



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

***DISEÑO DE UNA OBRA DE PROTECCIÓN MARGINAL EN LA
DESEMBOCADURA DEL RÍO PAPALOAPAN***

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA

PRESENTA:

ING. EDUARDO HUMBERTO HERNÁNDEZ VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESINA: ING. JAVIER GUTIÉRREZ REYNOSO

MÉXICO, D.F.

MARZO 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

Recibí notificación para formar parte del jurado para el examen del alumno: EDUARDO HUMBERTO HERNÁNDEZ VÁZQUEZ.

ESPECIALIZACIÓN EN HIDRÁULICA PLAN 11-3157.

	JURADO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE:	ING. ALFONSO MARÍA MORALES GARCÍA		20/07/2015
PRIMER VOCAL:	ING. JAVIER GUTIÉRREZ REYNOSO		22/07/2015
SEGUNDO VOCAL:	DR. AMADO ABEL JIMÉNEZ CASTAÑEDA		03/jul/2015
TERCER VOCAL:	DR. BERNARDO ECHAVARRÍA SOTO		22/jul/2015
SECRETARIO:	DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN		29/07/2015

BJS



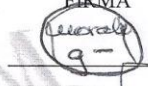

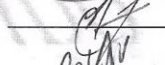
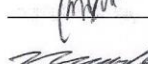

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

Recibí copia de Trabajo desarrollado por el alumno: EDUARDO HUMBERTO HERNÁNDEZ VÁZQUEZ.

Para presentar examen de grado de ESPECIALIZACIÓN EN HIDRÁULICA.

Plan: 11-3157.

	JURADO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE:	ING. ALFONSO MARÍA MORALES GARCÍA		20/07/2015
PRIMER VOCAL:	ING. JAVIER GUTIÉRREZ REYNOSO		22/07/2015
SEGUNDO VOCAL	DR. AMADO ABEL JIMÉNEZ CASTAÑEDA		03/julio/2015
TERCER VOCAL	DR. BERNARDO ECHAVARRÍA SOTO		22/jul/2015
SECRETARIO	DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN		22/jul/2015

BJS

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a mi casa de estudios, la UNAM y a la Facultad de Ingeniería que me permitieron desarrollarme como profesional y como persona.

A mi mamá, Victoria, y mi hermano, Héctor, que siempre creyeron en mí y que siempre me han apoyado para poder alcanzar mis metas, que a pesar de que existieron momentos que parecían insuperables han hecho lo imposible por ofrecerme lo mejor de ustedes. Mi eterno agradecimiento por todo lo que han realizado por mí.

A mi director de tesina, el Ing. Javier Gutiérrez Reynoso, primero por haberme despertado el interés por el campo de la Ingeniería marítima y segundo por dedicarme parte de su tiempo para desarrollar este tema. Un agradecimiento muy especial al Dr. Edgar Mendoza que sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Al M. en I. Óscar Vega Roldán por haberme brindado la oportunidad de colaborar en CIEPS Consultores, donde además de seguir creciendo como profesional he tenido la oportunidad de conocer excelentes ingenieros, compañeros y amigos.

A mi segunda familia, porque eso son, mis queridos amigos: Abril, Adrián Daniel, Emmanuel, Gabriela, Laura, Marcela y Mariana; con quienes he vivido muy gratas e incomparables experiencias desde la preparatoria y con los que realmente he aprendido el verdadero significado de la amistad.

A mis colegas de la facultad: Alejandra, Jhony, Adrián y Zair que hicieron de esta etapa una gran experiencia y por haberme soportado en todo momento.

A mis amigos de la brigada: Héctor, Sandra, Angélica, Ariadna y Vicko; quienes compartieron conmigo una linda etapa de mi vida.

A la Fundación Guillermo Linage Olguín que me apoyó en varios aspectos durante gran parte de mi vida estudiantil y que siempre confiaron en mí.

CONTENIDO

Objetivo	8
1. Introducción	8
1.1. Erosión de las costas.....	9
1.2. Procesos marítimos-costeros.....	10
1.2.1. Procesos de oleaje.....	11
1.2.2. Transporte de sedimentos	15
1.2.3. Mareas.....	17
2. Caracterización de procesos físicos	18
2.1. Oleaje.....	18
2.2. Registro de huracanes	24
2.3. Condiciones de marea astronómica en la desembocadura.....	27
2.4. Cálculo de condiciones de diseño.....	28
3. Antecedentes	29
3.1. Antecedentes de protección costera	30
3.2. Ubicación y descripción de la obra de protección en la desembocadura	36
4. Diseño de la obra de protección marginal	37
4.1. Diseño mecánico	37
4.2. Diseño geométrico	40
5. Diseño de la playa	48
5.1. Perfil de la playa restaurada	49
5.2. Volumen de relleno.....	55
6. Conclusiones	57
7. Referencias	58

FIGURAS

Figura 1.1 Localización del sitio	8
Figura 1.2 Perfil de costa (mayo 2005).....	10
Figura 1.3 Perfil de costa (enero 2010)	10
Figura 1.4 Parámetros de las olas	11
Figura 1.5 Zonas del mar según su profundidad.....	12
Figura 1.6 Manómetro tipo Bourdon	14
Figura 1.7 Boya	14
Figura 1.8 Ultrasonido	15
Figura 1.9 Desembocadura de un río donde se muestra el aporte de sedimentos	15
Figura 1.10 Movimiento de las partículas de sedimentos en la línea de costa	16
Figura 1.11 Escurrimientos medios mensuales y volumen medio mensual de azolve	16
Figura 1.12 Esquema de niveles de marea	17
Figura 2.1 Refracción de oleaje.....	18
Figura 2.2 Difracción de oleaje.....	19
Figura 2.3 Reflexión de oleaje	19
Figura 2.4 Comportamiento del oleaje en el año de 1955	20
Figura 2.5 Puntos máximos en el año de 1955.....	20
Figura 2.6 Papel probabilístico de Gumbel.....	23
Figura 2.7 Ejemplo de la trayectoria de un huracán (Diana 1990).....	25
Figura 3.1 Sistema lagunar de Alvarado.....	29
Figura 3.2 Relleno de playa por bombeo de arena	32
Figura 3.3 Función de un espigón, visto en planta	32
Figura 3.4 Comportamiento típico de un grupo de espigones	33
Figura 3.5 Formación de tómbolos en rompeolas	34
Figura 3.6 Embarcación para la colocación de los materiales	35
Figura 3.7 Esquema de la sección de la obra de protección.....	36
Figura 4.1 Niveles de avería	38
Figura 4.2 Ilustración del ascenso y descenso máximos.....	42
Figura 4.2 Coeficientes de porosidad.....	43
Figura 4.3 Valores de "a" para una capa en la coraza.....	46

Figura 4.4 Sección de la obra de protección marginal.....	47
Figura 5.1 Zonificación y partes del perfil de playa.....	48
Figura 5.2 Representación de la curva espiral logarítmica	50
Figura 5.3 Esquema de representación de la curva descrita en los ajuste parabólicos.....	51
Figura 5.4 Correlación entre coeficientes y ángulo de incidencia del oleaje	51
Figura 5.5 Dirección y ubicación de la obra de protección	52
Figura 5.6 Valor del ángulo β	52
Figura 5.7 Playa restaurada con una obra de protección de 400 m	53
Figura 5.8 Playa restaurada con una obra de protección de 500 m	54
Figura 5.9 Playa restaurada con una obra de protección de 600 m	54
Figura 5.10 Batimetría y secciones de la zona de protección.....	55

TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros de las olas dependiendo la zona.....	13
Tabla 2.1 Puntos máximos de las altura de ola	20
Tabla 2.2 Hoja de cálculo para los datos registrados	22
Tabla 2.3 Alturas de ola asociadas a un Periodo de retorno	23
Tabla 2.4 Clasificación Saffir-Simpson	24
Tabla 2.5 Registro de eventos ciclónicos	25
Tabla 2.6 Marea de tormenta de cada evento ciclónico.....	27
Tabla 2.7 Planos de marea astronómica en Alvarado.....	28
Tabla 3.1 Rango de taludes para distintos materiales.....	36
Tabla 4.1 Valores máximos de Ψ para bloques paralelepípedicos.....	40
Tabla 4.2 Factores de incremento del peso en las piezas del morro.....	47
Tabla 5.1 Cálculo del volumen de relleno	56

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es proponer el diseño de una obra que tenga la capacidad de estabilizar la línea de la playa que se ha ido perdiendo en la margen izquierda de la desembocadura del río Papaloapan en el municipio de Alvarado, Veracruz. El diseño de dicha obra es un ejemplo determinista de un proceso que se debe hacer probabilista. Para realizar un diseño adecuado se debe estudiar, analizar y procesar toda la información de las variables que estén involucradas en el problema. La obra debe cumplir con los preceptos ingenieriles: funcionalidad, económica, seguridad y estabilidad.



Figura 1.1 Localización del sitio

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la actividad humana ha optado por establecerse en las costas, debido a que esos sitios son convenientes por su clima y por los insumos que otorga la naturaleza para la supervivencia y bienestar, pero el asentamiento en estos lugares ha traído desastres provocados por los embates de la misma naturaleza, por ello la protección costera se ha vuelto indispensable para el desarrollo de las poblaciones. Los objetivos principales de estas obras de protección son:

- ◆ Prevenir la erosión de la línea de costa
- ◆ Disminuir los efectos de las inundaciones causadas por sobreelevaciones del nivel del mar
- ◆ Proteger contra el oleaje en puertos y/o muelles, generando zonas de calmas

Hay países que por su ubicación geográfica dependen de la protección costera para controlar la pérdida de línea de costa (Japón) o inclusive por su misma supervivencia (Holanda). En México se emplean las obras de protección costera para solucionar problemas específicos o puntuales donde no se considera la problemática real, muchas veces no se contempla la interacción que hay entre el medio costero y el medio terrestre.

1.1. EROSIÓN DE LAS COSTAS

La erosión de costas es la pérdida de las partículas de sedimento por acción del olaje y viento. Es un proceso natural que se debe a diversas causas entre las que se encuentran eventos naturales como huracanes, mareas, corrientes, etc. También puede deberse a causas inducidas por el hombre, como son la construcción de edificios o la extracción de líquidos del subsuelo la cual produce un retroceso en la línea de costa. El calentamiento global es otra causa de la pérdida de playas ya que produce el deshielo de los glaciares y aumento en el nivel de agua y por consiguiente en la marea, la cual arrastra los sedimentos de la playa.

La costa se alimenta de sedimento que en gran parte proviene de los cauces fluviales, el aumento o disminución de su caudal es esencial para la capacidad que el cauce tenga de transportar sedimento. Una disminución de las precipitaciones reduciría el aporte, pero si éstas se producen de forma repentina que provoquen avenidas, podrían compensarse. En la actualidad las cuencas de los ríos, en su gran mayoría, están reguladas; y debido a estas regulaciones las costas sufren por el aporte de sedimentos.

Como resultado de la erosión, en algún otro sitio, cercano o lejano, tendrá lugar el depósito de sedimentos. Esto es, cuando en un sitio hay erosión en otro hay depósito y viceversa, como fue el caso del huracán Wilma en las costas de Quintana Roo que provocó la pérdida de playas en Cancún, mientras que rellenó las playas de Akumal y Punta Allen.

Otra causa de modificación de los litorales se obtiene por la construcción de escolleras o espigones, conformados por estructuras de diferentes materiales, como concreto, roca o contenedores de arena, los cuales representan obstáculos al transporte de sedimentos. Las corrientes pueden cambiar su dirección, no obstante, siempre hay la tendencia de contar con un transporte litoral preferente, de tal forma que una de las escolleras va retener sedimentos, acumulándolos aguas arriba, los cuales no pasarán al otro lado, donde se producirá erosión, llamada seno de escollera.

La velocidad y gravedad de la pérdida de playas depende de las causas que la originen, así como la erosión por causas tectónicas puede ser muy lenta y gradual; la pérdida de playas por construcciones en la línea de costa en cuestión de años o meses. En el caso de huracanes, a consecuencia del calentamiento global se ha observado que estos fenómenos han cambiado hasta cierta medida su trayectoria e intensidad, lo que hace a las playas más vulnerables a sus efectos.

Las consecuencias de la erosión de playas son diversas, desde pérdidas ecológicas, económicas, sociales y políticas hasta incluso la pérdida de vidas humanas. Entre las pérdidas ecológicas, la pérdida de playas reduce la zona de anidación de tortugas marinas, así como la inundación o deslave de los nidos puestos en zonas vulnerables. Entre las pérdidas económicas se encuentran la pérdida de infraestructuras, como hoteles y restaurantes ubicados cerca de la costa. Las pérdidas sociales se relacionan con la disminución de sitios de recreación.

En el caso de estudio, se ha presentado una pérdida en la línea de costa en la margen izquierda en la desembocadura del río Papaloapan en los últimos años. En la Figura 1.2 se muestra el perfil de la línea de costa en el mes de mayo del 2005 y en la Figura 1.3 se muestra el perfil de la línea de costa en enero del 2010. Se observa claramente que hay un retroceso de la costa por lo que es necesario la construcción de una obra que cumpla con el objetivo de este trabajo.



Figura 1.2 Perfil de costa (mayo 2005)



Figura 1.3 Perfil de costa (enero 2010)

1.2. PROCESOS MARÍTIMOS-COSTEROS

Las costas, al igual que los ríos, no son estáticas, tampoco las comunidades que están establecidas como resultado de fuerzas naturales y la creciente actividad humana. Los cambios que se presentan en las zonas costeras son el resultado de varios procesos que pueden ocurrir de forma individual, pero que en la mayoría de las ocasiones se presentan de manera simultánea, por lo que el ambiente costero es un escenario que involucra gran cantidad de variables que condicionan el desarrollo de los mismos.

1.2.1. Procesos de oleaje

Las olas son ondulaciones estacionarias en el agua, generadas casi siempre por el viento; el oleaje llega a romper al alcanzar aguas someras. Este proceso es responsable directo de gran parte de la configuración costera.

- Teoría lineal de ondas

Las olas marinas son descritas de la misma manera que cualquier fenómeno ondulatorio. La manera más simple de visualizar las ondas es mediante el concepto de oscilación armónica. La onda puede ser descrita por la siguiente expresión:

$$X = A \sin(\Omega t + \theta)$$

Donde:

X: Posición de la onda

A: Amplitud

t: Desplazamiento horizontal

Ω : Frecuencia [rad/s]

θ : Fase [rad]

Los parámetros más importantes que identifican el oleaje son:

- Periodo de la ola (T): Tiempo necesario para que dos crestas o valles consecutivos pasen por un mismo punto.
- Altura de la ola (H): Distancia vertical entre la cresta y valle de una ola. Es dos veces la amplitud.
- Longitud de la ola (L): Distancia horizontal medida entre dos crestas o valles sucesivos.
- Celeridad de la ola (C): Velocidad con la que se desplaza la ola. $C = L/T$.
- Relación de esbeltez (γ): Parámetro usado para definir las características del perfil de la ola.
- Frecuencia angular (ω): Representa el número de olas que pasan por un punto específico por unidad de tiempo, generalmente segundos. $\omega = 2\pi/T$
- Número de onda (K): $K = 2\pi/L$
- Profundidad (d): Es la distancia vertical entre el nivel medio del mar y el fondo marino.

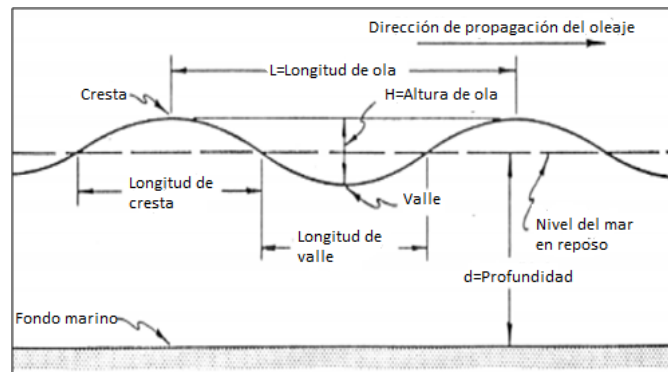


Figura 1.4 Parámetros de las olas

Las teorías que describen el oleaje son aproximaciones a la realidad. Pueden describir bien aquellos fenómenos cuyas condiciones satisfagan las asunciones hechas en su derivación. Al adoptar una teoría, ha de asegurarse de que el fenómeno de interés esté descrito razonablemente bien por la teoría adoptada.

La teoría de oleaje más simple es la Teoría Lineal de Ondas (Fuente: Coastal Engineering Manual). Aunque con limitaciones a su aplicabilidad, la teoría lineal puede ser muy útil si las siguientes hipótesis se cumplen:

- El agua es homogénea e incompresible.
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser asimismo despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- No existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- El fondo de mar constituye un límite horizontal, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.
- Las ondas son planas (de dos dimensiones).

La Teoría lineal de Ondas es de las más empleadas ya que hace menos complejo el estudio. Para su estudio se propone las siguientes 3 zonas:

- ◆ Aguas profundas ($d > \frac{L}{2}$)
- ◆ Aguas intermedias ($\frac{L}{20} < d < \frac{L}{2}$)
- ◆ Aguas someras ($d < \frac{L}{20}$)

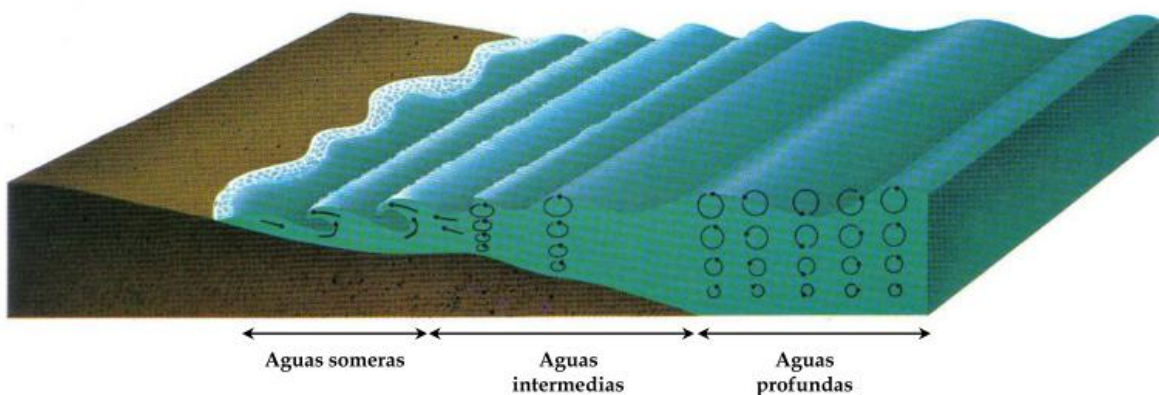


Figura 1.5 Zonas del mar según su profundidad

Para efectos de este trabajo no se explicará todo el desarrollo y fundamento en el que se sustenta la Teoría Lineal de Ondas. A continuación se muestran los parámetros de las olas en cada una de las 3 zonas:

Tabla 1.1 Parámetros de las olas dependiendo la zona

	Aguas someras	Aguas intermedias	Aguas profundas
Celeridad (C)	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C = C_o = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
Longitud (L)	$L = CT = T\sqrt{gd}$	$L = CT = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L = L_o = C_o T = \frac{gT^2}{2\pi}$

- Clasificación de oleaje

El oleaje puede clasificarse según la energía de generación y según su frecuencia.

a) Según la energía de generación

- ♦ **De viento:** Están sometidas a la influencia directa del viento que las produce, pudiendo llegar a anularse o reforzarse.
- ♦ **De fondo:** Olas que no están bajo la influencia directa del viento, a causa del cese de éste, que pueden desplazarse decenas, o incluso centenas de kilómetros desde su zona de origen y según la dirección del viento sin ser mantenidas por éste.
- ♦ **De temporal:** Mantenido por el viento de una zona tormentosa. Puede llegar a ser un oleaje muy destructivo, con longitud de onda y periodos largos, de gran altura.
- ♦ **Tsunamis:** Oleaje asociado a la actividad submarina (tectónica, volcánica, deslizamiento) que desplaza masas de agua a gran profundidad y origina olas en su superficie con amplitud pequeña y gran longitud de onda; puede transportarse a largas distancias.

b) Según su frecuencia

- ♦ **Olas capilares:** Se debe al roce entre láminas de aire y agua en la misma fuente del viento: están controladas por la tensión superficial del líquido.
- ♦ **Olas de gravedad:** Olas generadas por la transferencia de energía desde viento al agua y controladas por la masa movilizada.
- ♦ **Olas infragravitatorias:** Formadas mediante la interacción entre olas. Tiene amplitud baja y periodos largos.
- ♦ **Olas de periodo largo:** Producidas por movimientos periódicos de baja frecuencia (mareas) y eventos sin periodicidad (tsunamis y tormentas).

