAXACA: EJEMPLO DE APLICACIÓN.

5.1 Antecedentes.

En el año de 1998 fue realizado el proyecto para prestar servicios de tratamiento de aguas residuales e industriales a la Refinería de PEMEX en Salina Cruz. En estudios posteriores realizados se identificó la problemática potencial de la Bahía de la Ventosa originada en su dinámica playera, la cuál actúa sobre los pozos playeros para la toma de agua como consecuencia de la cercanía de estas estructuras a la franja de la dinámica litoral. Esta situación se tornó crítica debido a que la playa ha presentado una recesión, la cuál se agudizó durante el periodo comprendido entre el 29 de mayo al 4 de junio del año 2002. En este periodo la recesión de la playa ha alcanzado a los pozos y dejado al descubierto la cimentación de la subestación eléctrica, formada por medio de pilotes; ocasionado con ello la suspensión temporal de la planta, a causa del deterioro que presentó la infraestructura existente y, al daño que sufrieron las líneas de conducción eléctrica -ver figura 5.1-.

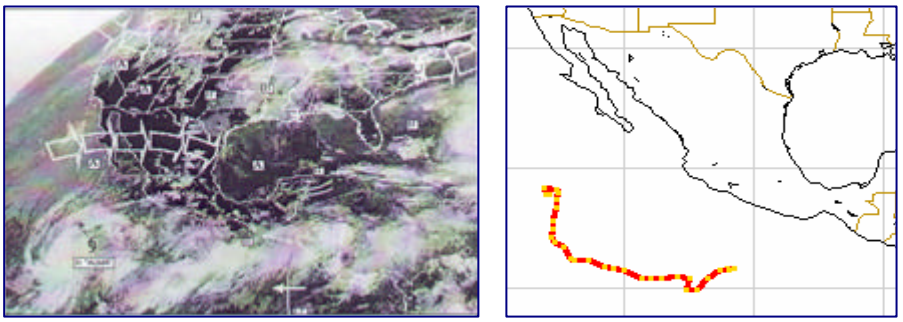
Lo anterior fue causado por una perturbación tropical de la temporada 2002 en la zona del Océano Pacífico; aunque el meteoro que azotó las costas de la Bahía de la Ventosa en Salina Cruz, Oaxaca; se encontraba lejos de ésta zona –ver figura 5.2-; fue la culpable de formar trenes de oleaje tipo “Swell” con suficiente energía para provocar una recesión playera adicional; del orden de 50 a 80 cm con respecto a la vertical y, de unos 10 m con relación a la horizontal; todo esto provocó la pérdida del terraplén de trabajo que aún se mantenía; debido a la apertura de una barra arenosa entre los pozos 2 y 3, como consecuencia de la erosión; estrechamiento de la franja arenosa e incremento en la carga de agua en la zona del delta del Río Tehuantepec –ver figura 5.1-.

Figura 5.1 Vista de los daños ocasionados a la infraestructura y líneas eléctricas en la zona de la Bahía de la Ventosa Salina Cruz, Oaxaca.

FUENTE: Ondeo Degremont, Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca.

Si bien, las condiciones de este oleaje no corresponden a las reinantes; es decir, no son normales, sino que son producto de perturbaciones climatológicas extraordinarias, que se presentan año con año en la zona, provocando daños ligeros e imperceptibles y, en algunas ocasiones daños de gran magnitud como las que se aprecian en la figura 5.1.

Figura 5.2 Vista del satélite donde se muestra el Huracán Alma (28 de mayo del 2002), así como la trayectoria que siguió en el periodo del 24 de mayo al 1° de junio de 2002.



FUENTE: C.F.E. GEIC Hidrometeorológia México y Plymouth State College (PSC) Weather Center.

Sin embargo, el fenómeno de erosión playera debe ser considerado como extremal, debido a la combinación de varios efectos que se presentaron, dentro de los cuales se encuentran: las lluvias intensas en esas fechas, que provocaron el incremento de la carga hidráulica de parte del Río Tehuantepec; y por ende la del Estero Boca del Río, actuando sobre las barras y la playa; además, si incluimos el embate de los trenes de oleaje lejano tipo “Swell”, que liberaron su energía sobre las costas de la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca; todo esto en conjunto provocaría la pérdida de material; y por ende, la disminución en la superficie de playa (erosión).

Ante ésta situación es necesario realizar los estudios necesarios para determinar el origen real de la problemática; valorar el riesgo existente y, definir las obras de protección; así como, las acciones necesarias para evitar daños futuros en las estructuras; por lo tanto, a continuación se realizará el análisis y descripción de cada uno de ellos.

5.2 Descripción de los Procesos Físicos en la Bahía de La Ventosa.

La infraestructura existente en la línea de playa que descarga al mar, desde la planta de tratamiento que presta sus servicios a PEMEX; cuenta con pozos playeros y una subestación eléctrica, los cuales están influenciados directamente por fenómenos físicos bien definidos; tales como: las descargas de sedimento por parte del Río Tehuantepec, el arrastre de éstos através del transporte litoral, que se presenta a lo largo de la playa; el oleaje normal y extremal; así como las mareas astronómicas y meteorológicas propias del lugar.

La descripción y el análisis de los procesos físicos presentes en la zona de estudio se listan a continuación:

5.2.1 Oleaje Normal

El análisis de las condiciones físicas se inicia con el oleaje normal que se presenta en la zona de la Bahía de la Ventosa; para la obtención de los datos fue necesario consultar y

recopilar información referente a la zona en estudio[1]; los datos que a continuación se presentan se recopilaron a partir de la revisión de tres fuentes de información de oleaje, los cuales se listan a continuación:

- Ocean Wave Statistics (OWS) del Almirantazgo Británico
- Estudios Físicos Sistemáticos del Puerto de Salina Cruz, Oax. Secretaría de Marina, 1953, 1954, 1963 y 1964
- Registros Anuales de Oleaje, Estudio desarrollado por la empresa Consultores en Ingeniería Fluvio-Marítima, S.A., (CIFSA). 1981-1983.

La tabla 5.1, muestra los valores, resultado del análisis estadístico, obtenidos de los datos del oleaje, recopilados de la fuente del Ocean Wave Statistics (OWS). Las alturas y los periodos presentados corresponden a los valores significativos en aguas profundas ($H_{1/3}$ y $T_{1/3}$); estos valores son el promedio del tercio superior del conjunto de registros de oleaje en cada dirección. La columna de la frecuencia se refiere al porcentaje de registros, por dirección. Estos valores serán utilizados mas adelante para la propagación matemática del oleaje y, para el cálculo del transporte litoral; el cuál determinará la influencia del oleaje sobre el movimiento de los sedimentos y, la influencia de estos en la morfología playera.

Tabla 5.1 Datos de Oleaje Normal en aguas profundas.

Dirección de Incidencia	Altura de Ola [m]	Período de Ola [s]	Frecuencia [%]
SW	1.85	9.00	36.90
SUR	2.10	10.25	35.60
SE	1.85	10.00	27.50

FUENTE: Ocean Wave Statisctics (OWS).

5.2.2 Oleaje Extremal

De la misma manera que en el caso del oleaje normal; el oleaje extremal se obtuvo considerando los resultados extraídos del mismo estudio; para el cálculo de los valores del oleaje extremal se aplicaron dos metodologías reconocidas para calcular la altura de ola asociada a vientos extremos; incluyendo los de naturaleza ciclónica. A continuación se listan las metodologías utilizadas:

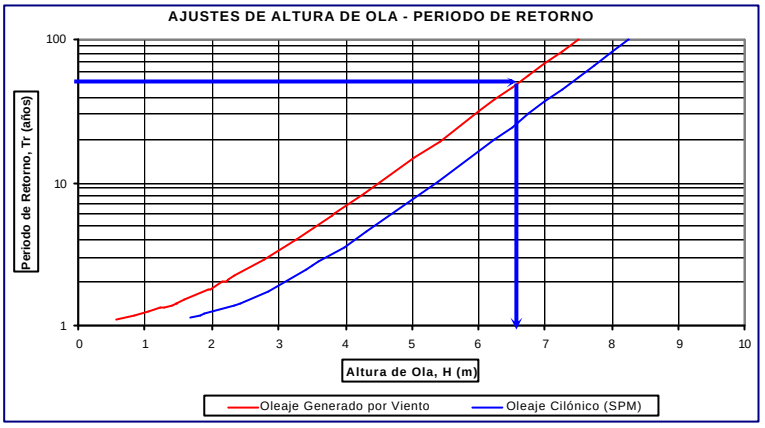
- Método propuesto por el Shore Protection Manual
- Método de oleaje generado por viento.

Una vez definidas las alturas y su velocidad del viento (H, *v*) para ambos métodos, se realizó el análisis de frecuencias para obtener la probabilidad de ocurrencia de una ola con un periodo de retorno; es decir, el periodo está en función de la altura de ola ($T=f(H)$).

[1] Proyecto de Reparación del Muelle, Rompeolas Este y Bordo Marginal en la Terminal de Contenedores del Puerto de Salina Cruz, Oax. Febrero del 2000, Consultoría Yáñez-Taylor, S.A. de C.V.

Una vez terminado lo anterior; se procedió a realizar la aplicación del modelo de valores extremos Tipo I (Gumbel, 1958) –ver figura 5.3-.

Figura 5.3 Gráfica Altura de Ola vs Periodo de Retorno.



El análisis por medio del modelo Tipo I de Gumbel, sirve para determinar la altura de ola asociada a un periodo de retorno; sin embargo, existe un antecedente en el que se propone que el periodo de retorno apropiado para el diseño de una estructura sea de 50 años; debido a ello, se usará la gráfica de la figura 5.3; en ella observamos que la altura de ola que corresponde a un periodo de retorno de 50 años es de 6.70 m; lo que significa que será la altura de ola que se considerará para realizar la propagación de oleaje, esto se realiza para obtener la altura de ola con que se diseñaran las obras de protección.

5.2.3 Marea Astronómica

Para la marea astronómica, se consultaron los Tablas Numéricas de Predicción de Mareas[2]; para el caso de nuestra zona de interés, Salina Cruz, Oaxaca; la tabla 5.2 muestra los principales planos de marea.

[2] Tablas Numéricas de Predicción de Mareas, Tablas de Mareas para el Océano Pacífico, 2002, editadas por la Dirección General de Oceanografía Naval, Secretaria de Marina, armada de México.

Tabla 5.2 Planos de Marea de la zona de Salina Cruz, Oaxaca.

Planos de Marea	Siglas	Nivel [m]
Pleamar Máxima Registrada	P.M.R.	1.748
Nivel de Pleamar Media Superior	N.P.M.S.= H.H.W°	1.219
Nivel de Pleamar Media	N.P.M.= M.H.W°	1.110
Nivel Medio del Mar	N.M.M. = M.S.L°	0.574
Nivel de Bajamar Media	N.B.M. = M.L.W°	0.038
Nivel de Bajamar Media Inferior	N.B.M.I. = M.L.L.W°	0.000
Bajamar Mínima Registrada	B.M.R. = L.L.W°	-1.763

FUENTE: Tablas Numéricas de Predicción de Mareas.

El empleo de los Planos de Marea para el diseño de las obras de protección debe ser considerado; debido a las características máximas del oleaje que se pueden presentarse; ya que la condición de rompiente, se asocia directamente con los niveles máximos que pueda alcanzar el nivel del mar; es decir, a mayor tirante; mayor penetración de ola y; en consecuencia, el rompimiento de olas será más próximo a la playa. Debido a esto, los niveles que se consideran principalmente para el diseño de las obras de protección son: el Nivel de Pleamar Media Superior (N.P.M.S.= H.H.W°), el Nivel de Bajamar Media Inferior (N.B.M.I. = M.L.L.W°), (para zonas del Océano Pacífico) y el Nivel de Bajamar Media (N.B.M.), (para el Golfo de México) –ver tabla 5.2-.

5.2.4 Marea Meteorológica

La Marea Meteorológica se define como el incremento del nivel del mar, provocado por la fuerza que el viento ejerce sobre la masa de agua, se asocia generalmente a los huracanes; éstos provocan la acumulación de un importante volumen de agua en zonas de poca profundidad, o de amplia extensión de la plataforma continental.

En estudios previos realizados para la Bahía de la Ventosa en Salina Cruz, Oaxaca[3], obtuvieron como resultado el valor de marea meteorológica de 1.28 m; el cual, se determinó con base al Método de la Sobreelevación del Nivel del Mar por Depresiones Atmosféricas (Per Brunn, 1983). En la tabla 5.3 se presentan los eventos atmosféricos extremos que tuvieron influencia sobre las costas de la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca, en el periodo de 1988 a 1997.

[3] Estudio de Procesos Costeros y Anteproyecto de la Línea de Descarga al Mar de la Planta de Tratamiento y Uso Integral del Agua de la Refinería de salina Cruz, Oaxaca, Reporte Final. Septiembre de 1998. Consultoría Yáñez-Taylor, S.A. de C.V.

Tabla 5.3 Mareas Meteorológicas, que tuvieron influencia sobre las costas de la Bahía de la Ventosa, en Salina Cruz, Oaxaca.

Evento	Fecha	Clasificación	Velocidad del Viento [m/s]	Distancia al Sitio [km]	Marea Meteorológica [m]
Bud	21/06/88	Tormenta Tropical	20.58	188.29	0.38
Miriam	24/10/88	Depresión Tropical	18.01	296.61	0.26
Beatriz	19/06/93	Tormenta Tropical	25.72	254.43	0.50
Cristina	03/07/96	Tormenta Tropical	30.87	123.81	1.23
Douglas	29/06/96	Tormenta Tropical	33.44	303.81	0.83
Olaf	28/09/97	Tormenta Tropical	25.72	82.32	1.28
Pauline	08/10/97	Huracán Tipo 4	59.16	147.14	2.90
Rick	08/1197	Tormenta Tropical	20.58	979.45	0.09

La sobreelvación máxima extraordinaria registrada se presentó para el caso del Huracán Paulina, la cuál fue calculada en 2.90 m; sin embargo, no fue considerada como adecuado para el diseño, por lo que se le considera sobrestimado (ya que esto hubiera ocasionado inundaciones sobre el patio de conenedores del puerto de Salina Cruz, con una elevación de 2.50 m.s.n.b.m.i. hecho que no fue reportado por las autoridades del Puerto de Salina Cruz, ni durante la ocurrencia del evento).

De la misma manera, que para el caso de al Marea Astronómica, la Marea Meteorológica es determinada, con el fin de superponer sus efectos y, definir las condiciones más apropiadas para un diseño correcto de las estructuras de protección; por consiguiente, los niveles que se consideran para el diseño de las obras de protección son los siguientes:

- 1.22 m para el nivel más alto de la Marea Astronómica –ver tabla 5.2-
- 1.28 m para la Marea de Tormenta –ver tabla 5.3-.

De esta manera, la sobreelevación que se debe considerar para conocer la altura a la que se diseñará la obra de protección, es de 2.50 m (N.B.M.I.); ésta sobreelevación se obtuvo, sumando el nivel de la Marea Astronómica y el de la Marea de Tormenta.

5.2.5 Propagación Matemática del Oleaje

Los oleajes antes definidos, corresponden a las condiciones de aguas profundas, en donde no han sido afectadas las características de altura de ola, por efecto de la profundidad; debido a esto, se tiene la necesidad de definir la altura de ola normal y extremal en la zona de playa; por lo que se consideró emplear la refracción del oleaje.

El modelo que se empleó es el denominado REF/DIF, el cual se basa en la resolución de la forma parabólica de la ecuación de la pendiente suave; mediante el empleo de técnicas de aproximación en diferencias finitas, lo que permite calcular los valores de altura así como la dirección del oleaje.

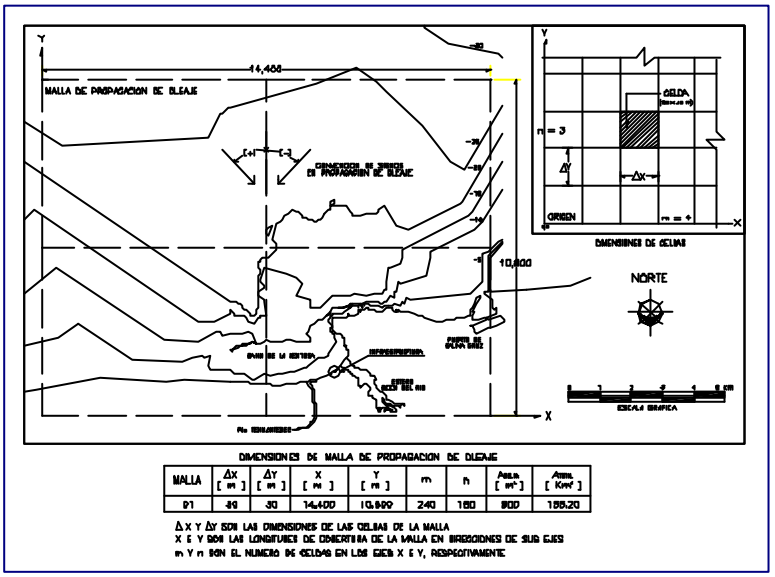
Éste modelo fue desarrollado por J.T. Kirby y R.A. Dalrymple (1994), en la Universidad de Delawer (Center for Applied Coastal Research); este modelo además considera los efectos del fondo, efectos difractivos, de rompimiento y amortiguamiento del oleaje; además incluye las corrientes.

Para aplicar el modelo, se requiere desarrollar el esquema o malla reticular de propagación. La construcción de ésta malla fue realizada haciendo uso de la paquetería denominada CIVIL 7.5 y su interfase con AUTOCAD, tomando de base la batimetría que contienen las cartas náuticas No. S.M. 600 y S.M. 628, editadas por la Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina.

De ésta manera, el área de cobertura de la malla, ocupó una superficie de 10.8 km en dirección mar a dentro, y 14.4 km en dirección del frente de propagación; consiguiendo con ello una superficie total de 155.20 km^2. El número de celdas obtenidas para cada dirección fue de 360 y 480 respectivamente, con un espaciamiento de celda de 30 m para cada lado; haciendo un total de celdas de 172,800; con un área unitaria de 0.90 km^2.

Ésta orientación se realizó para cubrir el máximo de las direcciones de propagación de oleaje elegido, y para evitar transformar frentes de ola oblicuos a la costa; es decir, ángulos mayores a 45°, los que pueden provocar inestabilidad matemática dentro del modelo (Kirby, 1994) dentro de las simulaciones; y por ende, inducir resultados fuera de escala. A continuación se presenta la figura 5.4, que muestra los límites y características de la malla de propagación.

Figura 5.4 Malla empleada para realizar la Propagación de Oleaje de la Bahía de la Ventosa.



Las condiciones de oleaje en la frontera de la malla, para cada una de las direcciones de incidencia; corresponden a los valores de oleaje normal y extremal, a partir de los cuales fue realizada la propagación de oleaje hacia aguas someras.

De los resultados obtenidos por medio de la propagación de oleaje, se aprecia que los valores de altura son menores a los 2.50 m, presentándose en las proximidades de la playa.