- Medición de oleaje

El oleaje es un fenómeno estocástico y por lo tanto su medida requiere muestrear de tiempo suficientemente largo para "capturar" o representar un estado de mar. Como regla general es conveniente registrar 100 ciclos de olas.

El oleaje puede ser medido en serie de olas. La frecuencia del oleaje puede ser estimada mediante la medición del paso del tiempo de una ola en un punto estacionario. La longitud de onda en campo es difícil de determinar, pero esta puede ser determinada mediante fotografías aéreas. La altura de ola frecuentemente es medida mediante la instalación de algunos instrumentos.

Algunos instrumentos que se emplean para medir el oleaje y así poder determinar algunas de las características de ellas, son los siguientes:

- ♦ **Manómetro:** Se emplean manómetros mecánicos, de tipo Bourdon o electrónicos instalados sobre el fondo marino, incluso a varios centenares de metros capaces de medir la frecuencia y las dimensiones de una ola que pasa por el instrumento.



Figura 1.6 Manómetro tipo Bourdon

- ♦ **Boyas:** Estos artefactos especializados miden diferentes niveles de olas para poder informar sobre los mismos a los centros de consulta y a los navegantes que se encuentren en una posición relativamente cercanas. Entre los valores que miden estas boyas de oleaje se pueden mencionar la presión de agua, la velocidad del viento.



Figura 1.7 Boya

- ♦ **Ultrasonidos:** Este aparato cuenta con un registrador que recibe ultrasonidos emitidos hacia arriba y reflejados por la superficie del mar, midiendo la variación del nivel del mar al paso de una ola.

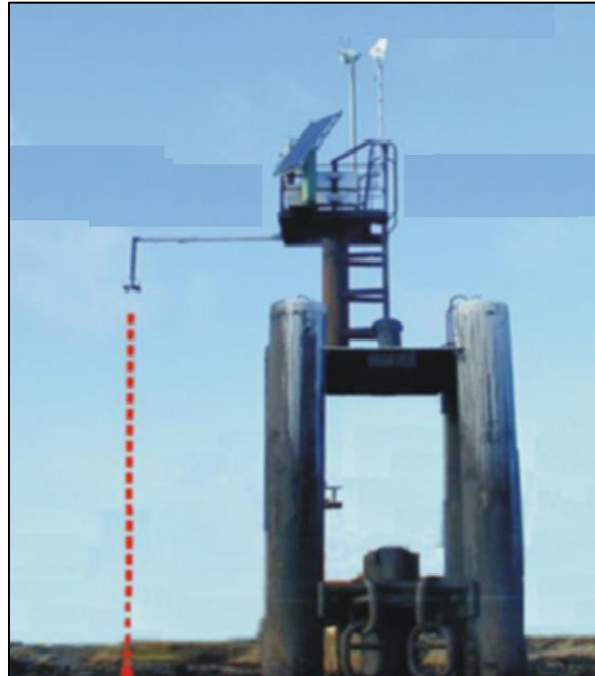


Figura 1.8 Ultrasonido

1.2.2. Transporte de sedimentos

El sedimento es un material sólido que es derivado de acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrósfera y en la biosfera. Algunas de las acciones que generan la producción de sedimentos son: circulación de aguas superficiales o subterráneas, acciones de agentes químicos, acciones de organismos vivos, viento, variaciones de temperatura, precipitación, entre otros.



Figura 1.9 Desembocadura de un río donde se muestra el aporte de sedimentos

Por su procedencia los materiales pueden clasificarse como:

- ◆ **Parautóctonos:** Aportados por la erosión de alcantarillados y terrazas. Suelen desprenderse en tormentas cuando las olas atacan los acantilados y bermas de playa. La dispersión de estos sedimentos en la costa ocurre en los periodos de calma.
- ◆ **Autóctonos:** Desarrollados por la actividad biológica.
- ◆ **Alóctonos:** Aportados por corrientes fluviales. Generalmente han pasado por un proceso de selección antes de ser incorporados al ambiente costero.

Los sedimentos de las playas son movilizados principalmente por las rompientes de las olas y por las corrientes que las propias olas generan, tanto a lo largo de la costa como en forma perpendicular a la misma. Estas corrientes, dentro de la zona de rompientes, son usualmente más importantes que las corrientes marinas y, consecuentemente, tienen mayor capacidad para transportar sedimentos.

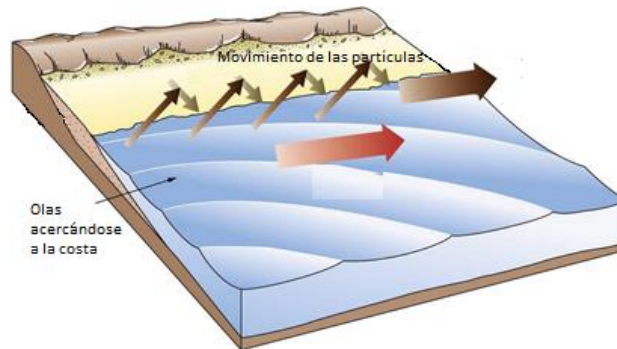


Figura 1.10 Movimiento de las partículas de sedimentos en la línea de costa

Un estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Estudio: "Transporte de sedimentos en la cuenca del Río Papaloapan") muestra una tendencia general que a medida que el río Papaloapan se acerca a la desembocadura al mar, los tamaños de los sedimentos disminuyen desde gravas medias de 9 [mm] hasta el tamaño correspondiente a una arena limosa de 2 [mm] en promedio. También se observó que el sedimento más grueso se localiza en el centro del cauce y en la margen izquierda mientras que el material más fino se ubica en la margen derecha del cauce.

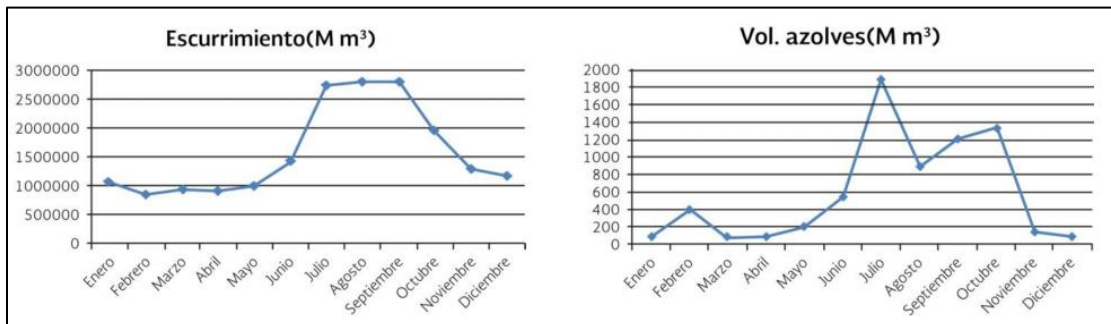


Figura 1.11 Escurrimientos medios mensuales y volumen medio mensual de azolve

En la Figura 1.11 se observan los resultados que se obtuvieron a partir de los registros hidrométricos de los afluentes que llegan al río Papaloapan y se ve claramente que la cantidad de los azolves está ligado a la cantidad de agua que circula por el río. También el estudio muestra una tendencia general a

un decremento en el transporte de sedimentos, esto es consecuencia de la construcción de las presas, en donde se depositan una gran cantidad de sedimentos.

1.2.3. Mareas

La marea es el movimiento periódico de ascenso y descenso de las aguas del mar, producidas por las perturbaciones gravitatorias del Sol y la Luna en la Tierra. Su frecuencia es de dos veces por día aproximadamente, y su amplitud, que también varía de día a día, depende la fase de la Luna, siendo máxima con "Luna llena" o "Luna nueva". En estos casos, se dice que hay mareas vivas. Cuando la marea sube y llega a su máximo nivel se dice que ha alcanzado la Pleamar, cuando a continuación desciende y llega al mínimo se llama Bajamar. La amplitud de marea es la diferencia entre los niveles de pleamar y bajamar.

Los planos de mareas se definen de la manera siguiente:

- ◆ **Pleamar máxima registrada:** Nivel más alto registrado, debido a las fuerzas de marea periódica o factores meteorológicos.
- ◆ **Nivel de pleamar media superior:** Promedio de las dos pleamares diarias más altas durante el periodo considerado de la medición (mareas semidiurnas y mixtas).
- ◆ **Nivel medio del mar:** Promedio de las alturas durante el periodo de medición.
- ◆ **Nivel de media marea:** Plano equidistante entre la pleamar media y la bajamar media, se obtiene promediando estos dos valores.
- ◆ **Nivel media de bajamar media inferior:** Promedio de las más bajas de las dos bajamares diarias, durante el periodo considerado de medición (mareas semidiurnas y mixtas).
- ◆ **Bajamar mínima registrada:** Nivel más bajo registrado debido a la fuerza de marea periódica o factores meteorológicos de la estación.

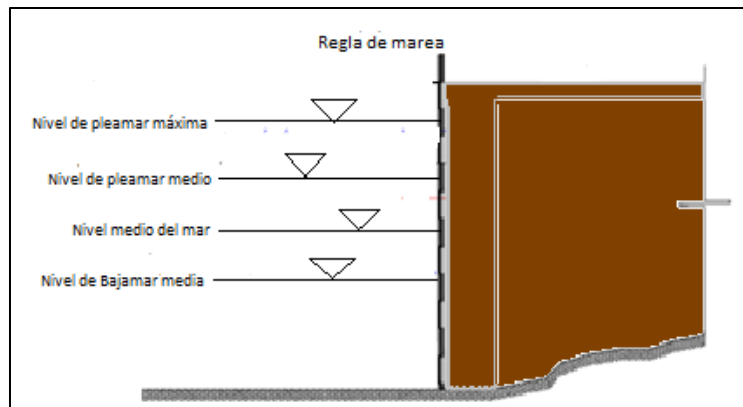


Figura 1.12 Esquema de niveles de marea

Las mareas diurnas son aquellas que solamente presentan una pleamar y una bajamar. Las mareas semidiurnas son las que tienen 2 pleamares y 2 bajamares. A la combinación de estas dos tipos de mareas se les llama mareas mixtas.

2. CARACTERIZACIÓN DE PROCESOS FÍSICOS

El diseño de cualquier obra marítima, así como su proceso constructivo, requiere de la correcta caracterización de las acciones hidrodinámicas actuantes a menudo expresadas en términos de altura de ola, periodo y dirección. Por ello, el resultado final del diseño y ejecución depende en gran medida de la precisión de las estimaciones.

De forma general, la caracterización de oleaje es entendida como una descripción a largo término, en el que se incluye por un lado el régimen medio del oleaje y el régimen extremal.

2.1. OLAJE

Uno de los parámetros fundamentales para el diseño de cualquier tipo de obra marítima, corresponde al oleaje y sus características, así como sus variaciones conforme a las condiciones meteorológicas, porque los valores asociados al mismo son de suma importancia, por lo que es importante conocer las condiciones normales de oleaje, pero también sus condiciones extraordinarias cuando se presentan tormentas o ciclones.

Como fue mencionado en el capítulo 1, el oleaje tiene un comportamiento distinto dependiendo a la profundidad en el que se presente. Uno de los grandes problemas es el estudio de los efectos que condicionan la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras.

El oleaje sufre principalmente de tres fenómenos cuando se acerca a la playa: refracción, difracción y reflexión.

- ♦ **Refracción:** Es el fenómeno que el oleaje presenta cuando se acerca a la línea de costa ya que empieza a sentir el fondo en aguas someras lo que provoca que la longitud de onda disminuya. También el oleaje sufre un cambio en la dirección de propagación, las crestas tienden a ser paralelas a los contornos del fondo.

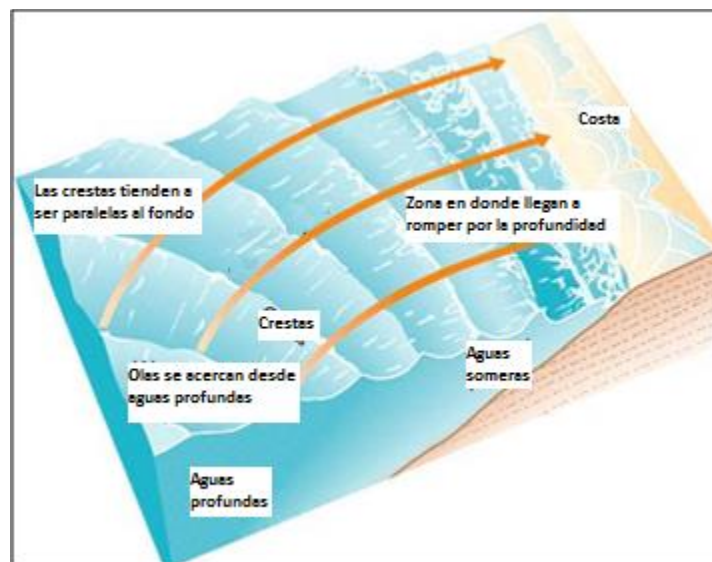


Figura 2.1 Refracción de oleaje

- ♦ **Difracción:** Es el proceso de transferencia lateral de energía sobre las crestas de oleaje, esto ocurre cuando la altura de ola en un punto es superior a los valores adyacentes dentro de la misma cresta. Normalmente ocurre cuando el oleaje se encuentra con un obstáculo (isla, rompeolas, etc.) y se genera una zona de sombra protegida de la acción del oleaje.

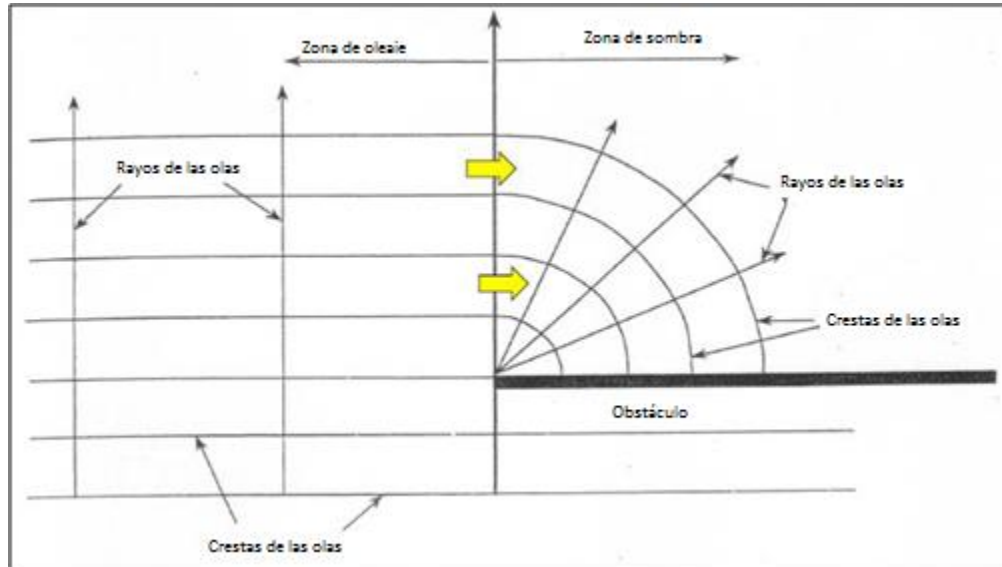


Figura 2.2 Difracción de oleaje

- ♦ **Reflexión:** Es el cambio brusco en la dirección de propagación debido a la presencia de un obstáculo, ya sean naturales o artificiales, durante la propagación. También se puede deber a la presencia de pendientes elevadas o cambios bruscos en la profundidad del fondo.

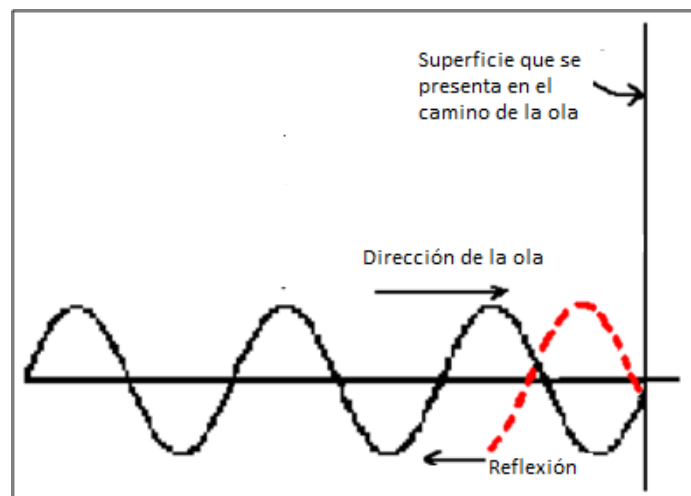


Figura 2.3 Reflexión de oleaje

Para caracterizar este proceso se contó con la información que proporciona el sistema de información del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IINGEN). Se emplearon los datos de la estación más cercana al sitio. Estos registros datan desde el año de 1948 hasta el año de 2007, pero a pesar de que no contempla los últimos 8 años de registro nos da una idea muy importante del comportamiento de las olas, además que serán sujetos a funciones probabilísticas para poder

determinar las solicitudes de diseño. La base de datos proporciona la altura de ola significativa, periodo significativo y velocidad del viento a lapsos de una hora.

Para el análisis del oleaje se graficó el comportamiento que tuvieron las alturas de ola a lo largo de cada año de toda la muestra, esto con el fin de presentar la información histórica de una forma más clara.