5.2.6 Comportamiento Sedimentológico de la Playa

El transporte litoral es uno de los fenómenos más importantes dentro de los procesos costeros; debido a esto, se desarrolló un análisis sedimentológico, para determinar su comportamiento en la Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca. En primera instancia se realizó una caracterización del sedimento presente a la playa; se evaluaron las condiciones del transporte litoral, considerando al oleaje como principal motor de alimentación o retiro de sedimento en la playa; a partir de estos elementos, se hace un análisis sobre el comportamiento de la evolución playera por efecto del oleaje, considerando oleaje normal y extremal; se evaluaron también las condiciones de arrastre de sedimento de origen fluvial (sedimento de aporte por parte del Río Tehuantepec); para por último realizar un balance de sedimentos.

5.2.6.1 Características de la Playa

La Bahía de la Ventosa es el punto donde convergen dos cuencas: la primera es la correspondiente al Río Tehuantepec, y la segunda corresponde al Estero denominado Boca del Río. En consecuencia, la Bahía de la Ventosa, está integrada por dos barras arenosas de alta dinámica litoral.

En época de lluvias cuando los escurrimientos continentales son importantes y aportan suficiente sedimento a la playa, debido a que incrementan su carga hidráulica y auxiliándose de la dinámica litoral; abren las barras arenosas, estableciendo una comunicación constante con el mar.

Bajo estas condiciones, los sedimentos existentes en la Bahía de la Ventosa se pueden encontrar dos tipos de sedimento: el primero es caracterizado por sedimento playero, y el segundo por las descargas fluviales, correspondientes al aporte realizado por el río Tehuantepec.

Sin embargo, cabe destacar que los sedimentos fluviales han disminuido en los últimos años; probablemente a consecuencia de las condiciones de sequía que se han presentado en la región del Río Tehuantepec; lo que provoca que la dinámica litoral sea más intensa, y por ende, se presenten problemas erosión sobre las costas de la Bahía de la Ventosa; todo ello inducido por el imperante motor del movimiento litoral y la supresión de la fuente de aportación -Río Tehuantepec-.

El material playero existente en la zona, está constituido por arena fina mal graduada y finos en proporción ligera, con un diámetro de 0.35 mm y un peso volumétrico aproximado de 2.60 t/m^3 –ver figura 5.5-; los valores se obtuvieron mediante pruebas de laboratorio realizadas a muestras de arena recolectada en la zona de estudio[4].

[4] Estudio de procesos Costeros y Anteproyecto de la Línea de Descarga al Mar de la Planta de Uso Integral del Agua de la Refinería de Salina Cruz, Oaxaca, Reporte Final, Septiembre de 1998, Consultoría Yáñez-Tylor, S.A. de C.V.

Figura 5.5 Vista del material sedimentado, que se encontró en la playa, y que sirvió como muestra, para realizar las pruebas de caracterización.

FUENTE: Consultoría Yáñez-Taylor, S.A. de C.V.

Transporte Litoral

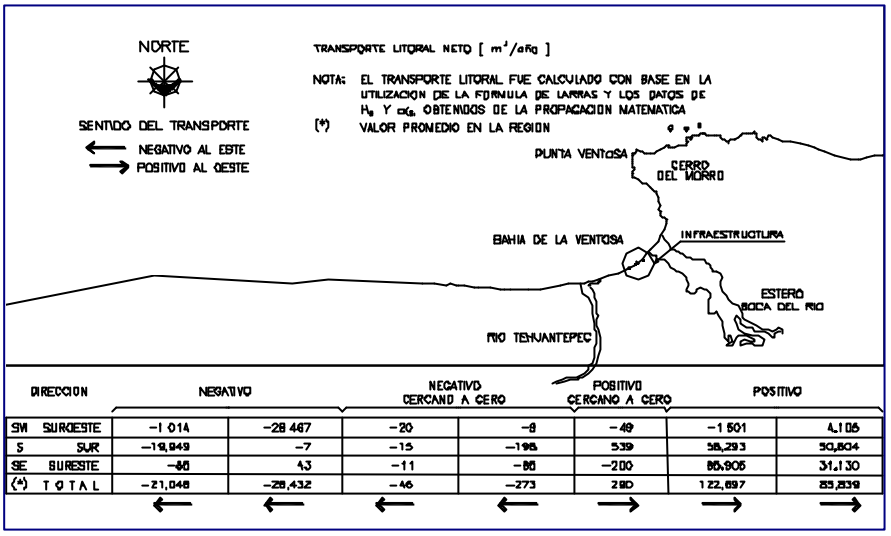
Dentro de los fenómenos más importantes del comportamiento playero se encuentra el transporte litoral, el cual es definido como: la capacidad del movimiento de sedimentos en magnitud y en dirección; asociado a la acción y efecto del oleaje. Para cuantificar el transporte litoral se requiere realizar el análisis de la propagación matemática del oleaje. De éste análisis se obtienen los datos de altura de ola rompiente (H_b), y la dirección de la ola en rompiente (α_b).

Una vez conociendo los valores de (H_b) y (α_b) se forman matrices referidas a un sistema relativo a la playa; delimitando la franja del oleaje de rompiente y calculando el transporte litoral en esa región; el vector de transporte de sedimentos emplea para el cálculo la fórmula de Larras.

Los resultados de este cálculo fueron promediados para obtener un valor representativo del transporte litoral, para un rango de celdas, sin que se cambie la dirección; de ésta manera se realizó para cada una de las direcciones del oleaje incidente, y con base en los resultados del transporte litoral, se cuantificó el valor de arrastre neto –ver figura 5.6-.

Los resultados que aparecen en la figura 5.6, muestran que existen dos zonas con transporte litoral neto bien definido en dirección. Hacia el oeste de la Bahía; en dirección hacia el Cerro El Morro; el transporte litoral se mueve en dirección E-W, hacia la zona de la desembocadura del Río Tehuantepec; el transporte litoral se mueve en dirección W-E, el punto donde se presenta el cambio de dirección del transporte litoral neto está muy próximo al de la localización de las estructuras playeras de la planta de tratamiento.

Figura 5.6 Transporte Litoral REF/DIF Larras.



DIRECCION	NEGATIVO		NEGATIVO CERCANO A CERO		POSITIVO CERCANO A CERO	POSITIVO	
SW SUROESTE	−1 014	−28 467	−20	−8	−49	−1 501	4,106
S SUR	−19,949	−7	−15	−198	539	58,293	30,804
SE SURESTE	−86	43	−11	−86	−200	80,906	31,130
(*) TOTAL	−21,048	−28,432	−46	−273	290	122,697	85,839
	←	←	←	←	→	→	→

La magnitud del transporte litoral, en la zona de análisis tiene un valor promedio de 21,000 m^3/año en dirección W-E, y de 85,800 m^3/año en dirección E-W.

5.2.6.2 Evolución Playera

Una vez que determinado el transporte litoral, se realizó el análisis de evolución playera, haciendo uso del *Modelo Matemático de Evolución y Comportamiento Playero* denominado GENESIS, (GENEralized model for SImulating Shoreline charge), el cuál fue desarrollado por Hudson y Kraus en 1987, U.S. Army Corps of Engineers.

El modelo de Evolución Playera considera que la variación de arena en un volumen de control está en función de la cantidad neta de material que entra y sale del sistema, por medio del transporte litoral. Para trabajar en el modelo es necesario alimentarlo con una serie de datos de oleaje, los cuales se definen en un archivo *excitador*; a partir del cual se determina el comportamiento del sistema.

La determinación del transporte litoral se realizó con base en la acción del oleaje normal, caracterizada a partir de los resultados de la propagación matemática del oleaje; de ésta manera, fueron identificados los valores de altura y dirección de oleaje para cada una de las tres direcciones de oleaje normal –ver tabla 5.1-; en la zona común definida en la frontera de la malla de evolución playera (Near Shore Reference Line) y una franja de malla de propagación que se muestra en la figura 5.7. A partir de esos resultados, se crearon los vectores de altura y dirección de oleaje (H_i, θ_i, t_i). La combinación aleatoria de estas series constituyen el archivo excitador del modelo, que representa las condiciones de oleaje actuante sobre la playa de la Bahía de la Ventosa.

El GENESIS fue alimentado con el archivo *excitador*, mostrando como resultado la tendencia del comportamiento litoral a largo plazo en la Bahía de la Ventosa; esto lo podemos observar en la figura 5.8.

Figura 5.7 Malla de Simulación de Evolución Playera.

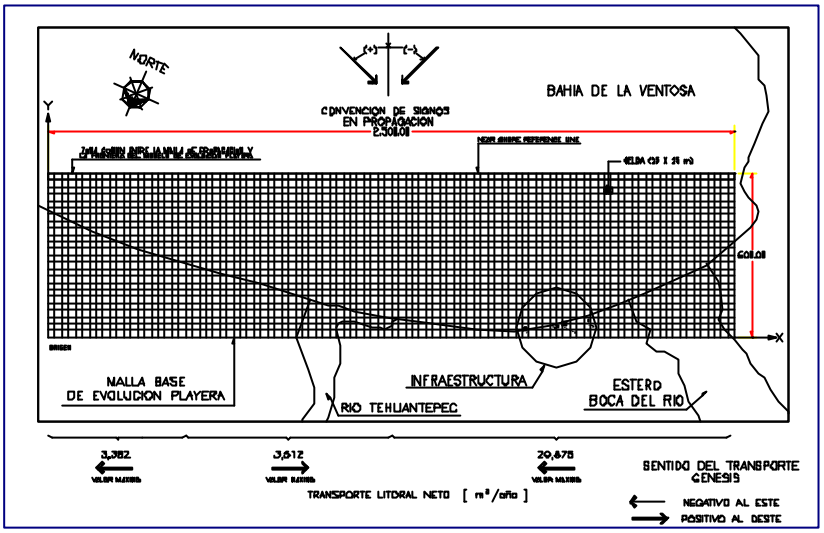
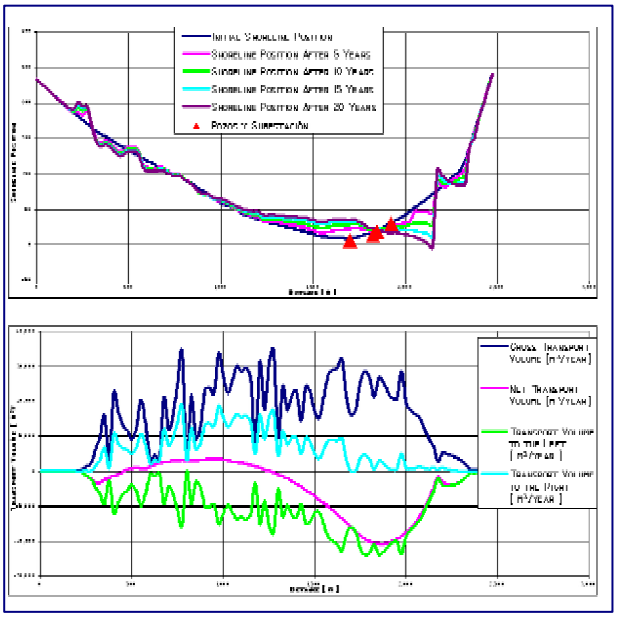
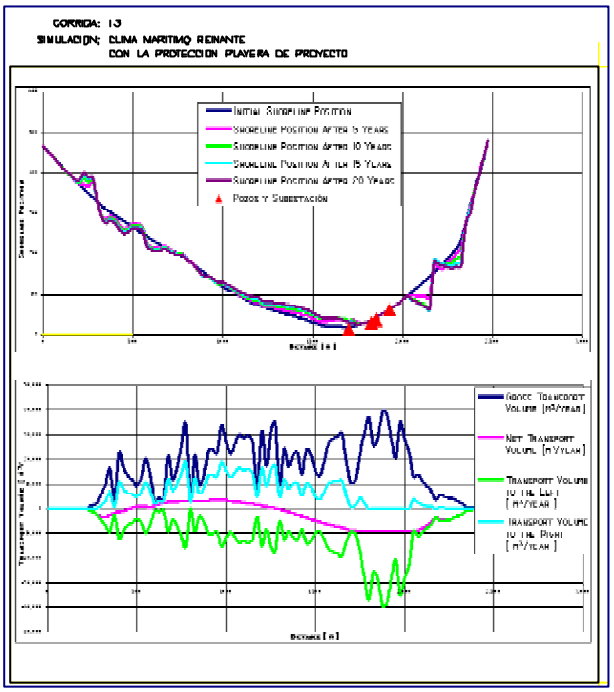


Figura 5.8 Análisis de Estabilización Playera.



Continuando con la simulación playera, fue necesario considerar un escenario en el cual la zona de estudio se encuentra protegida por una pared marginal; la cual, se comportaría como una protección marginal paralela a la línea de playa –ver figura 5.9-.

Figura 5.9 Análisis de Estabilización Playera, considerando una pared marginal.



En la figura 5.8, se aprecia que la acción normal de oleaje provoca, en la zona de los pozos y de la subestación eléctrica, un proceso erosivo creciente, el cual induce a la pérdida de material de la playa en dicha zona, en un rango aproximado de 25 a 100 m en veinte años.

El GENESIS determina el transporte litoral por sus propios algoritmos, basándose en una fórmula empírica predictiva de arrastre litoral paralelo a la costa. Su determinación por este medio constituyó otra fuente de cuantificación del transporte litoral neto, el cuál es semejante a los resultados obtenidos con anterioridad en el programa del REF/DIF Larras. El valor que se obtuvo por medio del GENESIS fue de 20,000 m^3/año con dirección Este; en comparación a los 21,000 m^3/año en dirección W-E, que se obtuvieron para el REF/DIF.

Además se observó en la figura 5.9, que la protección marginal ofrece un frente de disminución del proceso erosivo, ayudando a estabilizar la playa en una frontera definida por la protección marginal; sin embargo, al Oeste de los pozos playeros, la importante tendencia erosiva original diminuye; pero al igual que en la actualidad, seguirá ocasionando la apertura temporal de la barra arenosa en el Estero Boca del Río.

5.2.6.3 Arrastre de Sedimentos del Río Tehuantepec

Como ya se había mencionado en capítulos anteriores, el aporte de sedimento que hacen los ríos al mar, es muy importante para continuar con la dinámica litoral de las playas; debido a esto, es importante analizar la capacidad de arrastre que tiene el Río Tehuantepec.

Para el cálculo del arrastre de sedimentos de naturaleza fluvial se consideró como base de referencia la información obtenida de la estación hidrométrica “Boquilla No.1” (localizada aguas arriba de la Presa Benito Juárez, sobre el cauce del mismo Río Tehuantepec, y la cual está operada por la Comisión Nacional del Agua C.N.A.).

La información recabada en ésta estación es relativa a los gastos máximos anuales y el diámetro medio del material transportado por la corriente y, la información gráfica del río a partir de las dimensiones del cauce. Si bien es cierto, que éstos datos corresponden a las condiciones prevalecientes aguas arriba de la presa; también es un hecho que estos datos fueron considerados como valores de referencia para el comportamiento fluvial y de arrastre.

La metodología que se siguió para el cálculo del arrastre de sedimentos es la propuesta por Bangnold, a continuación se describe ésta metodología.

1. Se ordenaron los gastos máximos anuales, para encontrar dentro de los registros disponibles (de 1935 a 1993), los valores mínimo, medio y máximo de escurrimiento; ya que estos gastos establecen los límites de arrastre de sólidos y del líquido.

   Los valores del gasto máximo, medio y mínimo se listan a continuación:

   - Gasto mínimo 44.92 m^3/s
   - Gasto medio 242.18 m^3/s
   - Gasto máximo 1,100.00 m^3/s

   Debido a la condición extraordinaria del gasto máximo, y a su elevado valor, con relación a los límites medio e inferior, se omitió su empleo para determinar las condiciones de arrastre.

2. En las consideraciones hechas para la desembocadura del Río Tehuantepec; considerando el gasto mínimo y medio; la velocidad de flujo puede oscilar entre 0.25 y 1.0 m/s; de ésta manera fue determinada la geometría media de la sección transversal del cauce, los resultados se muestran en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Geometría de la Sección Transversal del Cauce.

Gasto [m^3/s]	Velocidad de Corriente [m/s]	Area Transversal [m^2]	Perímetro Mojado [m]	Tirante Normal [m]	Radio Hidráulico [m]
44.92	0.25	179.68	93.02	2.09	1.93
	0.50	89.84	86.64	1.08	1.04
	1.00	44.92	83.29	0.55	0.54
242.18	0.25	968.70	137.08	9.05	7.07
	0.50	484.35	112.02	5.09	4.32
	1.00	242.18	97.19	2.75	2.49

3. Una vez obtenidas las características de la sección transversal, se procede a calcular la capacidad de arrastre del río, mediante la metodología propuesta por Bagnold; los resultados se muestran en la tabla 5.5.

A partir de los resultados que se obtuvieron, podemos comentar que si no existiera la barrera que construyó el hombre -La Presa Benito Juárez-, la boca de comunicación con el mar permanecería abierta; y en consecuencia, el Río Tehuantepec descargaría al Océano Pacífico un volumen mínimo de 30,000 m^3/año, y un volumen medio de hasta 87,000 m^3/año de sedimento.

Tabla 5.5 Arrastre de Sedimentos por parte del Río Tehuantepec.

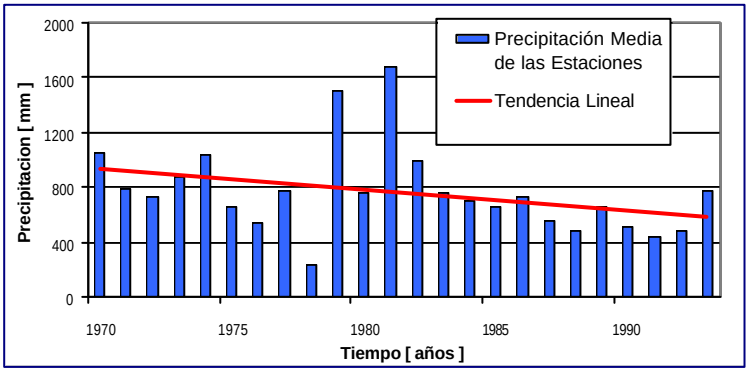
Gasto [m^3/s]	Velocidad de Corriente [m/s]	Capacidad de Arrastre de Sedimentos [m^3/año]
44.92	0.25	34,256
	0.50	66,232
	1.00	127,054
242.18	0.25	44,571
	0.50	87,720
	1.00	175,676

Si observamos bien las cantidades de la tabla, podemos establecer que las cantidades de arrastre de sedimento coinciden con la capacidad del arrastre litoral; situación que permite establecer la hipótesis siguiente: lo que descarga el Río Tehuantepec al mar; el océano lo mueve y lo distribuye en una condición tendiente al equilibrio.

Sin embargo, es una realidad que la Presa Benito Juárez constituye una importante barrera para el escurrimiento del Río Tehuantepec, ya que retiene una gran cantidad de sedimentos; lo que provoca que las condiciones aguas abajo de la Presa, con seguridad sean menores a las calculadas; influyendo directamente entre la cantidad de sedimento que se aporta y, la cantidad que el mar mueve en el transporte litoral.