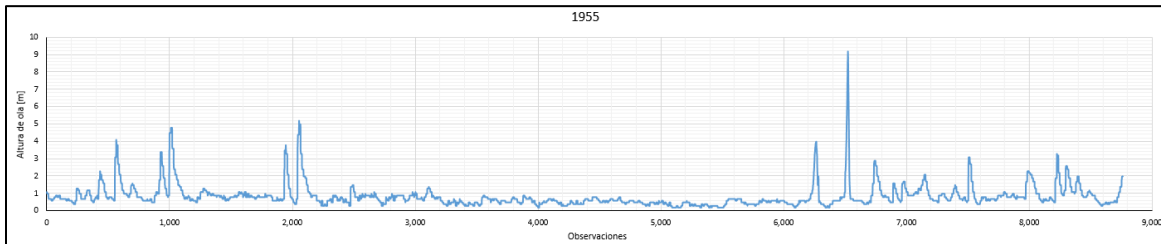


Figura 2.4 Comportamiento del oleaje en el año de 1955

Se analizó el comportamiento de cada uno de los años de observación y se decidió que para su análisis probabilístico se debían tomar los puntos máximos mayores a 2 [m]. En la Figura 2.5 se pueden ver marcados los puntos máximos del año de 1955 y en la Tabla 2.1 se muestran los puntos máximos que se presentaron en cada año.

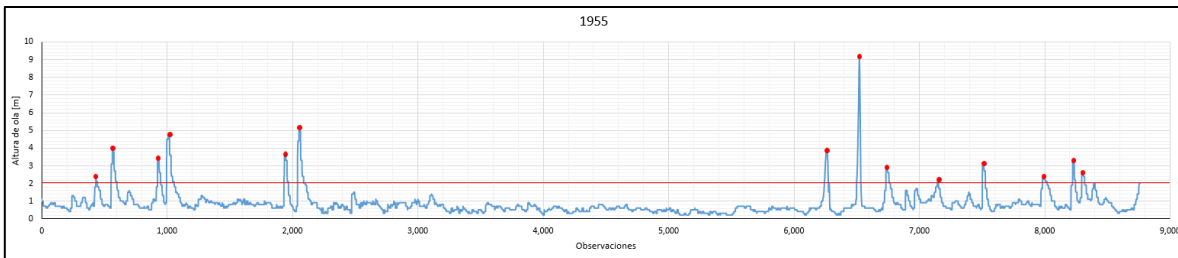


Figura 2.5 Puntos máximos en el año de 1955

Tabla 2.1 Puntos máximos de las altura de ola

Año	Puntos máximos	Año	Puntos máximos	Año	Puntos máximos	Año	Puntos máximos
1948	18	1963	16	1978	13	1993	8
1949	9	1964	17	1979	19	1994	12
1950	11	1965	14	1980	18	1995	12
1951	16	1966	15	1981	13	1996	14
1952	12	1967	16	1982	12	1997	11
1953	13	1968	13	1983	9	1998	4
1954	17	1969	13	1984	13	1999	12
1955	14	1970	14	1985	14	2000	8
1956	9	1971	12	1986	12	2001	9
1957	11	1972	14	1987	18	2002	15
1958	10	1973	13	1988	18	2003	16
1959	17	1974	12	1989	21	2004	11
1960	14	1975	12	1990	13	2005	9
1961	16	1976	17	1991	11	2006	12
1962	12	1977	13	1992	8	2007	13

El total de puntos máximos superiores a los 2 [m] son de 789. Para determinar un valor de oleaje asociado a un periodo de retorno existen diversas técnicas basadas en funciones de probabilidad

acumulada, para este caso se empleará el Método de Gumbel que se ajusta al comportamiento estadístico de eventos extremos. El cálculo se basa con la siguiente metodología:

1. Ordenar los datos de altura de ola de menor a mayor magnitud (n).
2. Calcular la frecuencia relativa acumulada de cada registro con la fórmula de Hazen (Y).

$$Y = \frac{n-0.5}{N} \quad \text{ec(2.1)}$$

Donde: Y: es la frecuencia relativa acumulada
 n: es el número de orden
 N: es el total de registros (N=789)

3. Calcular la variable reducida (η_k).

$$\eta_k = -\ln(-\ln Y) \quad \text{ec(2.2)}$$

Donde: η_k : es la variable reducida
 Y: es la frecuencia relativa acumulada

4. Calcular los parámetros "a" y "b" a través de un ajuste de mínimos cuadrados.

$$a = \frac{N(\sum_{k=1}^N X_k \eta_k) - (\sum_{k=1}^N X_k)(\sum_{k=1}^N \eta_k)}{N(\sum_{k=1}^N X_k^2) - (\sum_{k=1}^N X_k)^2} \quad \text{ec(2.3)}$$

$$b = \frac{-a \sum_{k=1}^N X_k + \sum_{k=1}^N \eta_k}{N} \quad \text{ec(2.4)}$$

5. Calcular los parámetros δ y λ de la curva de la función de distribución acumulativa de la familia de Gumbel.

$$\delta = \frac{1}{a} \quad \text{ec(2.5)}$$

$$\lambda = -b \cdot \delta \quad \text{ec(2.6)}$$

6. Determinar la función de distribución acumulativa de Gumbel

$$H_0 = \lambda - \delta \ln \left(\ln \left(\frac{Tr}{Tr-1} \right) \right) \quad \text{ec(2.7)}$$

Donde: H_0 : es la altura de ola asociada a un periodo de retorno, en [m]
 Tr: es el periodo de retorno, en [años]

El anterior método es explicado de manera más detallada en el fascículo del IINGEN "Análisis y descripción estadística del oleaje" (Rodolfo Silva Casarín-2005). Para el caso en estudio se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2.2 Hoja de cálculo para los datos registrados

n	Datos ordenados X_k [m]	Y	η_k	$X_k \eta_k$	X_k^2
1	2.1	0.00063	-1.9966	-4.1928	4.41
2	2.1	0.00190	-1.8350	-3.8536	4.41
3	2.1	0.00317	-1.7500	-3.6750	4.41
4	2.1	0.00444	-1.6897	-3.5484	4.41
5	2.1	0.00570	-1.6422	-3.4487	4.41
6	2.1	0.00697	-1.6026	-3.3655	4.41
7	2.1	0.00824	-1.5684	-3.2936	4.41
8	2.1	0.00951	-1.5381	-3.2301	4.41
9	2.1	0.01077	-1.5109	-3.1728	4.41
...
780	5.7	0.98796	4.4134	25.1565	32.49
781	5.8	0.98923	4.5253	26.2467	33.64
782	5.9	0.99049	4.6511	27.4414	34.81
783	6.2	0.99176	4.7948	29.7280	38.44
784	6.6	0.99303	4.9625	32.7526	43.56
785	6.7	0.99430	5.1638	34.5977	44.89
786	6.7	0.99556	5.4158	36.2857	44.89
787	7.0	0.99683	5.7529	40.2702	49
788	9	0.99810	6.2643	56.3791	81
789	9.2	0.99937	7.3636	67.7451	84.64
	<u>2401.6</u>		<u>455.1159</u>	<u>2266.8761</u>	<u>7930.76</u>

$$a = \frac{(789)(226.87) - (2401.6)(455.11)}{(789)(7930.76) - (2401.6)^2} = 1.4204$$

$$b = \frac{(-1.4204)(2401.6) + 455.11}{789} = -3.7467$$

$$\delta = \frac{1}{1.4204} = 0.704$$

$$\lambda = -(-3.7467)(0.704) = 2.6378$$

$$H_0 = 2.6378 - 0.704 \left(\ln \left(\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right) \right) \rightarrow \text{Función de distribución acumulativa de Gumbel}$$

En la Figura 2.6 se muestra la función de distribución en un papel probabilístico de Gumbel.

Figura 2.6 Papel probabilístico de Gumbel

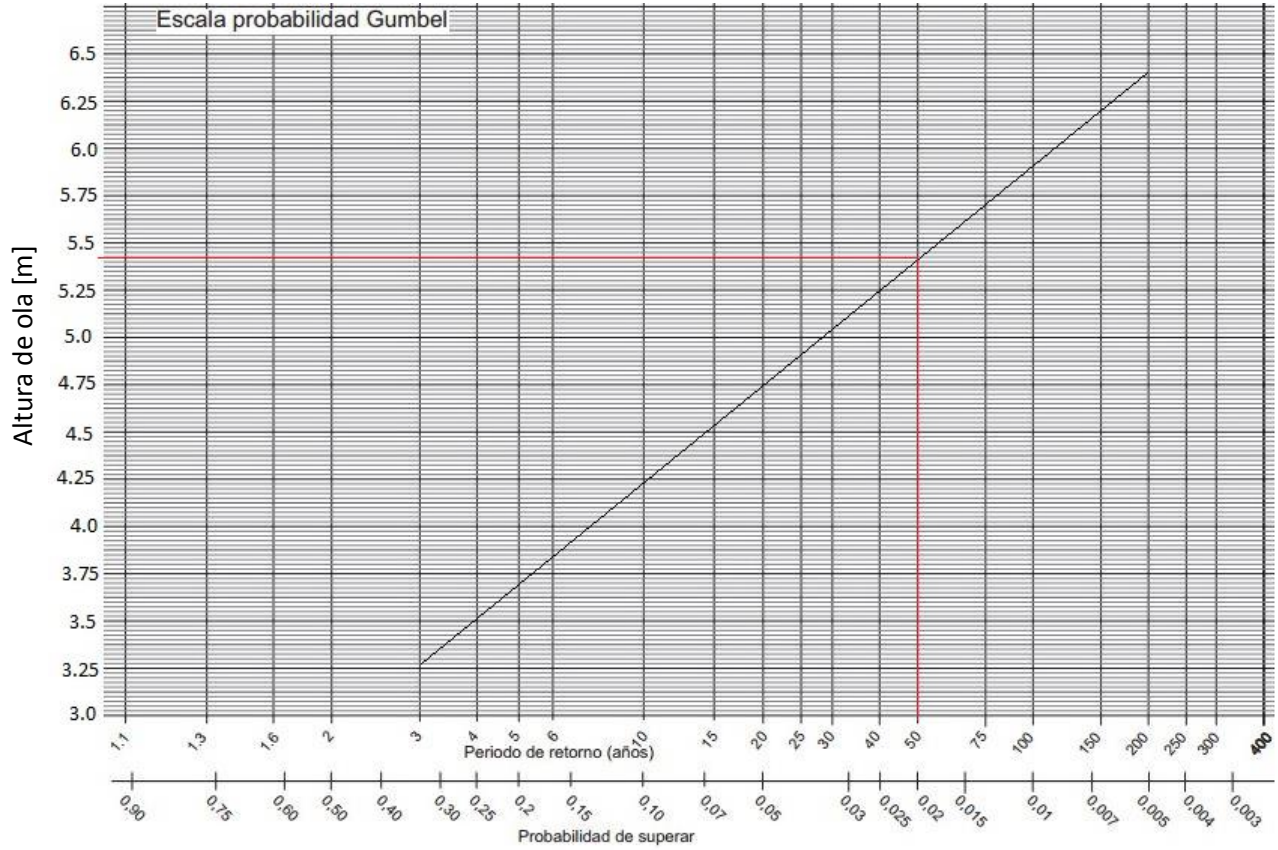


Tabla 2.3 Alturas de ola asociadas a un Periodo de retorno

Tr	H ₀ [m]
3	3.27
5	3.69
10	4.22
15	4.52
20	4.73
25	4.89
30	5.02
50	5.38
75	5.67
100	5.88
200	6.37

Por recomendaciones de diseño se propone que se elija un Periodo de Retorno de 50 años, por lo que la altura de ola elegida es **H₀=5.38 [m]**.

2.2. REGISTRO DE HURACANES

En la zona de estudio es notable la presencia de eventos ciclónicos o huracanes, ya que el Estado de Veracruz se encuentra en la zona de influencia de estos eventos que tienen su origen en área del Océano Atlántico y Mar Caribe

Aun cuando los huracanes pueden formarse desde principios de mayo en el Golfo de México, la temporada oficial de huracanes comienza el 1 de junio y termina el 30 de noviembre

La escala que se emplea para clasificar estos ciclones tropicales es la de Saffir-Simpson que se basa en la intensidad del viento, la marea de tormenta (sobreelevación del nivel del mar) y presión central.

Tabla 2.4 Clasificación Saffir-Simpson

Clasificación	Velocidad del viento [km/h]	Marea de tormenta [m]	Presión central [mbar]
Depresión tropical	0-62	0.00	>980
Tormenta tropical	63-117	0.00-3.00	>980
Categoría 1	119-153	1.20-1.50	980-994
Categoría 2	154-177	1.80-2.40	965-979
Categoría 3	178-209	2.70-3.70	945-964
Categoría 4	210-249	4.00-5.50	920-944
Categoría 5	>250	>5.50	<920

Para poder analizar estos fenómenos se empleó la base de datos de la empresa "UNISYS Weather" que cuenta con un registro de huracanes desde el año de 1851. Muestra un gráfico donde se grafica la trayectoria de cada uno de los eventos ciclónicos además de que proporciona una tabla de los avisos (a cada 6 horas) que incluyen la ubicación del fenómeno, la hora del registro, la velocidad del viento en nudos y la presión central en mbar.

Para el análisis de la marea de tormenta (sobreelevación del nivel del mar) provocado por los eventos ciclónicos se decidió emplear los datos del UNISYS desde el año de 1960 hasta el 2015. Se eligió este periodo de años ya que no se tiene la certidumbre que los registros de los años pasados sean muy exactos debido a la escasa tecnología con la que se contaba. En total se analizaron 31 fenómenos meteorológicos que incidieron directamente en el sitio de estudio.

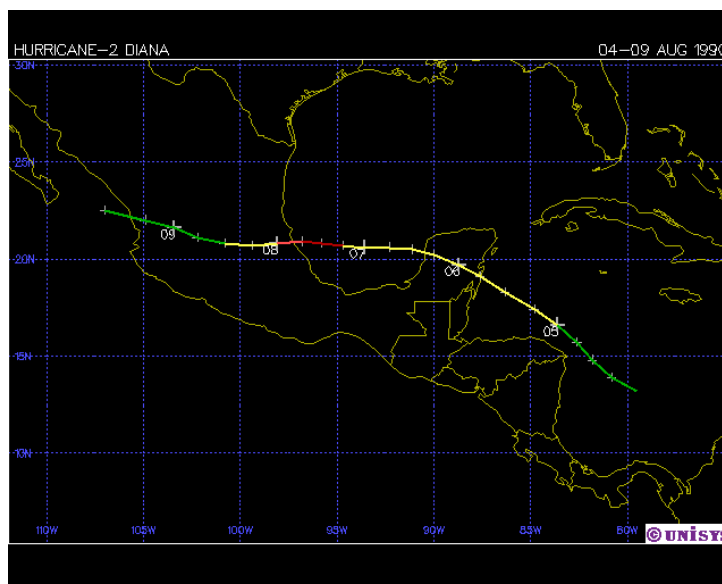


Figura 2.7 Ejemplo de la trayectoria de un huracán (Diana 1990)

En la Tabla 2.5 se muestran todos los fenómenos meteorológicos que han afectado al municipio de Alvarado desde 1960.

Tabla 2.5 Registro de eventos ciclónicos

Nombre	Año	Categoría máxima alcanzada	Velocidad máxima del viento [nudos]	Velocidad máxima del viento [km/h]	Presión mínima central [mbar]
Inez	1966	Categoría 4	120	222.24	948
Beulah	1967	Categoría 5	140	259.28	923
Ella	1970	Categoría 1	80	148.16	984
Greta	1970	Depresión tropical	25	46.30	1008
Edith	1971	Tormenta tropical	45	83.34	998
Bess	1978	Tormenta tropical	45	83.34	1005
Bob	1979	Tormenta tropical	55	101.86	996
Henri	1979	Categoría 1	75	138.90	983
Gilbert	1988	Categoría 4	115	212.98	946
Jerry	1989	Tormenta tropical	55	101.86	991
Diana	1990	Categoría 1	75	138.90	986
Arlene	1993	Depresión tropical	30	55.56	1005
Gert	1993	Categoría 1	80	148.16	978
Roxanne	1995	Categoría 1	75	138.90	979
Dolly	1996	Tormenta tropical	55	101.86	990
Earl	1998	Tormenta tropical	50	92.60	998
Bret	1999	Categoría 2	90	166.68	975
Keith	2000	Categoría 1	80	148.16	984
Dolly	2008	Categoría 2	85	157.42	967
Richard	2010	Depresión tropical	30	55.56	1004
Karl	2010	Categoría 3	105	194.46	956
Hermine	2010	Tormenta tropical	55	101.86	991
Alex	2010	Categoría 2	85	157.42	948
Harvey	2011	Depresión tropical	30	55.56	1005
Don	2011	Tormenta tropical	45	83.34	998
Arlenne	2011	Tormenta tropical	55	101.86	996
Hellen	2012	Tormenta tropical	40	74.08	1004
Ernesto	2012	Tormenta tropical	60	111.12	992
Ingrid	2013	Categoría 1	75	138.90	983
Fernand	2013	Tormenta tropical	45	83.34	1001
Barry	2013	Tormenta tropical	40	74.08	1003

La marea de tormenta se define como una sobreelevación anormal del nivel medio del mar debido a factores meteorológicos extremos, como son los sistemas ciclónicos. La sobreelevación es generada, básicamente, por tres factores: la componente del viento, el efecto barométrico invertido y la marea astronómica. La componente del viento es la causada por el movimiento rotatorio de un huracán, la cual tiende a empujar el agua hacia la tierra.

La baja presión al centro de un huracán causa el efecto barométrico invertido, el cual es el resultado de la diferencia de presiones entre el centro del meteoro y la presión ambiental fuera del sistema. Este gradiente se equilibra con un incremento en el nivel de la superficie libre del agua. Cuando este fenómeno ocurre en aguas profundas, la marea se desvanece sin ocasionar daño alguno, sin embargo, cuando se presenta cerca de la costa es que provoca efectos dañinos.

Por su parte, las mareas astronómicas también son importantes en la magnitud de la marea de tormenta, esto es, si el arribo del ciclón coincide con la pleamar, la sobreelevación puede incrementarse de manera considerable.

En un área específica, la altura de marea de tormenta puede estimarse restando, de la marea total, la predicción de marea astronómica; tomando en cuenta que la marea de tormenta puede provocar elevaciones positivas o negativas.

De acuerdo con el NHC (National Hurricane Center) del gobierno de los Estados Unidos, en aguas profundas, la reducción de un milibar en la presión atmosférica es equivalente a un incremento de un centímetro en el nivel del agua. Sin embargo, y más cuando es debida a un huracán, la sobreelevación depende también de otros factores, como son: presión central en el ciclón, velocidad del viento sostenido, velocidad del desplazamiento, ángulo de incidencia sobre la playa y pendiente de la batimetría en la zona de incidencia. De los anteriores, la velocidad del viento es el principal causante de la marea de tormenta ya que es quien se encarga de desplazar la masa de fluido hacia la playa.

Por lo que respecta a la configuración del fondo, una pendiente suave favorece el incremento del nivel medio. Así mismo, el desplazamiento de un huracán provoca el desarrollo de una onda larga de tal forma que a menor velocidad de desplazamiento se presenta una mayor sobreelevación.

El nivel de marea de tormenta puede aumentar en función de las características morfológicas y climáticas de la zona donde se presenta. Algunas de las características que provocan aumento en el nivel son: lluvias, descarga de ríos y forma cóncava de la línea de costa.

Otro parámetro que se debe considerar es el factor de peraltamiento, es decir, la respuesta de la masa de agua al ser forzada a ir de aguas profundas a someras. Entre más peralte se presente, la magnitud de la marea tiende a ser mayor, sin embargo, cuando se tiene poco peralte, la altura de las olas es mayor y suele provocar grandes daños.

Los modelos computacionales utilizados para estimar la magnitud de la marea de tormenta, resuelven las ecuaciones de continuidad y momento horizontal integradas desde el fondo del mar hasta la superficie libre, despreciando el perfil de presiones vertical dentro del agua. Un ejemplo de este tipo de modelos es el SPLASH del National Weather Service de los Estados Unidos, el cual

estima la marea de tormenta como función de la velocidad de traslación del huracán, del ángulo de su trayectoria respecto de la línea de costa y de los vientos máximos sostenidos.

Para nuestro caso en estudio se ocupó la ecuación semi-empírica que es función únicamente de la presión en el centro del huracán propuesta por Conner, Kraft y Harris.

$$Mt=0.046939(1019-Pc) \quad \text{ec}(2.8)$$

Donde: Mt: es la marea de tormenta, en [m]
 Pc: es la presión central, en [mbar]

La ecuación 2.8 se le aplicó al aviso de cada huracán donde la distancia era la más corta al sitio. En la Tabla 2.6 se muestra el resultado en cada uno de los eventos.

Tabla 2.6 Marea de tormenta de cada evento ciclónico

Nombre	Año	Distancia al sitio [km]	Po [mbar]	MT [m]	Categoría	Nombre	Año	Distancia al sitio [km]	Po [mbar]	MT [m]	Categoría
Inez	1966	408.1	948	3.33	Categoría 4	Bret	1999	150.64	1008	0.52	Depresión tropical
Beulah	1967	425.36	967	2.44	Categoría 3	Keith	2000	234.47	988	1.46	Categoría 1
Ella	1970	579.5	984	1.64	Categoría 1	Dolly	2008	540.43	997	1.03	Tormenta tropical
Greta	1970	299.82	1009	0.47	Depresión tropical	Richard	2010	330.23	1004	0.70	Tormenta tropical
Edith	1971	422.18	998	0.99	Tormenta tropical	Karl	2010	69.64	967	2.44	Categoría 2
Bess	1978	215.76	1008	0.52	Tormenta tropical	Hermine	2010	247.35	1003	0.75	Tormenta tropical
Bob	1979	415.03	1010	0.42	Depresión tropical	Alex	2010	447.07	990	1.36	Tormenta tropical
Henri	1979	234.75	983	1.69	Categoría 1	Harvey	2011	28.18	1005	0.66	Depresión tropical
Gilbert	1988	459.51	949	3.29	Categoría 3	Don	2011	737	998	0.99	Tormenta tropical
Jerry	1989	339.08	1004	0.70	Tormenta tropical	Arlenne	2011	257.3	1000	0.89	Tormenta tropical
Diana	1990	223.54	986	1.55	Categoría 1	Hellen	2012	204.55	1004	0.70	Tormenta tropical
Arlene	1993	401.16	1005	0.66	Depresión tropical	Ernesto	2012	137.87	992	1.27	Tormenta tropical
Gert	1993	268.4	978	1.92	Categoría 1	Ingrid	2013	58.59	999	0.94	Tormenta tropical
Roxanne	1995	332.96	992	1.27	Tormenta tropical	Fernand	2013	45.89	1003	0.75	Tormenta tropical
Dolly	1996	250.87	990	1.36	Tormenta tropical	Barry	2013	90.22	1005	0.66	Tormenta tropical
Earl	1998	449.6	1002	0.80	Tormenta tropical						

Se ha propuesto que la obra de protección sea no rebasable sólo bajo las condiciones que puedan presentar huracanes de categoría 1 y 2. La sobreelevación del mar que puedan ocasionar huracanes de categoría 3, 4 y 5 provocarán un rebase en la estructura. Dicho lo anterior, se ha elegido la marea de tormenta que ocasionó el huracán Karl (categoría 2), **Mt=2.44 [m]**, para el diseño altimétrico de la estructura.

2.3. CONDICIONES DE MAREA ASTRONÓMICA EN LA DESEMBOCADURA

Debido a que este evento no está ligado a una probabilidad, estos valores se pueden obtener de algún servicio mareográfico que tenga el registro histórico y que nos proporcione el plano de mareas. En este caso la base de datos que se utilizó fue la del Centro de Control y Procesamiento de Datos (CECOPROD) de la Secretaría de Marina. El tipo de marea que se presenta en Alvarado es Marea Mixta, lo que significa que existe una combinación entre Marea Diurna y Marea Semidiurna.

Tabla 2.7 Planos de marea astronómica en Alvarado

	Pies [ft]	Metros [m]
Pleamar máxima registrada	3.510	1.070
Nivel de pleamar media superior	1.472	0.449
Nivel de pleamar media	1.384	0.422
Nivel medio del mar	0.874	0.267
Nivel de bajamar media	0.365	0.111
Nivel de bajamar media inferior	0.000	0.000
Bajamar mínima registrada	-1.575	-0.480

Con los datos registrados en la Tabla 4.2 se puede obtener la sobreelevación del mar por efecto de la marea astronómica. Algo importante de resaltar es que el nivel de referencia para el diseño de esta obra será el **NIVEL MEDIO DEL MAR**. Por lo ya mencionado, la sobreelevación por marea astronómica se calculará con la siguiente expresión:

$$\text{Sobreelevación por M.A.} = \text{Nivel de pleamar media superior} - \text{Nivel medio del mar} \quad \text{ec(2.9)}$$

Empleando la ecuación 4.1 se tiene que la sobreelevación por marea astronómica es de **0.182 [m]**.

2.4. CÁLCULO DE CONDICIONES DE DISEÑO

El dimensionamiento depende directamente de las condiciones que se obtengan de acuerdo al periodo de retorno que se elija para los eventos. La altura de ola en aguas profundas con un periodo de retorno de 50 años que se obtuvo en el capítulo 2.1 fue de **5.38 [m]**, esta altura de ola está asociada a un periodo de **12.5 [s]** conforme a los registros que se tienen de alturas de ola y su periodo asociado.

La altura de ola que se tomará como de diseño es la **Altura máxima de ola rompiente** que queda definida con la siguiente expresión:

$$H_b = \left(\frac{K}{g}\right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{H_0^2 C_0 \cos \theta}{2}\right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{ec(2.10)}$$

Donde:

- H_b : es la altura máxima de ola rompiente, en [m]
- K : es una constante, $K=0.78$
- g : es la aceleración gravitatoria, $9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- H_0 : es la altura de ola en aguas profundas, en [m]
- C_0 : es la celeridad de la ola en aguas profundas

La celeridad de la ola en aguas profundas se obtiene con la siguiente expresión:

$$C_0 = \frac{g \cdot T_0}{2\pi} \quad \text{ec(2.11)}$$

Donde:

- C_0 : es la celeridad de la ola en aguas profundas, en [m/s]
- T_0 : es el periodo de la ola en aguas profundas, en [m/s]

Aplicando las ecuaciones 2.10 y 2.11 que la altura de ola de diseño es de **5.76 [m]**.

3. ANTECEDENTES

El municipio de Alvarado se ubica entre los paralelos $18^{\circ} 46'$ y $18^{\circ} 48'$ de latitud Norte; los meridianos $95^{\circ} 46'$ y $95^{\circ} 44'$ de longitud Oeste; altitud entre 5 y 100 [msnm]. Limita al Norte con el municipio de Boca del río, al Sur colinda con los municipios de Tlacotalpan y Lerdo de Tejada, al Este con el Golfo de México y al Oeste los municipios de Ignacio de la Llave, Tlalixcoyan y Medellín de Bravo.

Alvarado tiene un puerto que es de cabotaje, además de movimiento de buques camaroneros y pesqueros, existen otras embarcaciones menores dedicadas a la pesca que no están sujetas a control de tráfico, este puerto está concesionado a una Administración Portuaria Integral Estatal

Alvarado cuenta con una laguna en donde desemboca el río Papaloapan, así como otros ríos menores como son: El Limón, el Blanco, Acula y Camarón, así como diversas lagunas costeras e interiores como: Camaronera, Tlalixcoyan y Buen País.

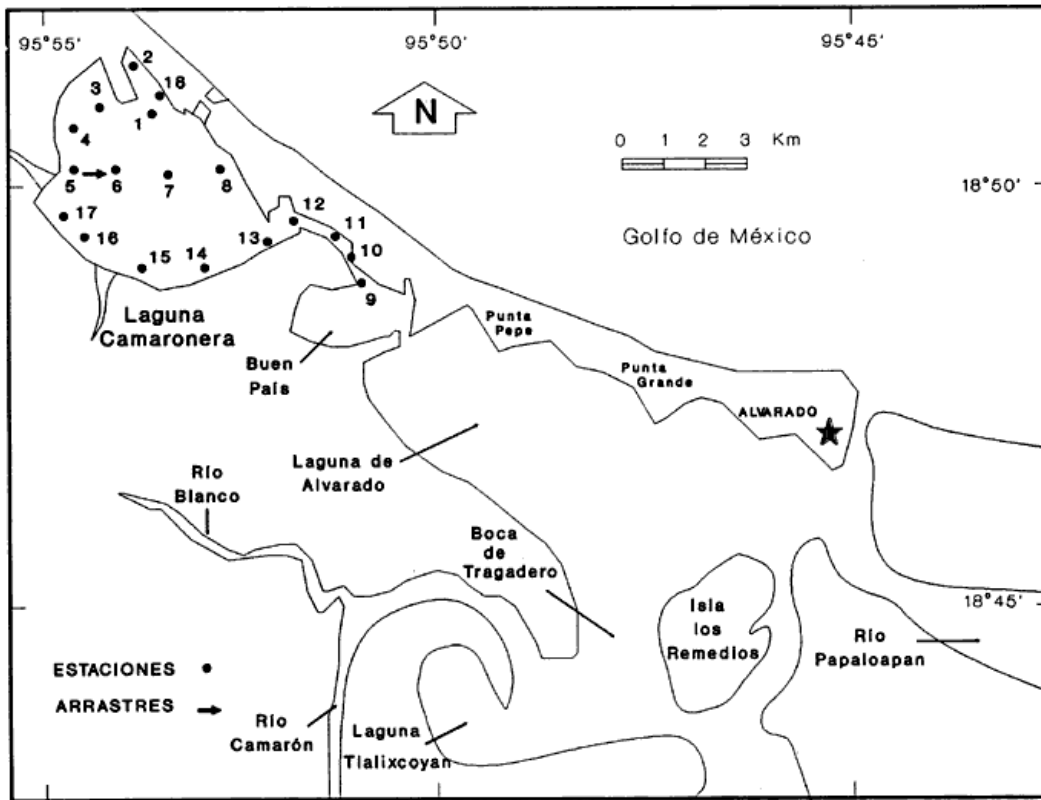


Figura 3.1 Sistema lagunar de Alvarado

Al final de la desembocadura existen 2 escolleras; la escollera Este tiene una longitud de 600 [m] y una elevación de la corona de 2.3 [m] sobre el nivel medio del mar y cuenta con un ancho de corona de 3.95 [m]. Mientras que la escollera Oeste tiene una longitud de 703 [m] y un ancho de corona de 3.95 [m] con una elevación de 2.4 [m] sobre el nivel medio del mar. Ambas escolleras tienen corazas de bloques de concreto.

3.1. ANTECEDENTES DE PROTECCIÓN COSTERA

Hoy en día con asentamientos costeros múltiples y numerosos y dado el dinamismo y vulnerabilidad del equilibrio de las costas, las cuales están en permanente cambio en escalas de tiempo con variaciones de horas a años o más dependiendo del tipo de costa y de las fuerzas desestabilizadoras e inductoras del cambio, la protección costera es un aspecto común de la vida cotidiana en las comunidades costeras.

La infraestructura de protección costera representa el conjunto de obras y sistemas construidos e implementados por el hombre para la defensa o estabilización costera contra el embate de las inclemencias del mar. La protección costera puede estar diseñada para proteger asentamientos establecidos en o cerca de la costa o para proteger la costa misma.

La protección de las playas contra la erosión siempre ha sido una prioridad para los trabajos de ingeniería civil. Históricamente los aspectos relacionados con la playa que interesaban al hombre eran la exploración, el comercio e incluso la guerra. Actualmente el uso de las playas con fines turísticos, recreativos y deportivos representan una de las principales actividades económicas dentro de la zona costera. Es por esto que autoridades, dueños de hoteles y otra gran variedad de personas han invertido en la estabilidad y el desarrollo sustentable de las costas, en especial el de las playas por ser más vulnerables a la erosión.

Una playa representa en sí misma una forma de protección para la costa. El mantener un frente de playa bien conservado garantiza que las propiedades construidas cerca de la costa estén bien protegidas. Sin embargo, para que tal protección sea posible es necesario que las propiedades no estén construidas en la zona móvil de la playa.

La construcción de obras civiles dentro de la costa produce cambios que alteran las tasas de suministro o pérdida de transporte litoral y si no toman medidas para prevenir estos fenómenos, la erosión de la playa continua hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio para la nueva condición. Sin embargo, debido a que estos fenómenos ocurren a largo plazo, los cambios son evidentes cuando el daño irreparable ya está hecho.

Para evitar que una playa se siga erosionando, o impedir el movimiento de arena a lo largo de la playa se han ideado diferentes obras de ingeniería, construidas de la costa, y costa fuera.

A continuación se muestran algunos ejemplos de obras de protección costera:

◆ Relleno de playas

La técnica consiste en la colocación de arena en una playa. La arena se obtiene usualmente de bancos de material ubicados en la zona costa afuera. El aumento de la playa debido al relleno puede servir para:

- Aumentar el área de recreación de una playa.
- Para ofrecer protección contra tormentas (reduciendo la cantidad de energía incidente y creando una playa de sacrificio que se erosione durante la tormenta).
- Para proveer en algunos casos un hábitat para especies en peligro de extinción.

El uso de relleno de playas como protección contra las tormentas suele ser subvalorado. Cuando se rellena una playa, el material que se pierde durante una tormenta corresponderá al relleno, protegiendo el material original de la playa. Además, hay que recordar que ese material no se pierde, sino que es transportado hacia costa fuera para formar barras de arena, que después regresa por la acción de olas más moderadas y redistribuido a lo largo de la playa.

Este método responde a un déficit de arena que provoca la erosión de la línea de costa, por lo tanto la solución más efectiva es aquella en la que se reponga la pérdida de arena.

Un problema significativo asociado con el diseño de relleno de playas es plantear un proyecto a largo plazo. Durante la planeación y la ejecución del relleno de playa continúa erosionándose y, lo más probable, es que el relleno sólo sea una forma de volver a un estado anterior de la playa, por lo que tenderá a alcanzar su estado actual, y la erosión continuará, lo que hace necesario saber cuánto tiempo llevará este proceso.

En el relleno de playas, la arena normalmente se coloca con una pendiente mayor a su perfil en equilibrio, para que una vez que ha sido colocada, las olas comiencen a equilibrar la playa en perfil y planta, cambiando también la forma de la línea de la costa.

Para que la playa alcance el equilibrio normalmente toma un tiempo del orden de años, mientras que para algunos proyectos la pérdida de material puede ocurrir en tiempos del orden de décadas.

La colocación de arena en la playa puede hacerse de forma mecánica o hidráulica. La transportación mecánica desde un banco de material hasta el área a rellenar implica que el material sea transportado en camiones de carga. En el banco de material, la arena es colocada en el camión con equipos tradicionales de movimiento de tierras como son palas mecánicas o retroexcavadoras. En general, este método es utilizado para rellenos en playas pequeñas debido al costo del transporte y el impacto de las superficies a causa de las cargas elevadas.

Para los bancos de material que se encuentran costa afuera, la arena es llevada desde el fondo mediante una draga y bombeada a través de tuberías hasta el sitio de relleno para descargarla finalmente sobre la playa.

Para lograr la redistribución de la arena de lo largo de la playa, el material puede ser depositado hacia la zona costa afuera y así esperar una distribución natural por la acción de olas moderadas. Este método puede resultar en beneficios económicos, sin embargo, existe la probabilidad de que el transporte no se realice de forma natural (por los constantes cambios del clima marítimo) lo que hace inevitable este método.



Figura 3.2 Relleno de playa por bombeo de arena

◆ Espigones

Los espigones son estructuras que generan cambios considerables en los patrones de circulación del oleaje y su función principal ha sido la de prevenir la erosión de la línea de costa en zonas en las que hay una cantidad considerable de transporte longitudinal de sedimentos.

Un espigón se construye como una barra vertical que se extiende desde la playa hacia la zona costa afuera, perpendicular o formando un ángulo con la línea de costa. Una franja de arena queda atrapada aguas arriba de la estructura (tomando en cuenta el sentido del flujo longitudinal del material), y provocando un déficit de material aguas abajo de la estructura. La tasa de acumulación del material en el espigón podría ser igual a la tasa de erosión aguas abajo, por lo que estas estructuras deben utilizarse con mucho cuidado. Los espigones no deben exceder cierto tamaño en altura y longitud para que no representen una barrera para las corrientes, lo que destruiría por completo los procesos en la zona costera.

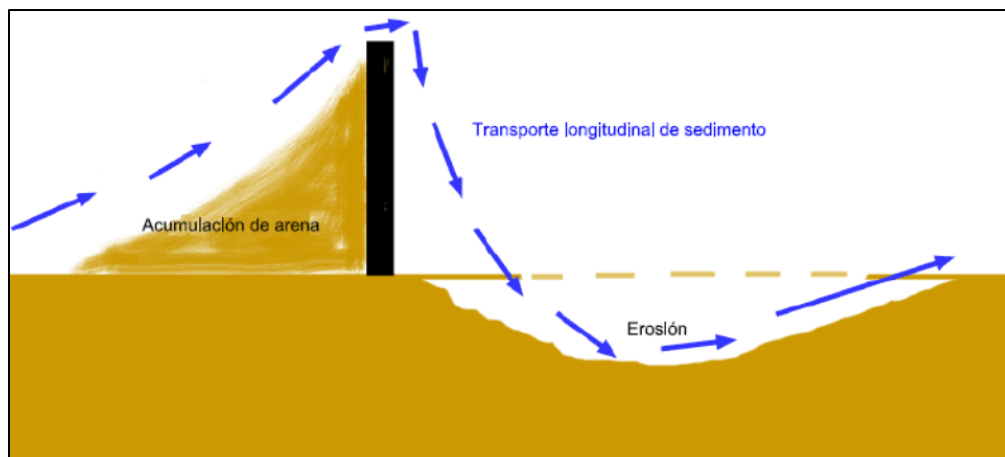


Figura 3.3 Función de un espigón, visto en planta

Para aminorar la erosión asociada a un solo espigón, a menudo se construye una serie de espigones a lo largo de la playa. Su separación está dada de tal forma que parte de la arena acumulada aguas arriba del espigón pueda extenderse y depositarse aguas arriba del siguiente espigón. La correcta utilización y separación de múltiples espigones obliga que la erosión sea desplazada hasta el último espigón.