Además, en los últimos años se ha presentado en la Cuenca del Río Tehuantepec una disminución en la precipitación de la zona; causando que el caudal de río se reduzca, provocando en consecuencia una menor aportación de sedimentos al mar. Ésta tendencia se observa en los registros de las estaciones climatológicas de la zona tal y como se muestra en la figura 5.10.

Figura 5.10 Registros de Precipitación Media en la Cuenca del Río Tehuantepec.



5.2.6.4 Balance de Sedimentos

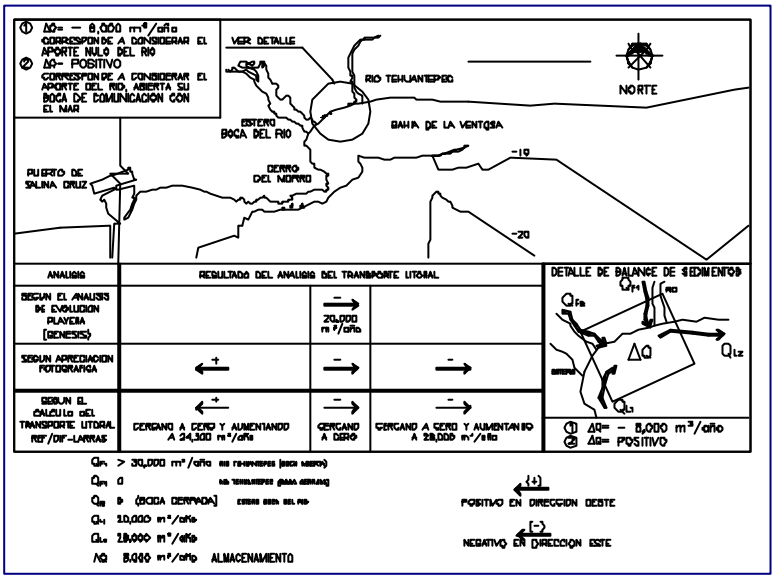
Para sustentar lo anterior, se realizó el balance sedimentológico en la Bahía de la Ventosa, para lo cual se consideraron comportamientos tendenciales.

En un principio se definió el volumen de control, el cual abarcó las fuentes de aporte de sedimentos más importantes, así como la franja playera de la Bahía de la Ventosa, de esta manera se procedió a realizar el balance de sedimentos, con los datos obtenidos a partir de 2 variantes que a continuación se listan:

- Evaluación del Transporte Litoral mediante el empleo del GENESIS.
- Evaluación del transporte Litoral mediante el empleo de la fórmula de Larras incluyendo los resultados del modelo de propagación de oleaje.

Cada una de estas variantes se consideraron para las aportaciones del río Tehuantepec, en condiciones con la barra cerrada y la barra abierta; asimismo, considerando la aportación nula de sedimentos del estero Boca del Río –ver figura 5.11-.

Figura 5.11 Balance de Sedimentos de la Bahía la Ventosa, en Salina cruz, Oax.



El balance de sedimentos considera la ecuación de continuidad dentro del volumen de control -ver capítulo 2-, en el cual interactúan las distintas fuentes de aportación, cuyos resultados muestran en la figura 5.11. Es importante hacer notar que se tiene una bahía con tendencia a un déficit de sedimentos; es decir, se está dando lugar a un proceso de erosión en la zona de la Bahía de la Ventosa.

5.3 Diseño de las Obras de Protección.

Una vez conocidos los procesos físicos que se presentan en la zona, se procede a desarrollar la alternativa de solución, la cual debe aminorar en lo posible la recesión de la playa en la zona de estudio.

Para la elección de la estructura, es importante tomar en cuenta que la bahía presenta un déficit de sedimentos, provocado por el intenso oleaje que libera su energía al impactarse en la playa, ocasionando que el material sea transportado mar a dentro; y esto a su vez derive en la erosión que se observa en la bahía de la Ventosa.

Por lo anterior la solución de diques rebasables y paralelos a la costa, es la alternativa adecuada, debido a que este tipo de estructuración, actúa como un arrecife artificial, cumpliendo con la finalidad de disipar la energía del oleaje incidente, provocando su rotura, formando una zona de oleaje tipo *SEA*, al pasar la estructura.

Este tipo de diques rebasables, se emplean cuando se desea proteger o aumentar el ancho de la playa seca en virtud de su capacidad de interrumpir o disminuir el transporte de sedimentos hacia los depósitos de arena que se encuentran mar adentro, traduciéndose en la sedimentación de material, gracias a lo cual el perfil de la playa tiende a estabilizarse (por medio de la dinámica litoral existente); y eventualmente, desplazar la línea de costa mar a dentro. En este sentido, un proyecto de protección costera con diques rebasables y paralelos a la costa, puede constar de un solo dique largo, con el que se produciría el crecimiento de una saliente llamada *tómbolo*; o la construcción de varios segmentos, con los que se generarían playas *rítmicas*, o también llamadas *curps.*

Sin embargo, el carácter natural de diques rebasables y paralelos a la costa eliminan la paradoja entre las necesidades de protección de la zona costera, y del respeto al entorno ambiental, ya que este tipo de solución además de resultar de menor costo que las estructuras emergidas (diques rebasables y espigones, por ejemplo), es ambientalmente favorable, puesto que provee una zona habitable para especies marinas y el impacto visual generado es prácticamente nulo.

Por esto se ha elegido diseñar una protección costera empleando los diques rebasables y paralelos, por representar una alternativa ecológica y socialmente viable. Adicionalmente al no estar ligada a la línea de playa, la disposición de estas estructuras permite el desarrollo de actividades deportivas, turísticas, de pesca y cría de especies marinas.

Los diques rebasables son aquellos que, debido a su baja cota de coronación, han sido diseñados para permitir el rebase importante de la ola sobre la estructura. Los diques rebasables se diseñan para permitir la transmisión de una parte importante de la energía del oleaje.

Los diques rebasables o sumergidos introducen varios parámetros nuevos en la formulación de estabilidad. El francobordo F, es el parámetro fundamental. Otro parámetro a tomar en consideración en la estabilidad de la coronación y del manto posterior es la anchura de la coronación B. Por lo que respecta a los morros del dique rebasable, estarán en función de la geometría (R/L) y el francobordo, siendo de poca importancia la anchura de la coronación.

A continuación se comentarán los detalles del diseño de la obra de protección propuesta, para mitigar la erosión que se presenta en la Bahía de la Ventosa.

Como primer punto se requiere conocer la manera en que se comportará la playa ante la colocación de la protección costera, y de esta manera saber si la playa responderá positivamente ante la solución propuesta.

De acuerdo al documento *EM-1110-2-1100 (Part V) del Shore Protection, editada el 31 de julio del 2003*, sugiere conocer la respuesta de la playa ante, la colocación de diques rebasables paralelos a la costa, para conocer la respuesta es necesario valuar la siguiente expresión:

$$I_s = \exp\left(1.72 - 0.41\left[\frac{L_s}{Y}\right]\right)$$

donde:

I_s = Indice de la respuesta de la playa.

L_s = Longitud del diques rebasables, (60 m).

Y = La distancia de la línea de playa al eje del diques rebasables, (150 m).

De donde los cinco tipos de respuesta de la playa presentan diferentes valores, los que nos sirven para conocer como se comportará la playa. A continuación se listan los valores y el tipo de respuesta que se tendrá por parte de la playa:

I_s = 1; formación permanente de tómbolos.

I_s = 2; formación periódica de tómbolos.

I_s = 3; formación de grandes salientes.

I_s = 4; formación de pequeñas salientes.

I_s = 5; sin respuesta, por parte de la playa.

Atendiendo a este trabajo, la respuesta que se obtuvo al evaluar la fórmula anterior, fue de 4.74; es decir, la playa presentará formación de salientes a lo largo de la línea de playa (formando una playa rítmica, o también llamada curp); sin embargo, estos resultados son preliminares, por lo que se requiere verificarlos.

Para verificar el resultado anterior, el mismo documento propone realizar las siguientes relaciones:

$$\frac{L_s}{L_g} \text{ y } \frac{Y}{d_s}$$

donde:

L_s = Longitud del diques rebasables, (60 m).

L_g = Separación entre diques rebasables, (30 m).

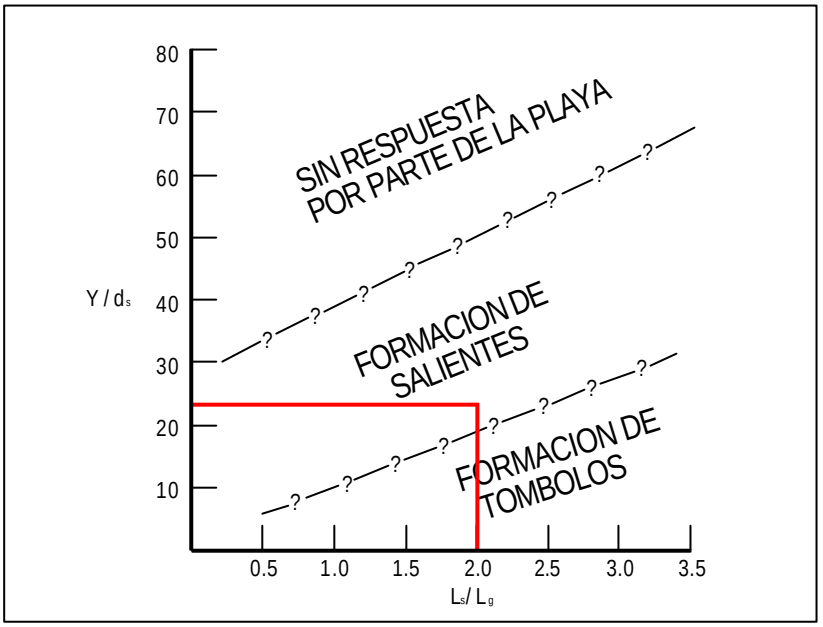
Y = La distancia de la línea de playa al eje del diques rebasables, (150 m).

d_s = Cota de desplante, (-4.00 m N.B.M.I.).