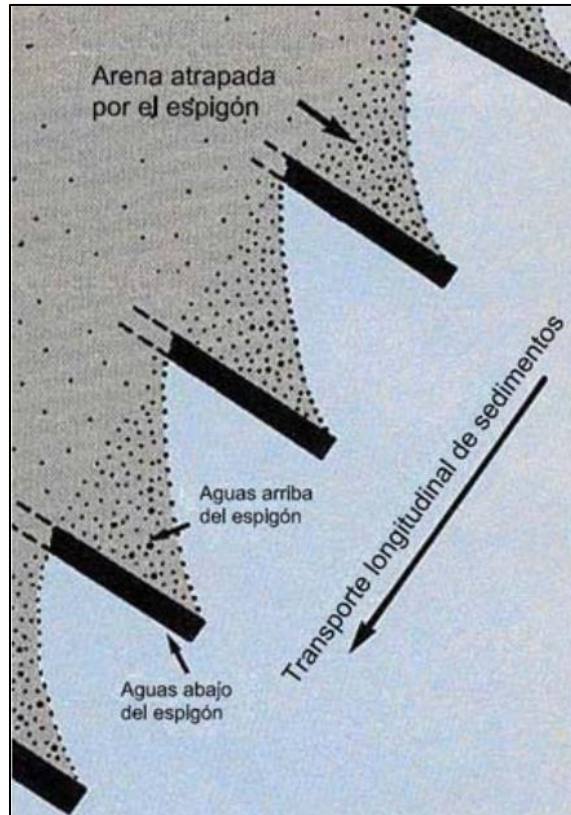


Figura 3.4 Comportamiento típico de un grupo de espigones

El tamaño del espigón puede variar. Existen espigones construido "localmente" por las comunidades que habitan la zona costera y consisten únicamente en la colocación de madera; también existen espigones cuyas crestas pueden alcanzar hasta los 3 metros de ancho. El diseño de espigones, incluyendo dimensiones y cantidad, se apoyará en registros referentes al transporte de sedimentos, así como la función que se espera que tenga la estructura.

Independientemente de si se construye uno, o un grupo de espigones, éstos trabajarán de manera eficiente en lugares donde existan altos índices de transporte longitudinal de sedimentos. Cuando el transporte de sedimentos no sea significativo o el material tienda a desplazarse en sentido contrario, su funcionamiento no será del todo correcto.

Generalmente los espigones son construidos en playas de arena, aunque también pueden construirse en costas rocosas con el objeto de crear playas artificiales. Su construcción consiste en el apilamiento vertical del material rocoso mediante el uso de maquinaria como son grúas, retroexcavadoras o bulldozers.

Para evitar la erosión de las superficies en las que se construirá el espigón, puede colocarse una o varias capas de rocas o geotextil que sirvan como base de la estructura.

◆ Rompeolas

La estructura rompeolas, también conocidos como diques rompeolas tienen como propósito principal disminuir la energía incidente del oleaje sobre una playa, estableciendo así una zona de mar en calma incluso durante periodos de tormenta; esto con el objeto de reducir la erosión de la línea de costa o proveer seguridad a las embarcaciones que se encuentran ancladas a la playa, entre otras ventajas. Son construidas dentro de la zona de rompientes, y paralelas a la línea de costa.

Aunque, de ser necesario, los rompeolas pueden construirse como una sola estructura que se extienda paralelo a lo largo de la línea de costa, resulta más conveniente la construcción de múltiples estructuras por economía, y para evitar el estancamiento de agua cerca de la playa.

Los rompeolas pueden ser emergidos o sumergidos. Los primeros tienen su cresta por encima del nivel medio del mar, mientras que los sumergidos la tienen por debajo del mismo.

Tanto las dimensiones, la cantidad y el tipo de estructuras rompeolas estarán en función de su objetivo, de registros de oleaje y marea; y podrá ser apoyada mediante el uso de modelos de simulación para verificar su correcto funcionamiento.

Los rompeolas emergidos crearán patrones de transporte longitudinal y transversal de sedimento en diferentes zonas de la playa a causa de la difracción de olas detrás de la estructura, aun cuando no exista transporte longitudinal en una playa. Algunas de las zonas de la playa pueden crecer hacia mar adentro; si el material desplazado alcanza el rompeolas creando una especie de conexión entre la playa y la estructura, se conoce este fenómeno "tómbolo". Si el material no toca con el rompeolas se conoce como "saliente".



Figura 3.5 Formación de tómbolos en rompeolas

La reducción de olas de gran altura detrás de la estructura implica que se perderá transporte hacia costa afuera, por lo que arena tenderá a depositarse detrás de la estructura, y provocando un déficit de sedimento mar adentro de la estructura.

Los rompeolas sumergidos están diseñados bajo la idea de que inducirán reflexión y rompimiento del oleaje además de una disipación de energía sobre la estructura, provocando una reducción en la altura de ola del lado de la costa.

Una de las ventajas principales de los rompeolas sumergidos es que al estar sumergidos no causarán un impacto visual negativo. Sin embargo, esto puede representar un peligro para las embarcaciones si no se hace una señalización correcta de la ubicación de los rompeolas,

Al igual que los espigones, las estructuras rompeolas consisten básicamente en la disposición vertical de material rocoso y en algunas ocasiones de bloques de concreto. La colocación del material se puede llevar a cabo mediante el uso de grúas si el rompeolas se localiza verticalmente cerca de la costa, o utilizando embarcaciones especiales. La construcción de los rompeolas deberá realizarse durante los periodos de mar en calma.



Figura 3.6 Embarcación para la colocación de los materiales

3.2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA OBRA DE PROTECCIÓN EN LA DESEMBOCADURA

La obra de protección se ubicará en la margen izquierda de la desembocadura del río, tendrá una dirección perpendicular a la escollera Oeste y se conectarán en el morro de esta última, esto con el fin de que se pueda restaurar la playa en esta zona. El desplante de la estructura será a 12 metros de profundidad respecto al nivel medio del mar. El diseño de esta restauración se explica en el capítulo 5.

La obra que se propone construir es un dique que estará compuesta por: una **coraza** que soportará las acciones del oleaje, las mareas y las corrientes, por lo que las piezas (elementos artificiales) que la conformarán deben tener la forma, acomodo y peso adecuado; una **capa secundaria** que cumplirá la condición de filtro entre el núcleo y la capa exterior y un **núcleo** que tiene como función principal darle estabilidad a los taludes proyectados de la estructura. Se ha propuesto que los elementos artificiales que conformen a la coraza sean cubos de concreto. El **ancho de corona que se ha propuesto es de 4.0 [m]**, esto con el fin de que durante el periodo de la construcción, la maquinaria pueda maniobrar sin ninguna complicación. En la corona se colocará algún recubrimiento que sirva para proteger los otros materiales.

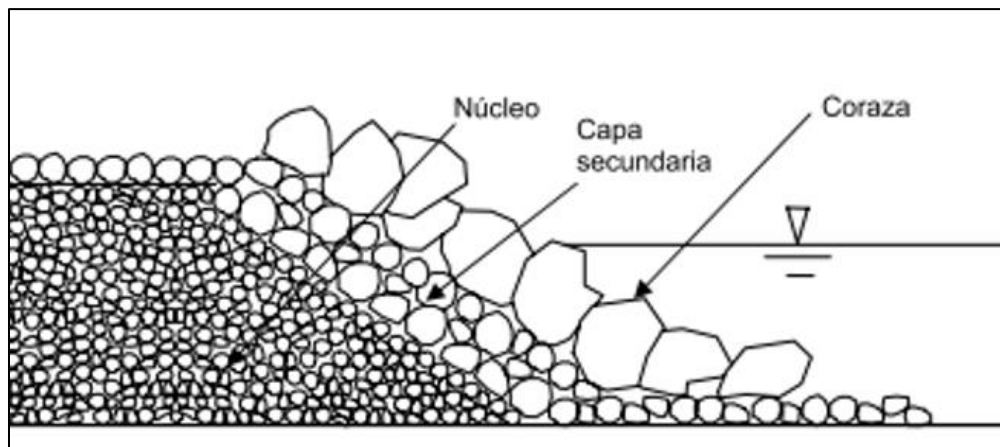


Figura 3.7 Esquema de la sección de la obra de protección

La selección del talud estuvo basada del manual de diseño del *US Army Corps of Engineers* y que considerando que la coraza será de cubos de cubos de concreto se eligió que el talud de diseño, para darle estabilidad a la estructura, fuera de **K=2.0 (cota)**.

Tabla 3.1 Rango de taludes para distintos materiales

Tipo de elemento en la coraza	Colocación	Talud [K]
Piedra		
Lisa redondeada	azar	1.5 a 3.0
Rugosa angulada	azar	1.5 a 3.0
Elementos artificiales		
Tetrápodo	azar	2.0 a 3.0
Tribarra	azar	2.0 a 3.1
Cubo	azar	2.0 a 3.2

4. DISEÑO DE LA OBRA DE PROTECCIÓN MARGINAL

Toda obra que esté interactuando con el ambiente marítimo se construye para cumplir unas determinadas funciones, permitiendo o facilitando ciertas actividades, que repercuten de manera directa al desarrollo social. Las obras deben ser fiables, funcionales y operativas durante el tiempo en que vaya a permanecer en servicio. A lo largo de su vida, la obra pasa por diferentes estados de proyecto, es decir lapsos de tiempo en el que pueden admitirse eventos para los cuales estará diseñada la obra. Por lo que el diseño de la obra se convierte en una etapa fundamental para el objetivo con el que se pensó en realizar esta obra.

4.1. DISEÑO MECÁNICO

El comportamiento de una estructura sujeta a la acción del oleaje está relacionado con el daño que éste le ocasionará. Los estudios y formulaciones desarrolladas para el diseño de diques, toman como base un nivel de avería aceptable.

Las estructuras costeras se diseñan para presentar falla de tipo dúctil, a fin de poder reparar el daño al término de la tormenta que lo provocó. A continuación se enlistan las posibles causas de la aparición de dicho daño y eventual fallo de la estructura:

- Extracción de la piezas de la coraza a causa del oleaje
- Movimientos continuos de las piezas de la coraza sin grandes desplazamientos instantáneos, pero capaces de deformar a largo plazo la geometría de la coraza
- Rotura de las piezas de la coraza a causa de choques
- Deslizamiento del manto por falta de fricción con las capas subyacentes
- Fallas debidas a una baja capacidad de carga del terreno de cimentación
- Averías en los mantos interiores y en la corona causadas por rebase
- Defectos de construcción que crean zonas débiles

Como se ha mencionado, los diques se diseñan dado un nivel de riesgo de fallo aceptable, en otras palabras, la estructura presentará un cierto daño sin que deje de cumplir con sus funciones. Se han desarrollado diversas formas para definir el grado de daño de una estructura, por ejemplo, determinar la avería como un porcentaje de las piezas desplazadas respecto del total en una determinada área. Después de varios estudios por parte de algunos investigadores, se determinaron los siguientes criterios de avería:

- **Inicio de avería (IA):** Se alcanza cuando un determinado número de piezas de la coraza son llevadas a una posición alejada a más de un diámetro de su posición original. En la coraza se observan huecos de gran tamaño.
- **Avería de Iribarren (AI):** En este nivel, los huecos son tan grandes que el oleaje comienza a actuar sobre la capa interior de la coraza.
- **Inicio de destrucción (ID):** Puede definirse como el inicio de avería de la capa interior de la coraza.
- **Destrucción (D):** El nivel de destrucción se alcanza cuando una pieza de las capas secundarias es extraída. Si el oleaje no disminuye, la estructura deja de funcionar en poco tiempo.

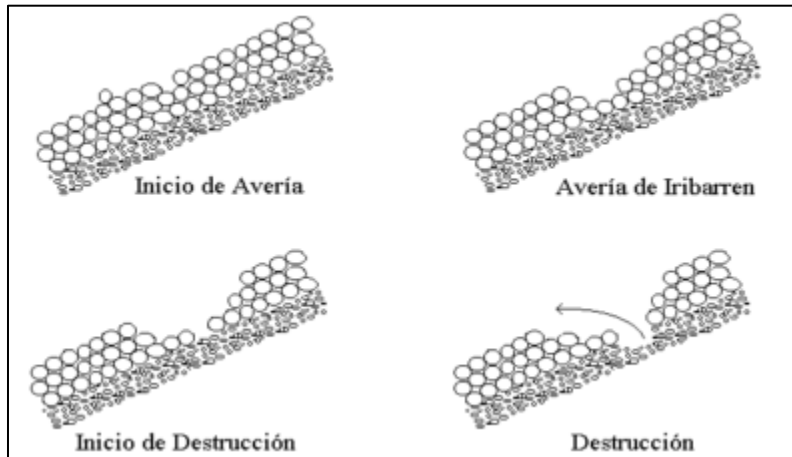


Figura 4.1 Niveles de avería

Existen varios métodos que distintos autores han propuesto con base en sus investigaciones y experimentos que ayudan a estimar el peso de la coraza. Como se estableció en el objetivo de este trabajo se está diseñando la obra de forma determinista, es por esto que sólo se emplearan dos métodos para determinar el peso de las piezas de la coraza.

♦ Formulación de Hudson (1959)

Hudson propone la siguiente expresión para calcular el peso de las piezas de la coraza:

$$W = \frac{\gamma_m H_b^3}{K_D \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad \text{ec(4.1)}$$

Donde: W : es el peso de cada elemento en la capa de la coraza, en [Ton]
 γ_m : es el peso volumétrico del concreto, $\gamma_m = 2.4$ [Ton/m³]
 H_b : es la altura de ola de diseño, $H_b = 5.76$ m
 K_D : es un coeficiente de estabilidad, para cubos, $K_D = 7.5$
 γ_a : es el peso volumétrico del agua en el mar, $\gamma_a = 1.03$ [Ton/m³]
 $\cot \alpha$: es talud de la estructura, $\cot \alpha = 2$

Con la ecuación 4.1 da como resultado:

$$W = \frac{(2.4)(5.76)^3}{(7.5) \left(\frac{2.4}{1.03} - 1 \right)^3 (2)} = 13.00 \text{ [Ton].}$$

El volumen de cada cubo será de:

$$\text{Vol} = \frac{W}{\gamma} = \frac{13.00}{2.4} = 5.42 \text{ [m}^3\text{]}$$

Con este volumen se propone que los cubos sean de **1.80 [m] por lado** lo que nos daría un **volumen de 5.832 [m³]** y cada elemento tendría un peso de **13.99 [Ton]**.

El valor del coeficiente de estabilidad corresponde a un daño nulo, definido como el nivel de daño en el 5% o menos de las unidades de la coraza han sido desplazadas de su sitio.

♦ Formulación de Losada y Giménez-Curto (1982)

Estos autores demostraron que la influencia de la densidad de las piezas de la coraza queda bien representada, si $\gamma_m/\gamma_a > 2$, si se combina la función del peso adimensional con la densidad relativa de las piezas, es decir,

$$\Psi = \frac{W}{\gamma_a H_b^3 R_r} \quad \text{ec(4.2)}$$

Donde: Ψ : es la función de estabilidad
 W : es el peso de cada elemento en la capa de la coraza, en [Ton]
 γ_a : es el peso volumétrico del agua en el mar, $\gamma_a = 1.03$ [Ton/m³]
 H_b : es la altura de ola de diseño, $H_b = 5.76$ m

$$R_r = \frac{\frac{\gamma_m}{\gamma_a}}{\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1\right)^3} \quad \text{ec(4.3)}$$

La ecuación 4.2, llamada función de estabilidad, está relacionada con el número de estabilidad o de Hudson, N_s , de la siguiente forma:

$$\Psi = \frac{1}{N_s^3} \quad \text{ec(4.4)}$$

$$N_s = \frac{H_b}{\frac{\gamma_m}{\gamma_a} * D_n} \quad \text{ec(4.5)}$$

Donde: D_n : es la longitud de cada lado de las piezas en la coraza, en [m]

De modo que los valores de N_s pueden emplearse para determinar la función de estabilidad (Ψ) y con ello el peso de las piezas. Losada y Desiré (1985), tras una extensa experimentación con bloques paralelepípedos, obtuvieron los valores de Ψ (con un nivel de confianza del 95%) que se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores máximos de Ψ para bloques paralelepípedicos

Tipo de bloque	Cot a		
	1.5	2.0	2.5
Inicio de avería			
AxAxA	0.060	0.047	0.043
AxAx1.5A	-	-	0.084
AxAx2A	0.12	-	0.116
Avería de Iribarren			
AxAxA	0.033	0.028	0.024
AxAx1.5A	-	-	0.030
AxAx2A	0.042	-	0.038
Destrucción			
AxAxA	0.027	0.022	0.018
AxAx1.5A	-	-	0.021
AxAx2A	0.035	-	0.027

Para el caso en estudio se propuso el criterio de Inicio de avería, lo que resulta que el valor máximo de Ψ , para un bloque "AxAxA" y con un talud en la estructura de 2, es de 0.047. Con la ecuación 4.4 se tiene que el valor del número de estabilidad, N_s , es de:

$$N_s = \sqrt[3]{\frac{1}{0.047}} = 2.77$$

Este valor se introduce a la ecuación 4.5 y de ella se obtiene el valor D_n .

$$D_n = \frac{5.76}{\left(\frac{2.4}{1.03}\right)^{2.77}} = 0.89 \text{ [m]}$$

Se propone que los cubos sean de **0.90 [m] por lado** lo que nos daría un volumen de **0.729 [m³]** y cada elemento tendría un peso de **1.75 [Ton]**.

♦ Selección de las dimensiones de las piezas en la coraza

Se tomó la decisión de que los cubos fueran de **0.90 [m]** como se obtuvo con la formulación de Losada y Giménez-Curto por las siguientes razones:

- La formulación de Hudson fue obtenida sólo en ensayos con oleaje regular
- Hudson no toma en cuenta el periodo ni la duración de la tormenta
- Hudson sólo considera diques no rebasables y núcleo impermeable
- Los niveles de confianza de Losada y Giménez-Curto son muy altos

4.2. DISEÑO GEOMÉTRICO

El diseño geométrico consiste en calcular los siguientes parámetros:

- Run Up (ascenso máximo)
- Transmisión
- Reflexión

- ◆ Run Up (ascenso máximo)

El nivel de ascenso del oleaje es uno de los factores más importante a considerar en el diseño de las estructuras costeras porque de su valor depende del nivel de la cresta de la estructura.

Las olas generadas por el viento tienen periodos que favorecen su rompimiento sobre el talud de las estructuras, este rompimiento causan un ascenso (R_u) y un descenso (R_d), definidos como la máxima y mínima elevación de la superficie del agua medida verticalmente desde el nivel medio del mar.

El ascenso y descenso dependen de la altura y peralte de la ola incidente y de su interacción con la onda reflejada que la precede, así como el ángulo de la pendiente, la rugosidad de la superficie, y la permeabilidad y porosidad de la pendiente. Los valores extremos de la velocidad de flujo y del ascenso y descenso para un estado de mar e inclinación de talud dados, se presentan en pendientes impermeables lisas.

En la Figura 4.2a se ilustra la variación de los vectores de velocidad del flujo a lo largo de un talud impermeable en un ciclo de oleaje y la Figura 4.2b muestra la misma variación para un talud permeable. Tanto la magnitud como la dirección de los vectores velocidad son importantes para la estabilidad de la estructura. Generalmente el campo de flujo más crítico ocurre en la zona cercana y justo debajo del nivel medio del mar, donde el flujo hacia el pie del talud produce las mayores fuerzas. La excepción la constituyen las pendientes suaves (mayores de $K=3.5$) en las que el flujo hacia la corona del talud es el más dañino.

El incremento de la permeabilidad de la pendiente reduce la velocidad del flujo sobre la cresta porque una mayor cantidad de flujo penetra la estructura. La acción del oleaje causará un aumento en el nivel del agua (nivel freático), como se muestra en la Figura 4.2c, ocasionando un incremento en la presión de poro media. Esta elevación se debe a que durante el ascenso se tiene una mayor área de flujo hacia dentro de la estructura que la de salida durante el descenso. El aumento del nivel freático continuará hasta que los flujos de entrada de entrada y salida se equilibren. Cuanto más baja sea la permeabilidad de la estructura, mayor será la elevación del nivel freático.

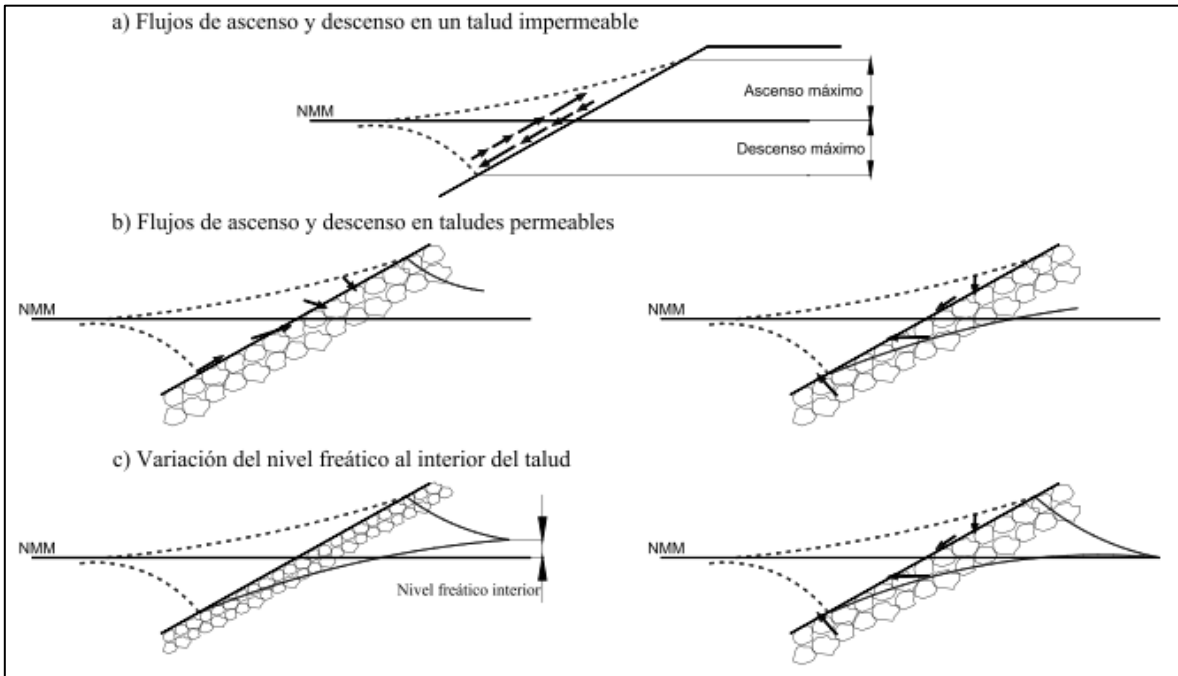


Figura 4.2 Ilustración del ascenso y descenso máximos

El flujo de ascenso sobre un talud depende en gran medida de la forma en que rompen las olas. El tipo de rotura se puede identificar por el llamado parámetro de semejanza de la rompiente o número de Iribarren, el cual se define como:

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad \text{ec(4.6)}$$

Donde: I_r : es el número de Iribarren
 α : es el ángulo de inclinación del talud
 H_0 : es la altura de ola en aguas profundas, en [m]
 L_0 : es la longitud de ola en aguas profundas, en [m]

La longitud de ola en aguas profundas se obtiene con la siguiente:

$$L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi} \quad \text{ec(4.7)}$$

Donde: L_0 : es la longitud de ola en aguas profundas, en [m]
 g : es la aceleración gravitatoria, 9.81 [m/s²]
 T_0 : es el periodo de la ola en aguas profundas, $T_0=12.5$ [s]

Ocupando las ecuaciones 5.1 y 5.2 se obtiene que el número de Iribarren es de **$I_r=3.37$** .

El ascenso máximo depende del número de Iribarren, del ángulo de incidencia del oleaje y de la pendiente geométrica (forma del perfil, rugosidad de la superficie, porosidad). Las diferencias en la forma en que ocurre el ascenso máximo hacen conveniente una distinción entre las pendientes

permeables e impermeables. Un talud impermeable corresponde a diques, revestimientos y rompeolas con superficies impermeables (asfalto, concreto) o superficies muy rugosas (roca muy angulosa) sobre con núcleos de materiales finos. Los taludes permeables se asocian generalmente a estructuras de piezas sueltas con capas secundarias, filtros y núcleos de residuos de cantera.

Existen varias formulaciones para estimar el valor de ascenso máximo, estas fórmulas dependen del tipo del oleaje (regular e irregular) y si los taludes son permeables o impermeables. Por las características de los materiales que se colocarán en la obra de protección se consideran impermeable el talud y con un oleaje regular. Losada y Giménez-Curto (1980) propusieron un modelo experimental para este tipo de condiciones.

$$Ru = H_b * Au(1 - e^{-Bu * Ir}) \quad \text{ec(4.8)}$$

Donde: Ru: es el ascenso máximo en la estructura, en [m]
 H_b: es la altura de ola de diseño, H_b=5.76 [m]
 Ir: es el número de Iribarren
 Au y Bu: son coeficientes de ajuste que dependen del tipo de piezas en la coraza.

Para diques impermeables se tiene que los coeficientes Au y Bu se obtienen con las siguientes expresiones:

$$Au = -3.825P + 3.344 \quad \text{ec(4.9)}$$

$$Bu = -1.179P + 0.081 \quad \text{ec(4.10)}$$

Donde: P: es la porosidad. Este valor se obtiene de la Figura 4.2.

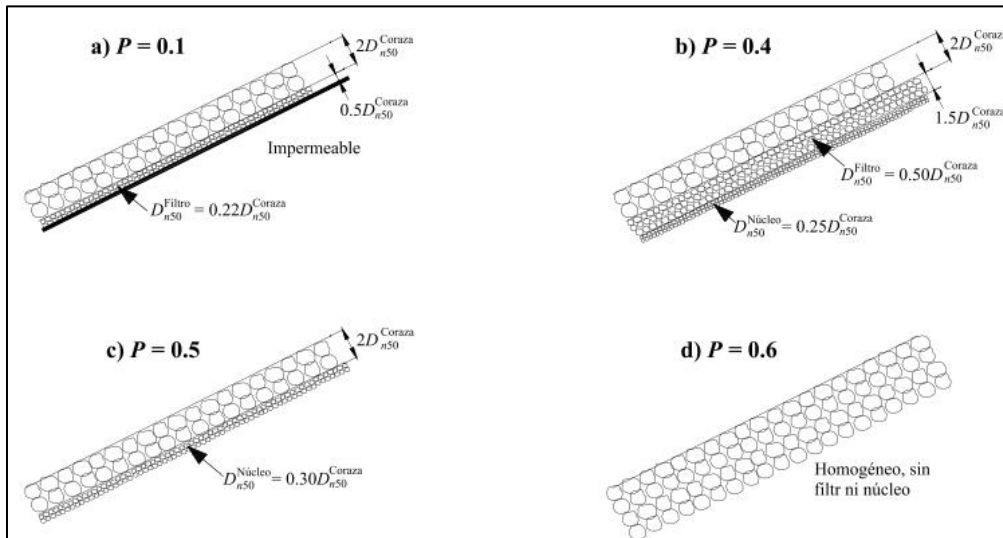


Figura 4.2 Coeficientes de porosidad

Se propone que el acomodo de las piezas sea como el ejemplo b de la Figura 4.2, por lo que se tendría una porosidad de P=0.4, por lo tanto se tiene: **Au=1.814** y **Bu=-0.3906**.

Con la ecuación 5.3 se obtiene el valor del ascenso máximo:

$$Ru = 5.76 * 1.814(1 - e^{-0.3906*3.37}) = 7.64 \text{ [m]}$$

A este ascenso máximo hay agregarle la sobreelevación provocado por la marea de tormenta y la marea astronómica, por lo que la elevación de la corona de la obra de protección quedará:

$$\text{Elevación de la corona: Run up+Mt+MA}=7.64+2.44+0.18=10.26 \text{ msnm}$$

Cabe recordar que con esta elevación la estructura no será rebasable si se presentan huracanes de categoría 2, pero si se llegan a presentar huracanes de mayor categoría corre el riesgo de ser rebasada.

♦ Transmisión

La acción del oleaje detrás de una estructura puede ser debida, además del rebase, a la penetración de las ondas a través de la estructura si ésta es permeable. Generalmente el periodo de las ondas transmitidas es aproximadamente la mitad del correspondiente a las ondas incidentes. La transmisión suele representarse a través de un coeficiente de transmisión, que se define como la relación entre la altura de ola transmitida y altura de ola incidente.

En realidad, el oleaje dentro de la zona protegida es una suma de las ondas transmitidas y las que se generan por rebase. Aunque se sabe que las debidas al rebase son de mucho menor periodo, la separación y caracterización de ambas ondas es difícil, por lo que suelen considerarse como un solo tipo de ondas y el coeficiente de transmisión (incluyendo ambas).

Por lo general, los valores del coeficiente de transmisión que se reportan en la literatura son obtenidos en laboratorio y la mayoría en pequeña escala, por lo que al utilizarlos se debe considerar que dichos valores pueden estar distorsionados por efectos de escala.

Como se mencionó, esta estructura se considera no rebasable. Numata (1976), a partir de trabajo experimental, propuso la siguiente expresión para diques no rebasables.

$$K_T = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_T}{I_r}} \quad \text{ec(4.11)}$$

$$\alpha_T = 1.48 \left(\frac{B_S}{D_n} \right)^{0.66} \quad \text{ec(4.12)}$$

Donde: K_T : es el coeficiente de transmisión
 I_r : es el número de Iribarren
 B_S : es la anchura de la obra de protección al nivel medio del mar, en [m]
 D_n : es la longitud de los cubos por lado, en [m]

El ancho de la obra al nivel medio del mar se obtiene de la siguiente manera:

$$B_S = \text{Ancho de corona} + (2 * \cot \alpha * \text{elevación de la corona}) = 4 + (2 * 2 * 10.26) = 41.04$$

Con el valor del ancho de la obra al nivel medio del mar se puede calcular el coeficiente de transmisión con las ecuaciones 4.12 y 4.13.

$$\alpha_T = 1.48 \left(\frac{41.04}{0.9} \right)^{0.66} = 18.41$$

$$K_T = \frac{1}{1 + \frac{18.41}{3.37}} = 0.15$$

El valor del coeficiente de transmisión obtenido es muy bajo lo que es bueno ya que se pretende que no haya demasiada transmisión del oleaje a través de éste, ya que el objetivo de esta obra es abrigar a la zona que se planea restaurar.

◆ Reflexión

Las estructuras costeras reflejan una porción de la energía de la ola incidente. Si esa reflexión es significativa, la interacción entre la onda incidente y onda reflejada pueden crear un oleaje difuso con ondas muy peraltadas que romperán fácilmente. La altura de las ondas incidente y reflejada es un problema común en los canales de acceso de puertos donde el oleaje caótico puede causar problemas considerables en la maniobrabilidad de pequeñas embarcaciones. La reflexión también puede incrementar el potencial de erosión del lecho marino al pie de estructuras de contención, además, las ondas reflejadas desde una estructura pueden contribuir a la erosión de las playas adyacentes.

Los muros verticales lisos, impermeables y no rebasables reflejan casi por completo la energía de la onda incidente, mientras que las estructuras permeables, con pendiente media y de piezas sueltas absorben una porción importante de la energía, éstas últimas son las que mejor funcionan en la construcción portuaria.

En general, la energía del oleaje incidente se disipa por rotura, por la fricción con la superficie rugosa de los diques y por flujo dentro de la estructura; parte de la energía se transmite en la zona protegida por rebase y penetración.

Seeling (1983) presentó al coeficiente de reflexión como función del número de Iribarren.

$$K_R = \frac{aIr^2}{Ir^2 + b} \quad \text{ec(4.13)}$$

Donde: K_R : es el coeficiente de reflexión
 Ir : es el número de Iribarren
 a y b : son coeficientes que se obtienen de la Figura 4.3

Seeling propuso que el coeficiente "a" se determinara con el nomograma que se muestra en la Figura 4.3 que involucran variables como la altura de ola de diseño (H_b), la altura de ola en aguas profundas (H_i), la profundidad a la que se encontrará desplantada la estructura ($h=12$ [m]), longitud de onda en aguas profundas (L) y el talud (cota). Con estos parámetros se obtuvo que el valor de **a=0.44**. Mientras que para el coeficiente "b" se propone un valor de **b=5.5**.

Con estos coeficientes definidos y el número de Iribarren se calcula el coeficiente de reflexión con la ecuación 4.13 y se obtiene $K_R=0.29$.

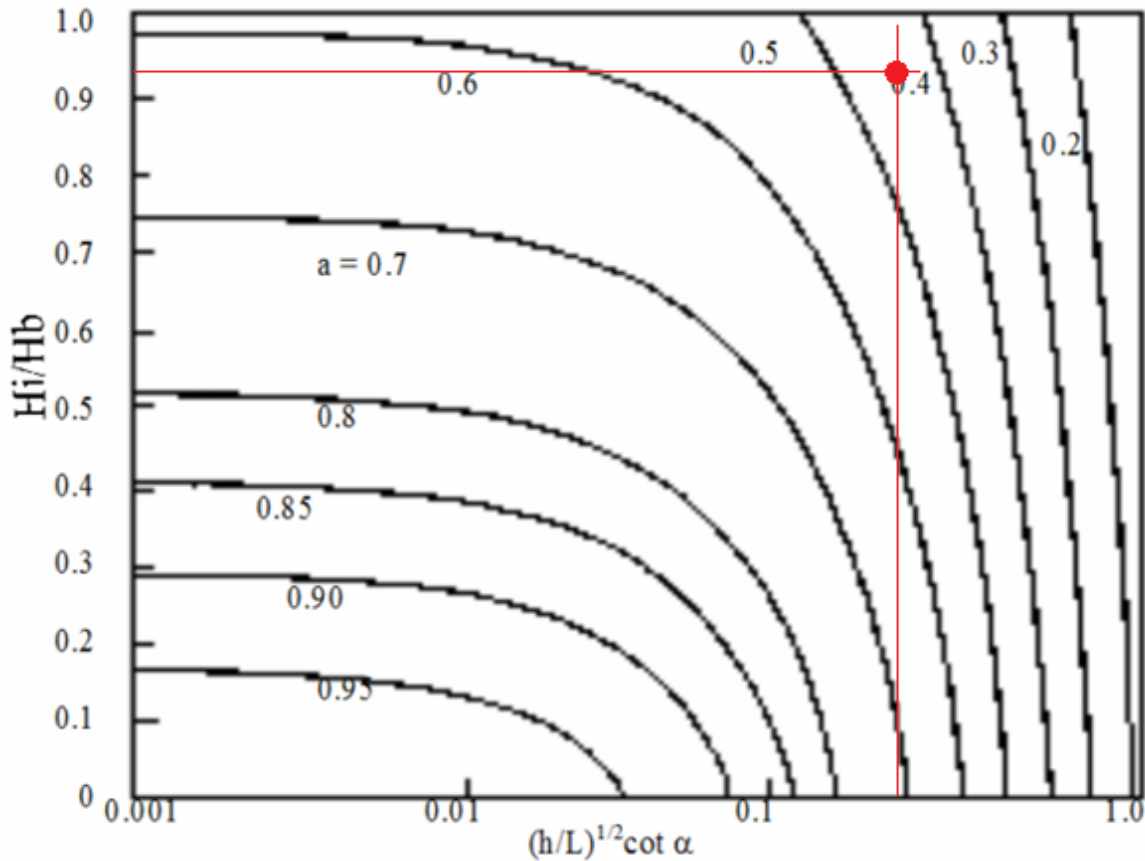


Figura 4.3 Valores de "a" para una capa en la coraza

El coeficiente obtenido es aceptable ya que se espera que parte de la energía del oleaje incidente sea disipada a través de los huecos generados por los elementos de la coraza, además que se perderá mucha energía porque se piensa que en el dique el oleaje romperá.

♦ Selección de las dimensiones de las piezas en la capa secundaria y el núcleo

Como se mencionó en el apartado de Run up, se debe tener una porosidad de $P=0.4$, y para lograr esto, las dimensiones de las piezas en la capa secundaria y el núcleo deben cumplir con lo mostrado en la Figura 4.2, es por esto que la dimensión de las rocas en la **capa secundaria** debe de ser de **0.45 [m]** de diámetro y las rocas a colocar en el **núcleo** deben de medir **0.23 [m]** de diámetro.

♦ Cálculo de las piezas del morro

El morro es la parte final del dique. Sobre esta parte de la estructura, la acción del oleaje es diferente, ya que su forma es diferente, generalmente semicircular. Esta forma provoca que para cada sector del morro el ángulo de incidencia del oleaje sea distinto.

Después de investigaciones, varios autores, propusieron que el peso de las piezas del morro se obtuviera a partir del peso de las piezas en la coraza, que se afectara por un factor dependiendo del nivel de daño en el morro.

Tabla 4.2 Factores de incremento del peso en las piezas del morro

Nivel de daño	Valor de factor de aumento de peso
Inicio de avería	1.5
Avería de Iribarren	1.9
Inicio de destrucción	2.5

De acuerdo con la Tabla 4.2, y considerando un nivel de daño "Inicio de Avería", se debe de incrementar 1.5 veces el peso de las piezas de la coraza para obtener el peso de las piezas del morro, de tal manera que se propone que los cubos en el morro sean de **1.05 [m]de lado**, lo que resultaría **un cubo con volumen de 1.16 [m³]** y un **peso de 2.78 [Ton]**.