Al conocer los valores de las relaciones anteriores **($Y/d_s = 23.08$ y $L_s/L_g = 2.00$)**, se procede a identificar la zona en que se encontrará la respuesta que tendrá la playa, haciendo uso de la figura 5.12.

Como apreciamos en la figura 5.12, los puntos se intersectan dentro de la zona de formación de salientes; coincidiendo con el resultado del índice de la respuesta de la playa, calculado anteriormente. Con estos resultados se concluye que la playa responderá de manera favorable a las expectativas que se esperaban en un principio.

Figura 5.12 Respuesta de la playa, mediante las relaciones Y/d_s contra L_s/L_g.



FUENTE: EM-1110-2-1100 (Part V) del Shore Protection, editada el 31 de julio del 2003, página V-3-55.

Una vez que conocemos el resultado de la respuesta de la playa ante la protección que se propone, y que es favorable, se procede al diseño de los diques rebasables paralelos a la playa.

Continuando con la descripción del diseño de las obras de protección, se procede al diseño de los diques rebasables paralelos a la costa. Como ya se ha comentado, este tipo de estructuración, difiere en su diseño, en comparación con los diques rebasables y escolleras que son perpendiculares a la costa.

A continuación se presenta el diseño de este tipo de estructuras, obteniendo los pesos y diámetros de roca que formaran parte de la estructuración. El procedimiento del cálculo se presenta en el anexo de cálculos.

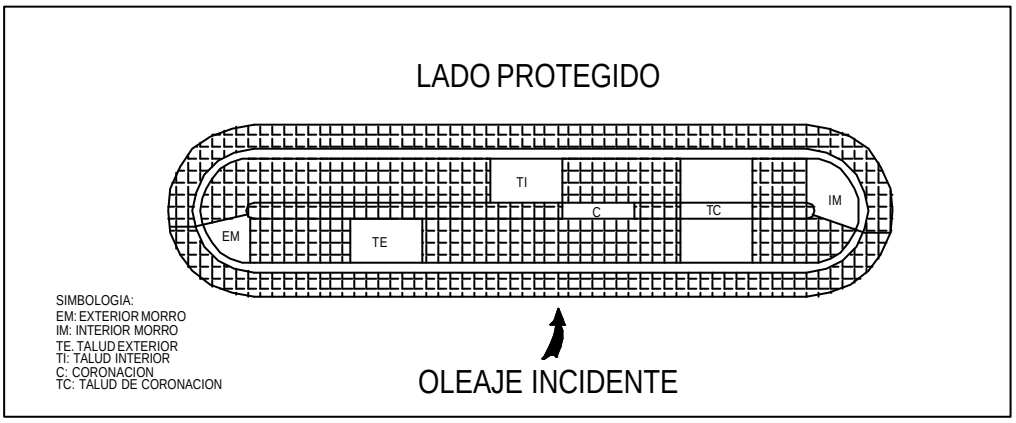
En la tabla 5.6, se muestra el peso de los elementos para cada una de las partes que conforman la estructura de protección. En el cálculo del diques rebasables, se consideraron las sobreelevaciones de la marea de tormenta y marea astronómica.

Tabla 5.6 Tabla resumen del peso de los elementos que conforman las estructuras de protección.

UBICACION	PESO [t]	DIAMETRO [m]
TALUD EXTERIOR	11.12	1.61
CORONACION	5.21	1.40
TALUD INTERIOR	3.86	1.13
MORRO	7.82	1.43

Del diseño anterior se obtiene la sección transversal y en planta, de una de las tres estructuras que formarán parte de la protección marginal, la cual abarca una longitud total de 240 m, con una separación entre estructuras de 30 m, la longitud de cada uno de los diques rebasables será de 60 m. En la figura 5.13, se muestra la localización de los diferentes sectores de un dique rebasable.

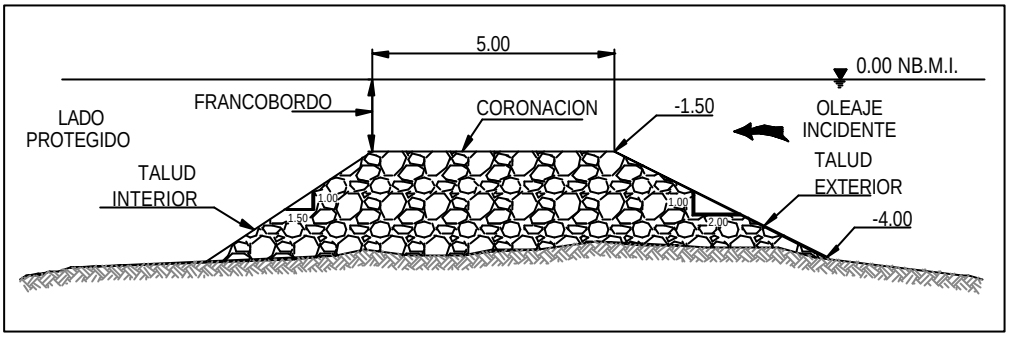
Figura 5.13 Localización de los diferentes sectores de un dique rebasable. De Vidal et al. (1992).



FUENTE: Apuntes de Clase de Hidráulica Marítima, Semestre 2004-1, Dr. Rodolfo Silva Casarín, División de Estudios de Posgrado, D.E.P.F.I., diciembre de 2003.

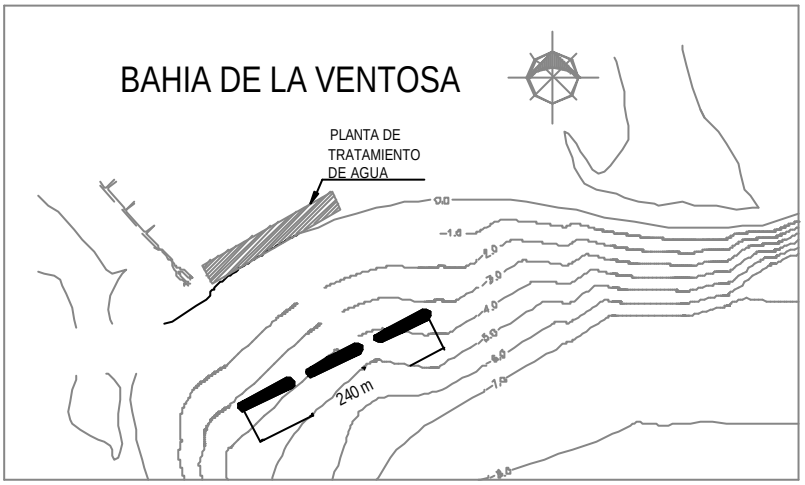
A continuación en la figura 5.14, se muestra la sección transversal tipo del diques rebasables sumergido.

Figura 5.14 Sección transversal tipo del diques rebasables sumergido.



Una vez obtenidos los pesos y diámetros de las rocas que formaran la estructura, se procede a realizar el arreglo en planta de la protección sobre la batimetría de la zona. En la figura 5.15, se muestra el arreglo final.

Figura 5.15 Arreglo en planta de la protección marginal, en la Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oax.



Con el arreglo que se presenta en la figura 5.15, se garantiza que la playa se estabilizará mediante el transporte litoral que predomina en la zona; y de esta manera cumplir con el objetivo trazado al inicio de la presente tesis.

Como se aprecia en la figura 5.12, la respuesta que presentará la playa será favorable por medio de la formación de salientes, lo que derivará en un aumento de la playa y en consecuencia se ganará terreno al mar con lo que se conseguirá estabilizar la línea de playa, por medio del transporte litoral que se presenta en la zona de estudio; esto gracias a que el oleaje incidente que libera su energía sobre las costas de la Bahía de la Ventosa, liberarán su energía rompiendo sobre los arrecifes artificiales (diques rebasables), los cuales provocarán que la columna de agua se vuelva inestable, y en consecuencia rompan antes de llegar a la playa, provocando un área de calma en el lado protegido, lo que ayudará para que el sedimento comience a depositarse cerca de la línea de playa.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones.

- El hombre a lo largo de la historia, ha tratado de controlar los fenómenos naturales; sin embargo, no es posible, razón por la cual se dio a la tarea de investigar su comportamiento y tratar de explicarlos, lo cual le ha brindado el conocimiento necesario para desarrollar estructuras, las cuales sirven para protegerse del embate de los fenómenos naturales; pero es evidente que en algunas ocasiones, estos sobrepasan las solicitaciones con las que fueron diseñadas, provocando daños a las mismas y en consecuencia a las zonas protegidas. En particular, el problema de erosión que sufren las playas, en algunos casos, son provocados por fenómenos naturales que involucran la pérdida de material granular presente en las playas, con lo que se consigue la reducción en la superficie de la costa; para ello, el hombre ha desarrollado estructuras y mecanismos que conllevan a la solución del problema, y en consecuencia estabilizar la playa para volver a ganar la superficie que se ha perdido y dar solución al problema que se presenta después de un evento extremal, o en algunos casos provocados por el oleaje incidente que se presenta en las costas de todo el mundo.