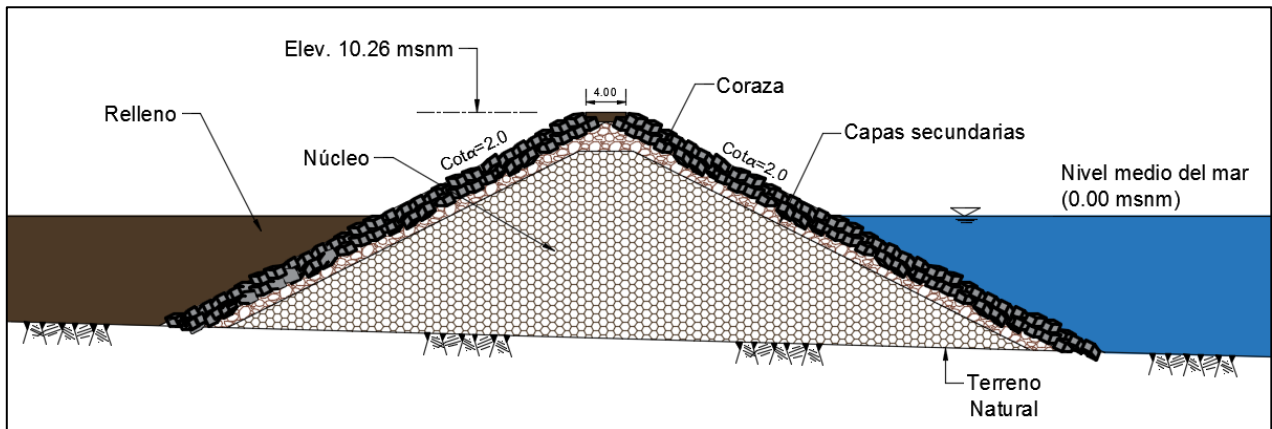


Figura 4.4 Sección de la obra de protección marginal

5. DISEÑO DE LA PLAYA

La costa se define como la zona terrestre que colinda con el mar, siendo la línea de costa la línea que divide al medio marino del medio terrestre. Sin embargo, es complicado establecer límites bien definidos a la zona costera, pues su extensión comprenderá el área de plataforma continental y costa en la que los procesos morfodinámicos estén determinados por la dinámica del mar.

Se considera como playa la zona que abarca desde la línea de máximo alcance oleaje hasta la profundidad correspondiente a la zona donde deja de producirse movimiento del sedimento por acción del oleaje.

El perfil de una playa se define haciendo un corte transversal, perpendicular al borde la playa y es la variación de la profundidad del agua con la distancia de la línea de costa en dirección normal a la misma.

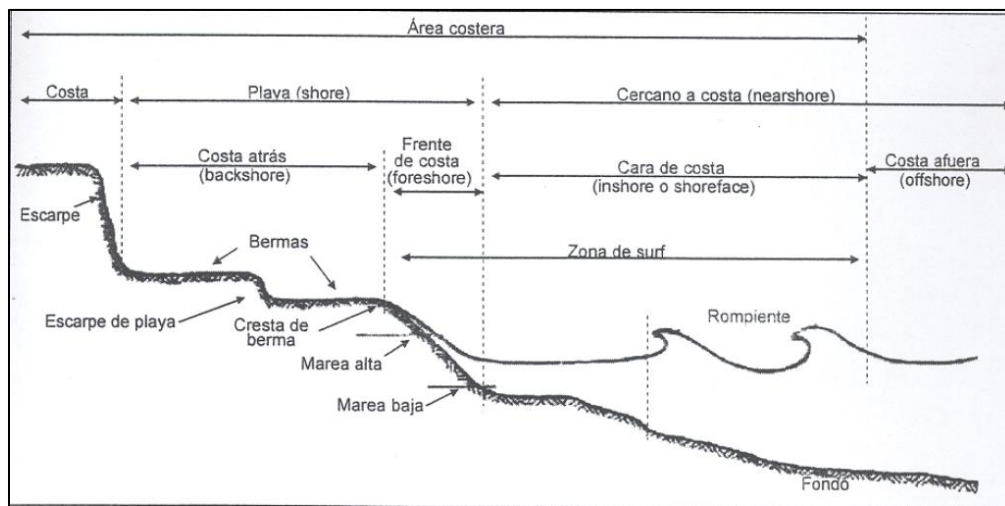


Figura 5.1 Zonificación y partes del perfil de playa

El perfil de las playas cambia constantemente como respuesta a los cambios de transporte transversal de sedimentos que produce la acción del mar, especialmente el oleaje. Los cambios más notorios son los asociados a los desplazamientos de las barras de arena y avance o retroceso de la berma.

La interacción entre el medio marino y el medio terrestre tiene una influencia directa en el perfil de la playa, cuya forma está dada por las fuerzas que actúan sobre la arena que conforma la playa. Si no existiera el oleaje, la playa tendría un perfil lineal con una pendiente correspondiente al ángulo de reposo de la arena. Sin embargo, en la realidad y bajo la acción del oleaje, el perfil de la playa generalmente presenta una concavidad hacia arriba con pendientes menores a las correspondientes al ángulo de reposo de la arena.

Durante una tormenta se establece un estado de mar confuso dentro de la zona de rompientes y las olas llegan a la playa desde diferentes direcciones. En este proceso una gran cantidad de arena es removida de la superficie de la playa y transportada hacia costa afuera, formando barras de arena

en aguas relativamente profundas. A medida que estas barras crecen, la zona de rompientes se traslada hacia la costa afuera. De esta forma las olas rompen cada vez más lejos de la costa y disipan una cantidad considerable de energía antes de llegar a la playa. La erosión de la playa disminuye hasta que finalmente cesa. Después de haber pasado la tormenta, los depósitos de arena que han sido arrastrados mar adentro, regresan a la playa por la acción de olas moderadas. La playa así queda lista para la siguiente tormenta.

Todo este proceso forma parte de un estado de equilibrio en el que intervienen fuerzas destructivas y constructivas que actúan sobre la arena y están en balance manteniendo un perfil de playa correspondiente al estado de equilibrio.

5.1. PERFIL DE LA PLAYA RESTAURADA

Como se estableció anteriormente, un perfil de playa en equilibrio es el resultado de las diferentes interacciones que existen en la línea de costa. Si en un laboratorio se monta una playa de arena y se le aplica un oleaje constante durante un largo tiempo, al final de la prueba se tendrá un nuevo perfil que cambiará muy poco con el tiempo. Este será el perfil de playa en equilibrio para la playa artificial construida.

El perfil de equilibrio representa, junto con la planta de equilibrio, uno de los pilares básicos en los que se sustenta el concepto de playa de equilibrio, entendiendo como tal la configuración a la que tiende la forma de playa bajo una situación estacionaria de la dinámica actuante. Si bien en sentido estricto esta configuración de equilibrio no existe en la naturaleza, puesto que no existe dicha condición estacionaria, este concepto "ideal" de una playa permite tener una representación aproximada, pero fiel, de la morfología de una playa.

En el caso de perfil de playa las aplicaciones de este "perfil de equilibrio" son múltiples destacándose su utilización en las obras de regeneración y restauración de playas y en múltiples modelos numéricos y conceptuales que han de suponer una configuración previa de la morfología del perfil de playa.

En lo que se refiere al primer aspecto, el perfil de equilibrio es utilizado, junto con la planta de equilibrio, en la cubicación del volumen de arena necesario en una regeneración de playa o en el dimensionamiento de las longitudes y cotas de obras de protección del litoral. Además de lo anterior el perfil de equilibrio es utilizado, como ya se ha dicho, en numerosos modelos numéricos y conceptuales de los llamados "procesos" que requieren tener información de alguna característica de los perfiles de playa.

El objetivo de los modelos de forma en planta de playas es la predicción de la misma. La separación entre modelos de evolución y modelos de equilibrio estriba en la escala de tiempos sobre la que se realiza la predicción. Los modelos de evolución, pretenden determinar el cambio de la línea de costa en la escala de los estados de mar, es decir, horas, mientras que los modelos de equilibrio determinan la forma en planta "de equilibrio" media en escalas de tiempo del orden de meses o estaciones.

Para el fin de este trabajo sólo se consideró el desarrollo del estudio de la planta de la playa en equilibrio.

♦ Planta de equilibrio

La forma en planta que describe la línea de orilla de las playas es un tema intensamente estudiado en Ingeniería de Costas. Se trata de métodos de ajuste basados en la observación y estudio de bahías naturales. No obstante, los autores reconocen la posibilidad de que puedan adaptarse al diseño de playas encajadas entre diques artificiales. Estos estudios se centran en la obtención de la curva que define la línea de orilla bajo la influencia de un polo de difracción.

Los primeros intentos para caracterizar la curva de una bahía de equilibrio adoptaron la forma de la espiral logarítmica. La función espiral logarítmica fue descrita por descartes como la curva cuya tangente forma un ángulo constante con los radios emitidos desde su polo (ángulo característico de la espiral), matemáticamente se expresa en coordenadas polares. En la Figura 5.2 se puede observar la forma que adopta.

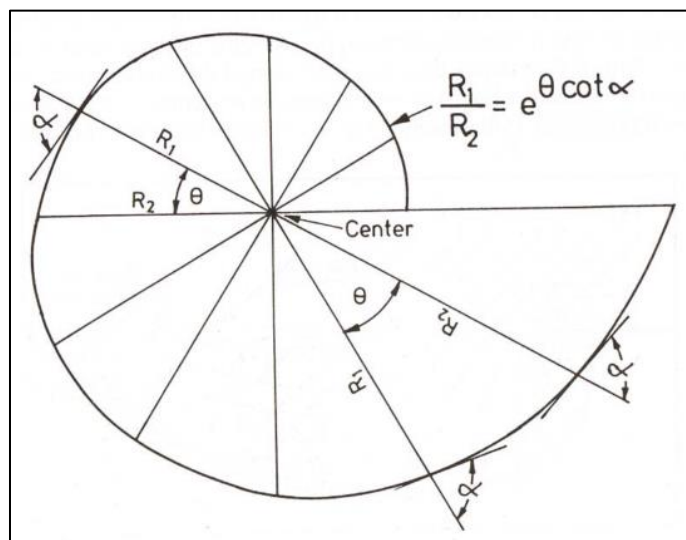


Figura 5.2 Representación de la curva espiral logarítmica

La expresión matemática que la caracteriza es:

$$\frac{R_1}{R_2} = e^{\theta \cot \alpha} \quad \text{ec(5.1)}$$

Un segundo ajuste propuesto por varios autores son los parabólicos. Son aquellos que establecen que la bahía de equilibrio queda determinada por un polinomio de segundo grado. Se desarrollan para mejorar el ajuste, en comparación con las formas logarítmicas, en las secciones más alejadas del polo de difracción, allí donde la costa tiende a ser rectilínea.

Hsu-Silvester-Xia (1987) caracterizan la curva que describe una bahía de equilibrio mediante un sistema de coordenadas polares con origen en el punto de difracción de la bahía. El origen en ángulos lo toman respecto al eje que define la dirección de las crestas del oleaje incidente en el punto de difracción. Sitúan un punto de control en el límite de aguas debajo de la bahía, de coordenadas (R_0, β) , y observan que β , ángulo formado entre las crestas del oleaje y la línea de control, coincide con el ángulo formado por la tangente a la bahía de equilibrio y línea de control.

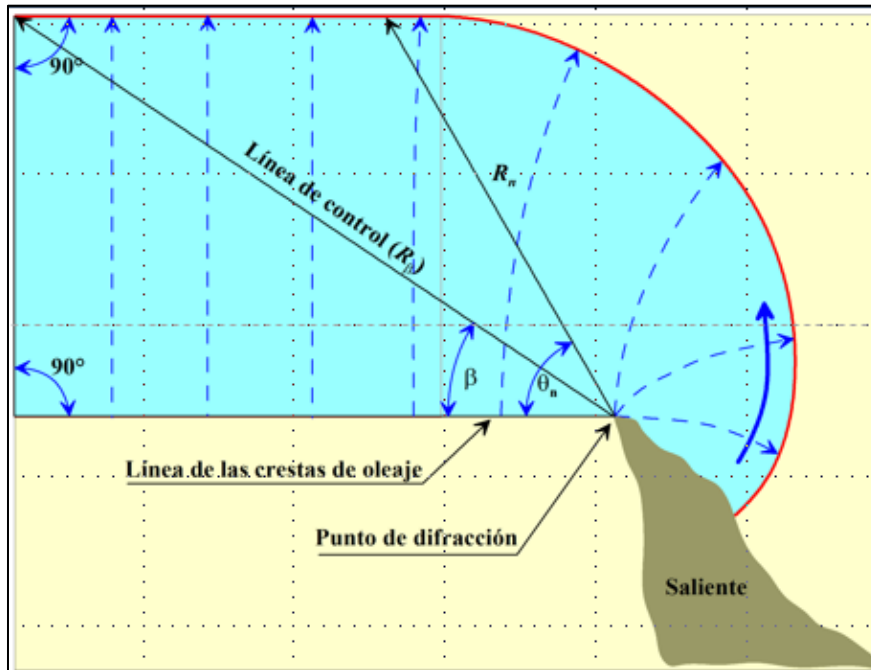


Figura 5.3 Esquema de representación de la curva descrita en los ajuste parabólicos

Posteriormente, Hsu-Evans (1989) realizan de nuevo una revisión a los de Ho (1971) a los que añaden análisis de algunas bahías naturales situadas en la costa de Australia, supuestas en equilibrio estático. Con esta información, obtienen una relación parabólica que supone la introducción del ajuste parabólico propiamente dicho. La relación que proponen es la siguiente:

$$\frac{R_n}{R_\beta} = C_0 + C_1 \frac{\beta}{\theta_n} + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta_n} \right)^2 \quad \text{ec(5.2)}$$

Hsu-Evans (1989) determinan que los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 son función del ángulo de incidente del oleaje β .

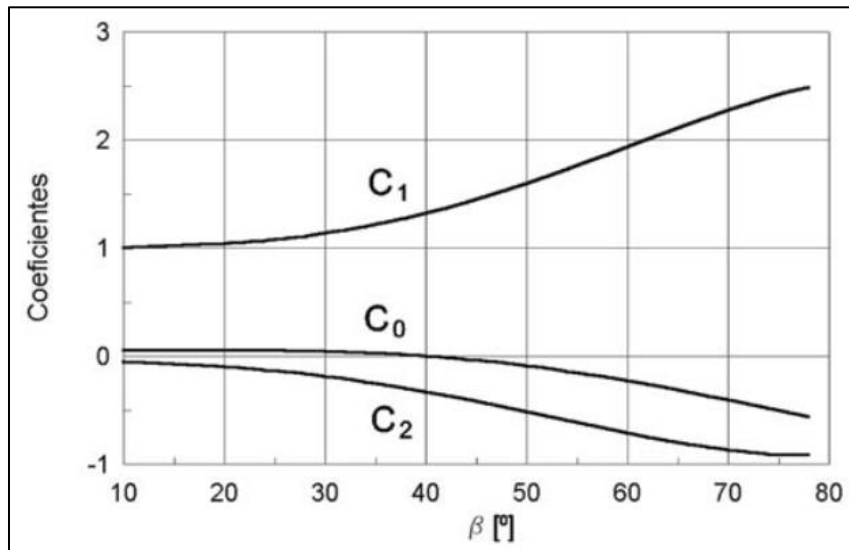


Figura 5.4 Correlación entre coeficientes y ángulo de incidencia del oleaje

◆ Diseño del perfil de la playa en planta

Para el diseño de la planta se siguió la metodología del ajuste parabólico:

1. La dirección de la obra de protección será paralela a la línea de costa en la margen izquierda.

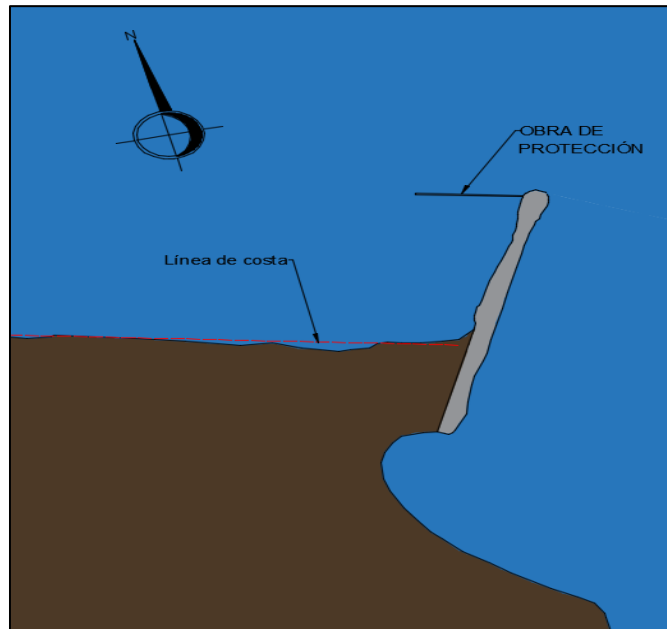


Figura 5.5 Dirección y ubicación de la obra de protección

2. Se propone una longitud de obra (R_0) y se obtiene el valor del ángulo β , este ángulo es el que se forma entre la obra de protección y la línea (línea de control) que une el morro de la estructura y el inicio donde la costa tiende a ser constante (punto de equilibrio).

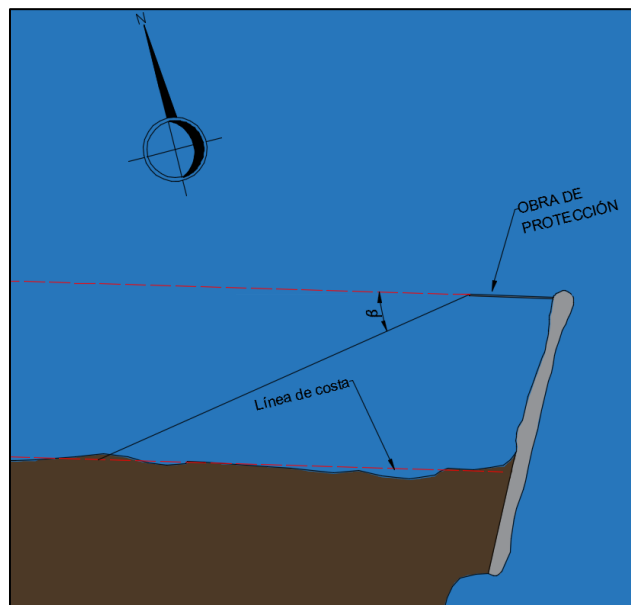


Figura 5.6 Valor del ángulo β

- Se obtiene los valores de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 . A partir de estos valores se traza la parábola a partir de la ecuación 5.2, en donde R_β es la longitud que hay entre el morro de la obra de protección y el "punto de equilibrio". Se propone que el ángulo θ_n sea pequeño ($1^\circ < \theta_n < 10^\circ$) para que la forma de la parábola tenga una forma muy bien definida.

A partir del método antes descrito se evaluaron tres posibilidades de longitud de la obra. En las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se pueden observar los resultados de una obra de protección de 400 [m], 500 [m] y 600 [m], respectivamente.