- Desde el punto de vista general, las costas de nuestro país en el litoral del Pacífico, están sujetas a condiciones climáticas particulares y a una orografía abrupta, que se prolonga en una plataforma continental de gran pendiente: ambas condiciones originan de manera general, que el oleaje y sus efectos asociados en las costas, sean de intensidad importante, y las costas de Oaxaca, no son la excepción.

- La Bahía de la Ventosa es una bahía de tipo divergente, limitada al oeste por una punta o saliente rocosa y de acantilados; al este ortográficamente se extiende hacia un valle y un delta, en la desembocadura del Río Tehuantepec. Hidrológicamente, es el punto saliente de dos cuencas de rápida respuesta (corrientes torrenciales).

- Los procesos de sedimentología son importantes para realizar proyectos sobre la rehabilitación de las playas con problemas de erosión, ya de no contar con los conocimientos correctos sobre el comportamiento de la playa, es probable que se cometan imprecisiones que derivarían en malos resultados al momento de proponer una solución al problema de erosión.

- Por otro lado debemos tener en cuenta que la morfología de las playas es particular de cada una de ellas, por esta razón es importante conocer el comportamiento histórico de la playa, para entender su comportamiento, y no considerar o tomar como válidos procesos que se presentan en otras playas.

- Con relación a las estructuras que se pretenden desarrollar en una zona dada, se deben evaluar los efectos positivos y los negativos que tendrían sobre el transporte de sedimentos para evitar problemas de erosión futuros, evaluar el impacto ambiental y social que provocaría en la zona.

- Conocer las leyes, reglamentos y permisos que tienen influencia sobre la Zona Federal Marítimo Terrestre, para la construcción de infraestructura, los escenarios probables que pudieran presentarse cuando por causa naturales o artificiales se perdiera o ganara terrenos al mar. Incluso en uno de los artículos del *Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar*, cita lo siguiente: *"todo proyecto para la restitución de la playa deberá tener autorización de las Instituciones correspondientes para realizar dicho proyecto"*. De esta manera si se desea dar una solución al problema de erosión en la zona que ha quedado invadida por el mar, debe darse conocimiento a las instituciones competentes en material de la limitación de la Zona Federal Marítimo Terrestre.

- Cada estructura de protección desempeña una función particular, por ello es conveniente conocer cada una de ellas, para considerar la estructura correcta al momento de tomar la decisión para mitigar el lo posible el problema de erosión, el cual debe ser tomado como algo serio, no es conveniente dar una solución sin sustento técnico, ni tampoco se tienen soluciones generales. En consecuencia la selección de la obra de protección se encuentra en función de los problemas específicos del sitio.

- La zona playera de la Bahía de la Ventosa, está sujeta a una dinámica litoral intensa, asociada a diversos factores que influyen en la bahía. Estos factores son el oleaje incidente (normal y extremal), el transporte litoral y la descarga de sedimentos de naturaleza fluvial del Río Tehuantepec y el Estero Boca del Río. Además existen otros factores físicos actuantes de menor influencia –por ejemplo: el transporte eólico de sedimentos-, o incluso ubicados en otro ámbito de comportamiento –por ejemplo: el comportamiento sísmico de la zona-. la interrelación de estos factores originan que el comportamiento de la playa sea complejo y con una dinámica litoral intensa.

- En los últimos años la franja playera, ha experimentado un proceso erosivo importante, debido a que en la zona de estudio, es precisamente donde la franja de playa se hace mas estrecha y en donde la tendencia del movimiento de sedimentos disminuye al ser en este lugar el cambio de dirección del transporte litoral.

- El proceso erosivo de la playa en la Bahía de la Ventosa, es consecuencia de la acción de los procesos físicos presentes en la zona –oleaje, mareas, vientos y corrientes, principalmente- que en principio, no han sufrido incrementos notorios al paso del tiempo; así como, en una posible disminución del aporte de sedimentos por parte del Río Tehuantepec, fuente de aportación de sedimentos más relevante en la bahía, que ha disminuido en sus escurrimientos y descargas al los últimos años.

- El análisis realizado para evaluar el balance de sedimentos, cuyos resultados se consideran como tendenciales, muestran que la bahía muestra un déficit en sedimentos debido a la posible disminución en la alimentación de sedimentos en la bahía, y al impacto del oleaje incidente en la zona, que libera su energía sobre la costa. De continuar esto, la tendencia erosiva continuará al transcurrir los años, o ante un evento climatológico extremo, como el que se presentó a finales de mayo y principios del 2002.

- El fenómeno de recesión observado en la playa de la bahía durante los días 29 de mayo al 4 de junio del 2002, es producto de un evento extremal de poca magnitud, durante el cual se combinaron acciones y efectos, como fueron: el incremento de carga hidráulica en los cuerpos estuarinos por lluvias de importancia, el debilitamiento gradual e importante de la playa, barras de esteros y río más robustas en relación con la playa e incidencia de trenes de oleaje lejano con altura mayor a los 2 m.

- Con base en la vulnerabilidad que presenta la línea de playa ante este tipo de fenómenos, es necesario implementar acciones para su protección, considerando de manera importante la conservación de la línea de playa actual, y su posible rehabilitación por medio de los procesos físicos actuantes en la zona; por lo anterior la solución de rompeolas sumergidos y paralelos a la costa, es la alternativa adecuada, debido a que este tipo de estructuración, actúa como un arrecife artificial, cumpliendo con la finalidad de disipar la energía del oleaje incidente, provocando su rotura, formando una zona de oleaje tipo *SEA*, al pasar la estructura.

- Este tipo de rompeolas, se emplean cuando se desea proteger o aumentar el ancho de la playa seca en virtud de su capacidad de interrumpir o disminuir el transporte de sedimentos hacia los depósitos de arena que se encuentran mar adentro, traduciéndose en la sedimentación de material, gracias a lo cual el perfil de la playa tiende a estabilizarse (por medio de la dinámica litoral existente); y eventualmente, desplazar la línea de costa mar a dentro. En este sentido, un proyecto de protección costera con rompeolas sumergidos y paralelos a la costa, puede constar de un solo dique largo, con el que se produciría el crecimiento de una saliente llamada *tómbolo*; o la construcción de varios segmentos, con los que se generarían playas *rítmicas*, o también llamadas *curps*; debido a su baja cota de coronación, han sido diseñados para permitir el rebase importante de la ola sobre la estructura. Los diques rebasables y sumergidos se diseñan para permitir la transmisión de una parte importante de la energía del oleaje.

- La conclusión anterior se respalda en la función de protección, en el impacto que tendrá esta obra en el comportamiento playero en función de su dinámica litoral, y en las condiciones económicas de menor costo, ya que este tipo de estructuras no requieren de alto costo de mantenimiento como los rompeolas convencionales, o espigones; además de que el impacto visual es nulo.

6.2 Recomendaciones.

Las actividades realizadas permiten realizar las siguientes recomendaciones:

- Dada la tendencia erosiva en la zona de la bahía, cualquier actividad u obra que se piense realizar en esta región, debe tomar en cuanta el comportamiento playero y los posibles efectos que tendrá dicha actividad u obra, en la dinámica litoral y los factores que intervienen de manera directa o indirecta.

- Durante la etapa constructiva del los rompeolas sumergidos, deberá tomarse en cuenta los posibles efectos de meteoros y condiciones extremas que pudieran presentarse. Por ello es importante recomendar que la mayor parte de la

construcción se realice en la época del año que presente el menor riesgo ante huracanes, correspondiendo a los meses de marzo a abril.

- De la misma manera, es importante recomendar que el procedimiento constructivo siga una programación lógica, respetando los frentes de avance para evitar perdidas importantes de material, complementado con el monitoreo periódico –diario- de las condiciones climatológicas.

- Al encontrarse localizada la playa en medio de dos barras y cuerpos de agua de importante dinámica litoral, se recomienda el monitoreo continuo de la zona, para que en caso de ser necesario, sean abiertas por medios mecánicos la o las barras.

ANEXO

CALCULO DE LA PROTECCION PLAYERA

PROFUNDIDAD A PIE DE ESTRUCTURA	PPE	-4
NPMS	NPMS	1.22
MAREJADA	MJ	1.28
PROFUNDIDAD DE ROMPIENTE	DB	6.5
ALTURA DE OLA EN ROMPIENTE	HB	5.07
AMPLITUD DE OLA	A	2.535
ALTURA DE CORONAMIENTO	C	9.035

CÁLCULO DE LA SEPRACIÓN Y LA LONGITUD ENTRE ROMPEOLAS

LONGITUD A PROTEGER	260.00	M
DISTANCIA DE LA LÍNEA DE PLAYA AL EJE DEL ROMPEOLAS (Y)	150.00	M
LONGITUD DE ROMPEOLAS (LS)	60.00	M
SEPARACIÓN ENTRE ROMPEOLAS (LG)	30.00	M
COTA DE DESPLANTE (DS)	- 4.00	M (N.B.M.I.)

Ls/Lg = 2.00
Y/Ds = 37.50

OBSERVANDO LA FIGURA V-3-22.
DEL DOCUMENTO DEL SHORE PROTECTION DE POPE AND DEAN 1986,
PÁGINA V-3-55, DA COMO RESULTADO:
UNA PROTECCIÓN QUE PROVOCARÁ SALIENTES EN LA PLAYA.

PERMEABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Is=EXP(1.72-0.41*(Ls/Y))

Is= 4.74 PRODUCIRÁ SALIENTES EN LA LÍNEA DE PLAYA

NUMERO DE ELEMENTOS	3
LONGITUD DE PROTECCIÓN EFECTIVA	240.00 M

ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL ROMPEOLAS SUMERGIDO.