Se observa claramente que entre mayor sea la longitud de la obra mayor será el volumen dentro de la zona a restaurar. Para una obra de protección con longitud de 400 [m] se tendría un área de restauración de 11,300 m²; con una obra con longitud de 500 [m] se restauraría un área de 15,250 m² y finalmente con una obra con longitud de 600 [m] se podría restaurar un área de 19,650 m². Se podría pensar que la mejor solución es la de 400 [m] pero se debe pensar que en un evento extremo (marea de tormenta provocada por un huracán categoría 3 o mayor) la obra de protección será rebasada y que posiblemente el relleno sea insuficiente para evitar que esta zona de nuevo sea dañada. Es por esto que se decide que la longitud adecuada sea la de 500 [m], ya que esta solución no está sobrada, en cuando a volumen de relleno, y es probable que para un evento extremo no se dañe esta zona, ya que si lo comparamos con los resultados que se muestran con una longitud de 600 [m], la playa restaurada está muy sobrada y sería mucho relleno en esta zona.

Es importante mencionar que una vez construida la obra de protección marginal, el relleno será artificial de material fino (arena) obtenido de bancos de material cercanos a la zona de proyecto, la forma en planta que se espera obtener se irá configurando con el paso del tiempo.

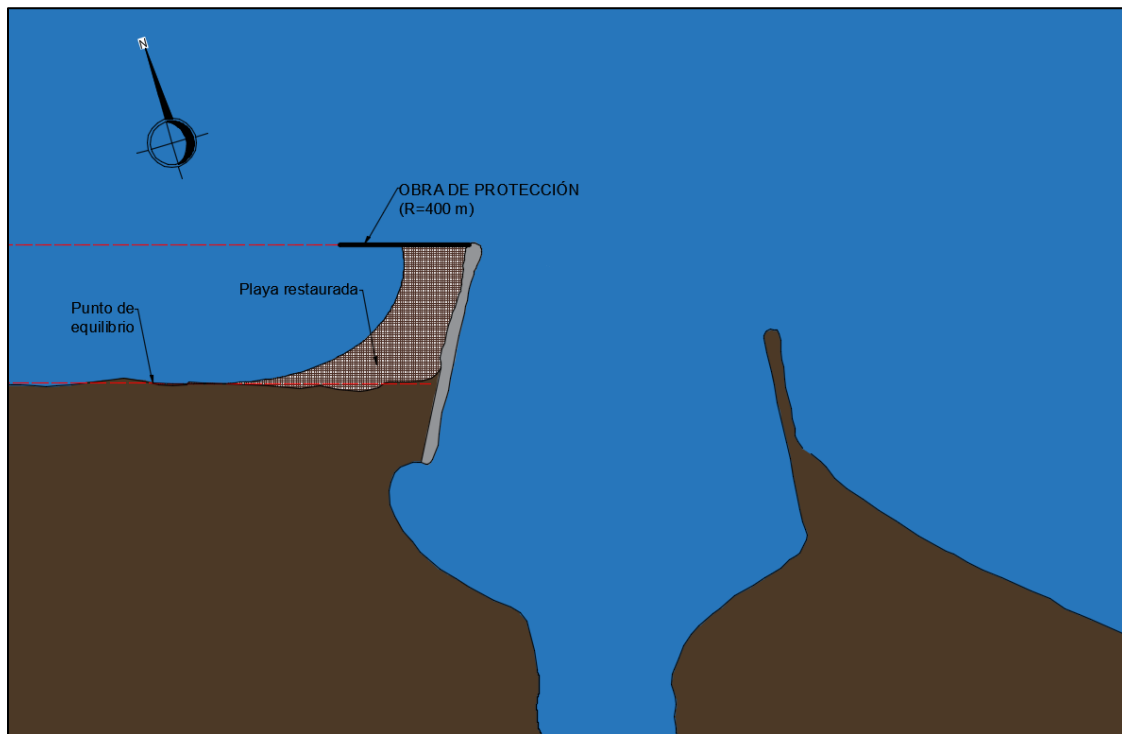


Figura 5.7 Playa restaurada con una obra de protección de 400 m

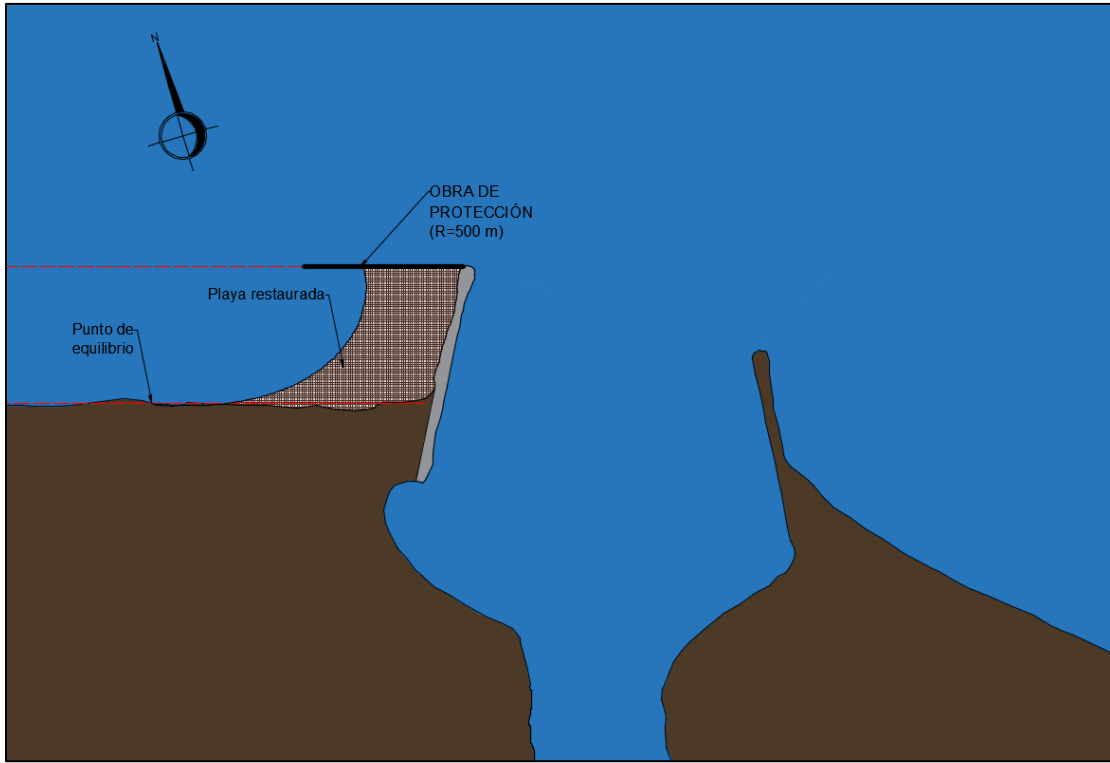


Figura 5.8 Playa restaurada con una obra de protección de 500 m

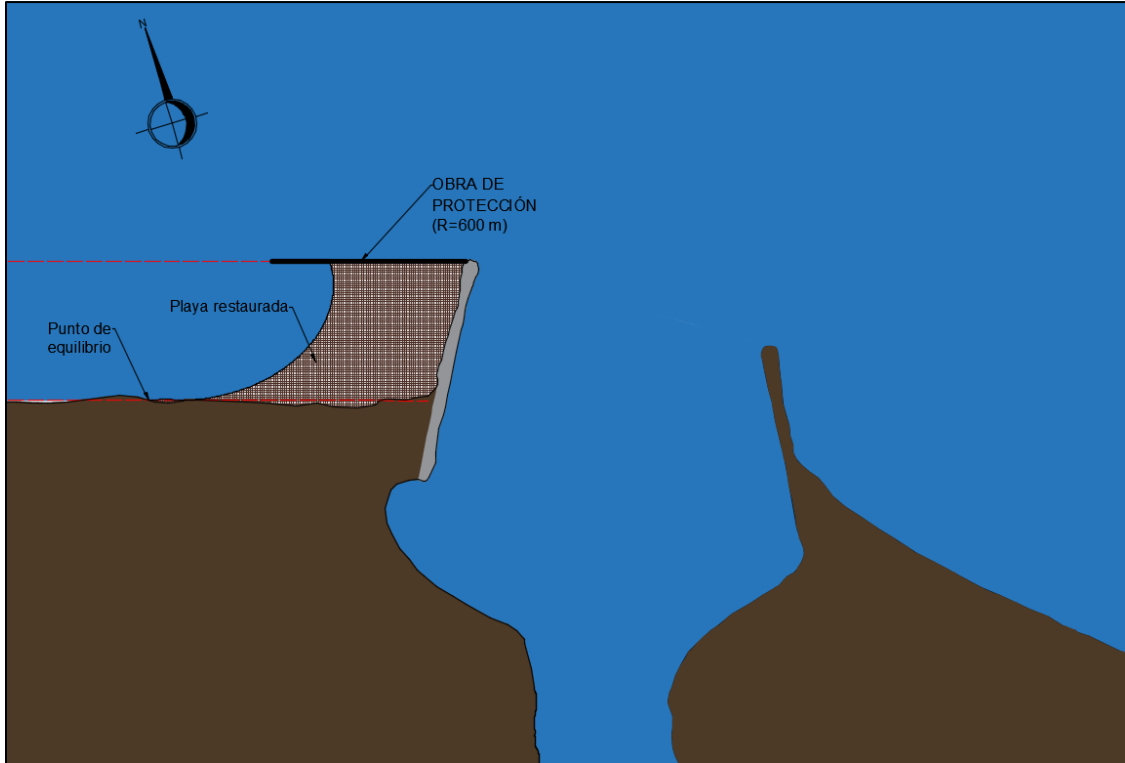


Figura 5.9 Playa restaurada con una obra de protección de 600 m

5.2. VOLUMEN DE RELLENO

Con la geometría en planta definida de la playa restaurada, así como la elevación de la playa necesaria para poder alcanzar la elevación de 0.00 msnm, se obtuvieron secciones transversales desde la línea de costa (0+000) hasta donde se encontrará la obra de protección (0+430). Debido a la falta de información batimétrica de esa zona, se propuso que en esos 430 metros que hay entre la línea de costa y la obra de protección la pendiente del terreno fuera uniforme ($S=0.0279$).

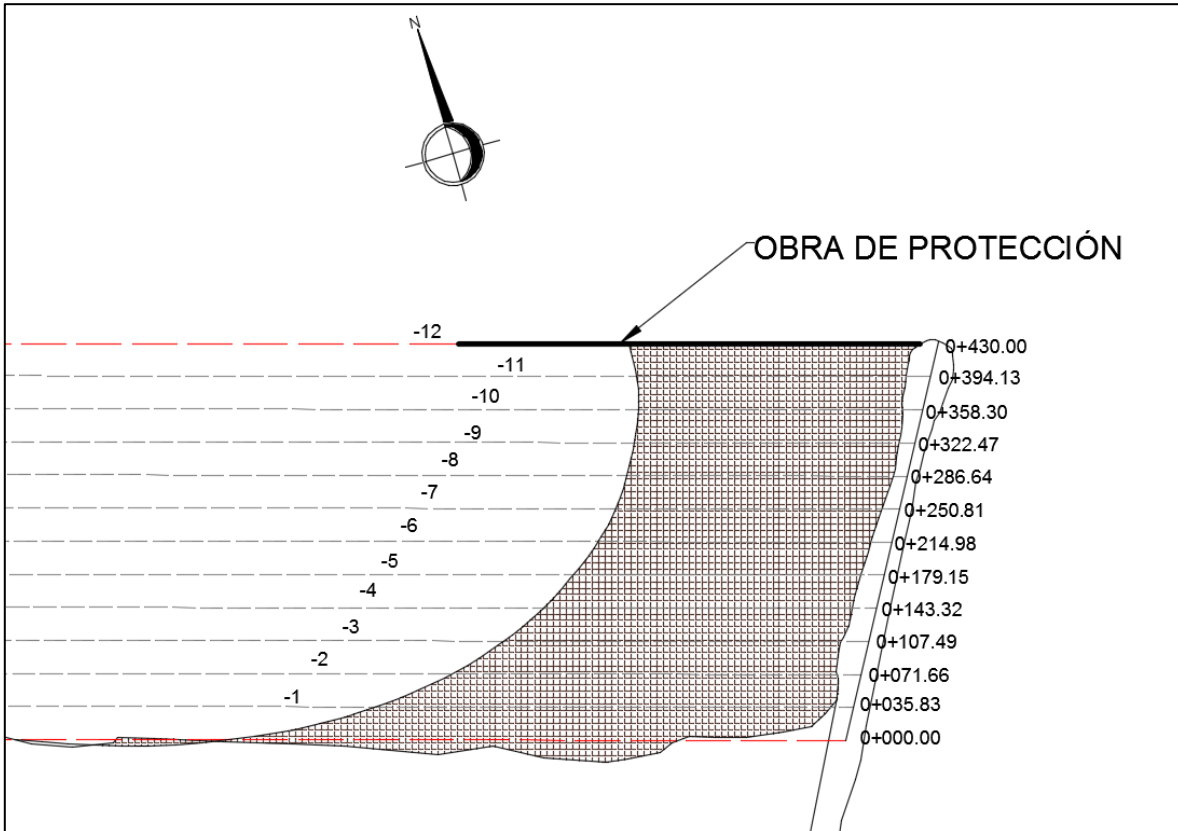


Figura 5.10 Batimetría y secciones de la zona de protección

Para la estimación de volumen de relleno, se realizó el siguiente método:

- i. Calcular el área correspondiente de relleno en cada sección transversal.

$$A_i, A_{i+1}, A_{i+2}, \dots, A_{i+n}$$

- ii. Obtener la distancia entre cada sección transversal.
- iii. Obtener el volumen promedio entre cada sección:

$$V_{\text{prom}} = \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) * D \quad \text{ec(5.3)}$$

Donde:

V_{prom} : es el volumen promedio entre las secciones i e $i+1$, en $[m^3]$

A_i : es el área de la sección i , en $[m^2]$

A_{i+1} : es el área de la sección $i+1$, en $[m^2]$

D : es la distancia entre dos secciones, en $[m]$

- iv. Obtener el volumen total de relleno correspondiente a la suma de volúmenes para todos los tramos entre secciones contiguas:

$$V_{Tot} = V_i + V_{i+1} + V_{i+2} + \dots + V_{i+n}$$

Donde:

V_i : es el volumen entre dos secciones, en $[m^3]$

V_{Tot} : es el volumen total, en $[m^3]$

En la siguiente tabla se muestra el cálculo del volumen de relleno.

Tabla 5.1 Cálculo del volumen de relleno

Estación	Curva batimétrica	Distancia [m]	Área $[m^2]$	Volumen $[m^3]$
0+000	0	0.00	0.00	0.00
0+035.83	-1	35.83	491.77	8,810.06
0+071.66	-2	35.83	833.68	23,745.44
0+107.49	-3	35.83	1,094.64	34,545.85
0+143.32	-4	35.83	1,339.96	43,615.86
0+179.15	-5	35.83	1,550.55	51,783.49
0+214.98	-6	35.83	1,774.02	59,559.67
0+250.81	-7	35.83	2,021.46	67,996.02
0+286.64	-8	35.83	2,311.44	77,623.90
0+322.47	-9	35.83	2,586.51	87,746.77
0+358.30	-10	35.83	2,861.50	97,601.10
0+394.13	-11	35.83	3,210.02	108,771.28
0+430.00	-12	35.83	3,780.00	125,226.21
			Vol. Total	<u>787,025.66</u>

El volumen total, aproximadamente, que se necesita de material para rellenar la playa restaurada es de **790,000 $[m^3]$** .

6. CONCLUSIONES

Se diseñó una obra de protección marginal que tiene la capacidad de responder a eventos de gran magnitud con la probabilidad de que ocurran al mismo tiempo, se siguieron recomendaciones y criterios de manuales que se especializan en este tipo de obras. Ejemplo de esto es la determinación del peso de los elementos que constituyen a las capas que integra la obra, donde se optó por ocupar la fórmula de Losada y Giménez-Curto que determina un peso recomendado para los elementos de la coraza y a partir de este peso se proponen los pesos de los elementos de las otras capas. Lo mismo se puede decir de la selección del talud de la estructura, donde el *US Army Corps of Engineers* establece intervalos de taludes de acuerdo al material y forma de los elementos de la coraza. El resultado es una obra de protección que cumple con los preceptos ingenieriles más importantes: funcionalidad y seguridad.

Además de tener una base teórica, que es indispensable para cualquier obra civil, se tiene que contar con fuentes que contengan datos e información precisos y confiables de los eventos a analizar. En este caso de estudio, las fuentes de información fueron: La base de datos del Instituto de Ingeniería para los datos de simulación del oleaje y el Centro de Control y Procesamiento de Datos (CECOPROD) de la Secretaría de Marina.; que además de cumplir con lo descrito cuentan con un registro de varios años lo cual da una garantía de que los resultado de los cálculos asociados a los registros son confiables.

Cuando se revisan con detalle las características generales del proyecto, da la impresión que se ha sobredimensionado. Se debe recordar que la obra diseñada es capaz de responder ante la ocurrencia de eventos extremos, que son resultado de los cambios en el clima a nivel global. Si bien resulta complicado integrar el efecto del cambio climático en el diseño se debe tomar como referencia y examinar los últimos eventos extremos registrados y así poder reducir o mitigar, en la medida de lo posible, la pérdida de playa en la margen izquierda de la desembocadura del río Papaloapan.

Por último, hay que mencionar que la protección costera o marginal es un aspecto complejo debido a nuestra interacción con la naturaleza y los factores que intervienen en el diseño de soluciones no son únicamente de índole ingenieril. La protección de zonas con problemas de erosión de playa debe tomar en cuenta aspectos de medio ambiente, sociales, económicos y políticos, que por lo general rebasan espacial y temporalmente el dominio que aparentemente abarca el problema en sí. Las soluciones a este tipo de problemas deben ser indudablemente de largo alcance en donde intervengan tanto el gobierno y la sociedad. También es importante mencionar que el relleno que se plantea establecer a partir de esta obra de protección debe estar en constante monitoreo, que a pesar de no contar con asentamientos humanos cercanos, puede propiciar a que esta nueva zona sea invadida por pobladores que afectaría de nuevo esta zona.

7. REFERENCIAS

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (1989), *Coastal Engineering Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 6 volúmenes.

Dirección General de Puertos de la SCT (2009), *Manual de dimensionamiento portuario*, México, 278 páginas.

Universidad Politécnica de Madrid (2000), *Introducción al diseño de obras de defensa*, España, 70 páginas.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1990), *Recomendaciones de Obras Marítimas (R.O.M.)*, España, 5 tomos.

Coastal Engineering Research Center (1984), *Shore Protection Manual*, E.U.A.

Copeiro, E. y García M. (2008), *Diques de escollera: Elementos del cálculo resistente y de la estima del oleaje*, España, 367 páginas.

Mendoza, E.; Silva, R.; Ávila, A.; Posada, G. y Martínez, E. (2003), *Apuntes especiales para el curso sobre las Recomendaciones para Obras Marítimas*, Tampico, México, 18 páginas.

Silva, R. (2005), *Análisis y descripción estadístico del oleaje*, México, 186 páginas.

Hsu, J.; Yu, M. y Benedet, L. (2010), *Coastal Engineering-Volume 57: Static bay beach concept for scientists and engineers: A review*, Estados Unidos, 16 páginas.