FRANCOBORDO [F]	4.00	M
ALTURA DE OLA [Hc]	7.00	M
TALUD EXTERIOR	2.00	
TALUD DE MORROS	2.00	
TALUD INTERIOR	1.50	
DENSIDAD DE LA ESCOLLERA	2.65	T/M³
DENSIDAD DEL AGUA DE MAR	1.025	T/M³

TABLA RESUMEN DE PESOS

UBICACIÓN	DIAMETRO [M]	PESO [T]
TALUD EXTERIOR	1.61	11.12
CORONACION	1.40	5.21
TALUD INTERIOR	1.13	3.86
MORRO	1.43	7.82

CALCULAMOS

S_R = 2.585
R_R = 0.649

TALUD EXTERIOR

VALOR MÁXIMO DE LA FUNCIÓN DE ESTABILIDAD CORRESPONDIENTE A LA BANDA SUPERIOR DE CONFIANZA DEL 95%, DE UN DIQUE DE ESCOLLERA NO REBASABLE, DE TALUD 2:1, PARA INICIO DE AVERÍA. VER TABLA 6.1 PÁGINA 40 DE LAS COPIAS QUE FACILITO ROBERTO

Ψ = 0.0462 VALOR DE TABLAS

PESO DE LA ESCOLLERA PARA DIQUE NO REBASABLE

W_{NR} = 10.539 T

DIAMETRO DE LAS PIEZAS, PARA DIQUE NO REBASABLE

D_{NR} = 1.584 M

FRANCOBORDO ADIMENSIONAL DEL TALUD EXTERIOR DEL DIQUE REBASABLE

F_{DR} = 2.525

FRANCOBORDO DE NO REBASABLE DEL TALUD EXTERIOR, VER TABLA 7.1, PAGINAS 62 Y 63

F_{DNR} = 2.40 VALOR DE TABLAS

NÚMERO DE ESTABILIDAD DEL TALUD EXTERIOR, PARA INICIO DE AVERÍA, VER TABLA 7.1, PAGINAS 62 Y 63

A 1.831
B -0.245 VALORES DE TABLAS
C 0.0119

N_{STE} (F_{DNR}) = 1.31
N_{STE} (F_{DR}) = 1.29

APLICANDO LA RELACIÓN (22), PAGINA 64, EL DIÁMETRO NECESARIO PARA EL TALUD EXTERIOR SERÁ

D_{TE} = 1.61 M

Y EL PESO DE LAS PIESAS DEL TALUD EXTERIOR SERÁ

W_{TE} = 11.12 T

CORONACION

PUESTO QUE LA INFORMACIÓN EXISTENTE, TABLA 7.1, PAGINA 62 Y 63
ESTA REFERIDA A UN TALUD EXTERIOR CON TALUD 1.5, SE REQUIERE, PARA
UTILIZAR EL TALUD EXTERIOR COMO TALUD DE REFERENCIA, CALCULAR EL PESO
NECESARIO EN ESE SECTOR PARA EL TALUD 1.5/1, POR LO QUE REPITIENDO EL PROCESO ANTERIOR

Ψ = 0.0797 VALOR DE TABLA 6.1, PAGINA 40

PESO DE LA ESCOLLERA, PARA DIQUE NO REBASABLE

W_{NR} = 18.18 T

DIÁMETRO DE LAS PIEZAS, PARA DIQUE NO REBASABLE

D_{NR} 1.900 M

FRANCOBORDO ADIMENSIONAL DE TALUD EXTERIOR DEL DIQUE REBASABLE

F_{DR} = 0.526

FRANCOBORDO DE NO REBASABLE DEL TALUD EXTERIOR, VER TABLA 7.1, PAGINAS 62 Y 63

F_{DNR} = 2.40 VALOR DE TABLAS

NÚMERO DE ESTABILIDAD DEL TALUD EXTERIOR, PARA INICIO DE AVERÍA, VER TABLA 7.1, PAGINAS 62 Y 63

A	1.831	
B	-0.245	VALORES DE TABLAS
C	0.0119	

N_{STE} (F_{DNR}) = 1.31
N_{STE} (F_{DR}) = 1.71

APLICANDO LA RELACIÓN (22), PAGINA 64, EL DIÁMETRO NECESARIO PARA EL TALUD EXTERIOR 1.5/1 SERA

D_{TE} = 1.461 M

Y EL PESO DE LAS PIEZAS DEL TALUD EXTERIOR SERÁ

W_{TE} = 8.27 T

FRANCO BORDO ORIGINAL

F_{DTE} = 0.684

PARA EL FRANCO BORDO ORIGINAL, LOS NÚMEROS DE ESTABILIDAD DEL TALUD EXTERIOR
Y DE LA CORONACIÓN SON, SEGÚN LA TABLA 7.1, DE LAS PAGINAS 62 Y 63

	N_{STE} (F_{DTE})		N_{SC} (F_{DTE})	
A	1.831	A	1.652	
B	0.245	B	0.0182	VALORES DE TABLAS
C	0.0119	C	0.159	

N_{STE} (F_{DTE}) = 1.67
N_{SC} (F_{DTE}) = 1.74

LUEGO, APLICANDO LA RELACIÓN (23), EL DIAMETRO NECESARIO PARA LA CORONACIÓN SERA:

D_C = 1.40 M

POSTERIORMENTE, CALCULAMOS EL PESO DEL ELEMENTO

W_C = 5.21 T

TALUD INTERIOR

LOS NÚMERO DE ESTABILIDAD DEL TALUD EXTERIOR Y DEL INTERIOR (CON TALUD 1.5/1) SON, PARA EL FRANCOBORDO
FDTE = 0.684 , SEGÚN LA TABLA 7.1, DE LAS PAGINAS 62 Y 63

A	1.831	A	2.575	
B	-0.245	B	-0.54	VALORES DE TABLAS
C	0.0119	C	-0.115	

NSTE (FDTE) = 1.67
NSC (FDTE) = 2.15

LUEGO, APLICANDO LA RELACIÓN (54), EL DIAMETRO DEL TALUD SERA:

DTI =	1.13 M

POSTERIORMENTE, CALCULAMOS EL PESO DEL ELEMENTO

WTI =	3.86 T

MORRO

PESO NECESARIO PARA LAS PIEZAS DEL MORRO EN CASO DE NO REBASE 1.5 VECES EL DE LAS PIESAS DEL TALUD EXTERIOR SEGÚN LA TABLA 6.3, DE LA PAGINA 49

PESO DE LAS PIEZAS OBTENIDO PARA EL EXTERIOR CON TALUD 2/1 Y NO REBASE

WNR = 10.539 T

PESO Y DIAMETRO NECESARIO EN EL MORRO, CON TALUD 2/1 Y NO REBASE

FACTOR 1.5 VALOR OBTENIDO DE LA TABLA 6.3, PAGINA 49

WMNR = 15.81 T

DMNR = 1.814 M

FRANCOBORDO ADIMENSIONAL CORRESPONDIENTE A LAS PIEZAS DEL MORRO DEL DIQUE REBASABLE

FDMR = 0.55

FRANCOBORDO ADIMENSIONAL DE NO REBASE DEL TALUD INTERIOR DEL MORRO, TABLA 7.1, PAGINAS 62 Y 63

FDMNR = 2.4 VALOR OBTENIDO DE LA TABLA 7.1, PAGINAS 62 Y 63

A	1.681	
B	-0.474	VALORES DE TABLAS
C	0.105	

NSIM (FDMR) = 1.45
NSIM (FDMNR) = 1.15

LUEGO, APLICANDO LA RELACIÓN (25), EL DIAMETRO DE LAS PIEZAS DEL MORRO SERA:

DSIM =	1.43 M

POSTERIORMENTE, CALCULAMOS EL PESO DEL ELEMENTO

WIM =	7.82 T

BIBLIOGRAFIA: APUNTES DE CLASE DE HIDRÁULICA MARÍTIMA, SEMESTRE 2004-I, DR. RODOLFO SILVA CASARIN, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO, D.E.P.F.I., DICIEMBRE DE 2003

BIBLIOGRAFIA.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Evolución Playera al Pie de Estructuras de Protección., Yáñez, Miguel Angel, 1985, México D.F.
- Propuesta para Establecer Límites de Seguridad para la Construcción de Desarrollos Costeros, Gallegos, J. Javier, 2001, México D.F.
- El Proceso de Diseño de la Longitud Óptima de Obras de Protección Aplicado a Rompeolas y Escolleras, Chávez, R. Carlos, 2002, México D.F.
- Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1984, Vicksburg, MS.
- Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- GENESIS Report 1 Thecnical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1989, Vicksburg, MS.
- GENESIS Report 1 Workbook & System User´s Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1991, Vicksburg, MS.
- Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidráulica Marítima, Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1980, México.
- Manual on the Use of Rock in Hidraulic Engineering, Center of the Civil Engineering Research & Codes, U.S.A.
- Ingeniería de Costas, Frías, Armando, 1988, Editorial Limusa, México.
- Problems of Beach Erosion & Some Solutions, R.T., Hattersley, D.N., Foster, 1968, Australian Civil Engineering, Vol. 9.

- Marine Structures Engineering Specialized Aplications, Gregory, P., et. al., Chapman & Hall an International Thompson Publishing Company, U.S.A.
- Estudio de Estabilidad Playera y Proyecto de las Obras de Protección para la Planta de Uso Integral del Agua en la Bahía de la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca, Consultoría Yáñez-Taylor S.A. de C.V., 2002, México, D.F.

REFERENCIAS ELECTRONICAS

- http://dante.esmartdesign.com/thumbs/
- http://limpet.wes.army.mil/sec227/Structures/
- http://chl.wes.army.mil/research/estructures/
- http://www.semarnat.gob.mx/
- http://www.csc.noaa.gov/
- http://dantegonzalez.tripod.com.