

Capítulo 1

Geomorfología e Hidrodinámica costera

1.1. Introducción a las costas

El primer problema que se encuentra al hablar de la costa es establecer su definición como tal. Así, se podría definir como el deslinde marítimo-terrestre, es decir la zona de influencia conjunta del mar y el continente. Por tanto, se puede definir como toda la zona comprendida entre los niveles máximo y mínimo alcanzables por el agua oceánica. El problema se plantea al definir estos niveles. Si a la variación de los niveles debidos a la marea, que en el caso del Cantábrico supera los 5,0 metros de altura, y depende de los ciclos lunares, no siendo igual cada día, se le suman las sobreelevaciones producidas por el oleaje, la variación de la presión atmosférica y otros posibles fenómenos atmosféricos (gota fría, etc.), tenemos una definición de niveles de carácter estadístico que dependerán del periodo de retorno que quiera considerarse para cada una de las variables del problema y su posible correlación en el tiempo.

Pero a estos niveles habrá que añadir el cambio producido en la morfodinámica costera a lo largo del mismo período de tiempo. Estamos acostumbrados a la desaparición de playas tras un temporal (especialmente ahora que la presión urbanística ha acabado en muchos casos con la zona dunar de alimentación de la playa), pero también las barras, flechas, embocaduras e incluso los acantilados rocosos sufren modificaciones, algunas perceptibles con claridad en un ciclo de vida humano, y otros casi imperceptibles, de escala geológica. ¿Pero hace cuanto tiempo era navegable el Guadalquivir hasta Cordoba?.

La idea de protección, y recientemente recuperación, del espacio costero y sus aledaños no es nueva. Basta una mirada atrás para darnos cuenta de la importancia que tiene, tenía y tendrá la costa y sus cercanías.

Decía Alfonso X “*El Sabio*” (siglo XIII) *las cosas que comunamente pertenecen a todas las criaturas que viven en este mundo son estas: (EL AIRE, EL AGUA DE LLUVIA, EL MAR Y SU RIBERA.) No se puede edificar en la ribera del mar de modo que se embargue el uso comunal de la gente.* Partidas de Alfonso X “*El Sabio*”...

1.2. Hidrodinámica costera: Corrientes de retorno, deriva y resaca

Definición: Son corrientes generadas dentro o cerca de la zona de rompiente

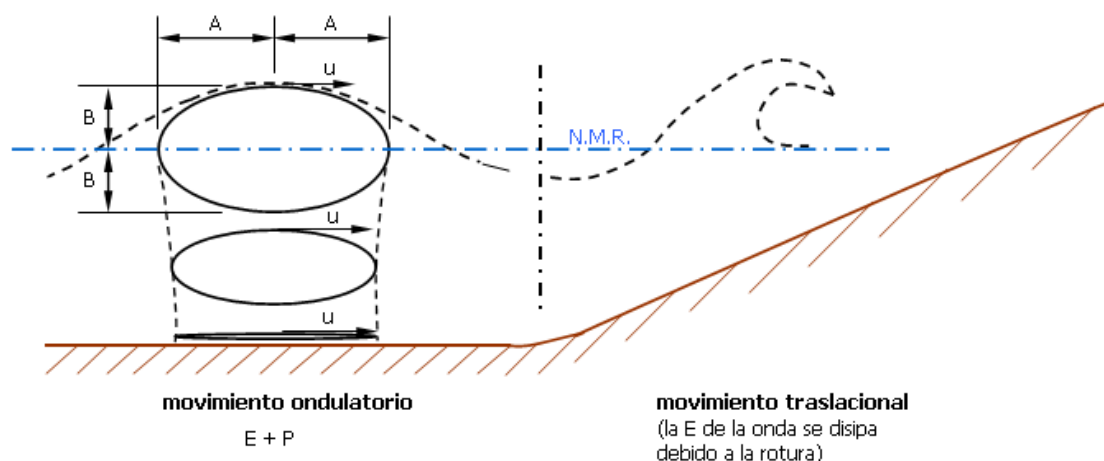


Figura 1.1: Movimiento ondulatorio y traslacional

En la zona de rompientes la energía de la ola se disipa debido a la rotura

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{CORRIENTES DE RETORNO} \\ \text{CORRIENTES DE RESACA} \end{array} \right\}$$

Existen tres tipos principales de corrientes en la zona de traslación-surf:

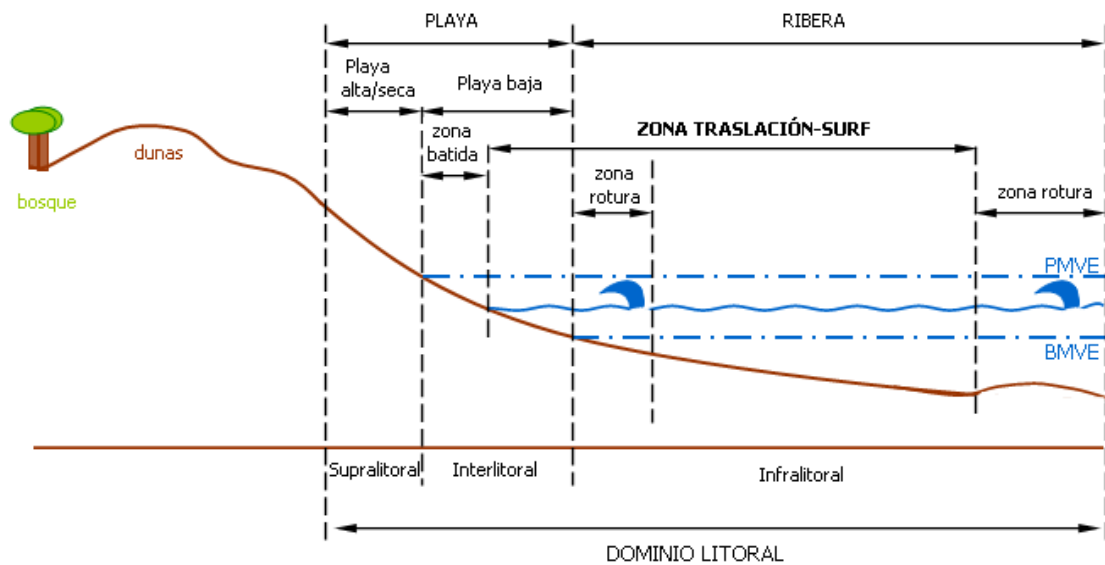


Figura 1.2: Zonas de una playa. Criterios Morfológicos y dinámicos (Komar y Davis, 1976)

Corrientes de resaca (Undertow) Perpendiculares a la costa

Corrientes de deriva (longitudinales) Paralelas a la costa

Corrientes de retorno (transversales) Perpendiculares a la línea de costa

Estas corrientes son debidas a la **oblicuidad** del oleaje con respecto a la línea de playa y a la **altura** del oleaje y a sus **variaciones** a lo largo de la playa. Estas corrientes se producen en la zona de traslación y batida del oleaje y en toda la zona de la costa en interacción con el oleaje.

1.2.1. Corrientes de resaca (Undertow)

Flujo de retorno tras la rotura. Flujo transversal a la costa, con dirección a mar abierto (adentro) y próximo a la superficie marina (fondo). La parte superior del flujo se dirige hacia adentro y la parte inferior (undertow) hacia el mar.

$$U_{res} = \frac{Q}{h_{tr}} \tag{1.1}$$

donde



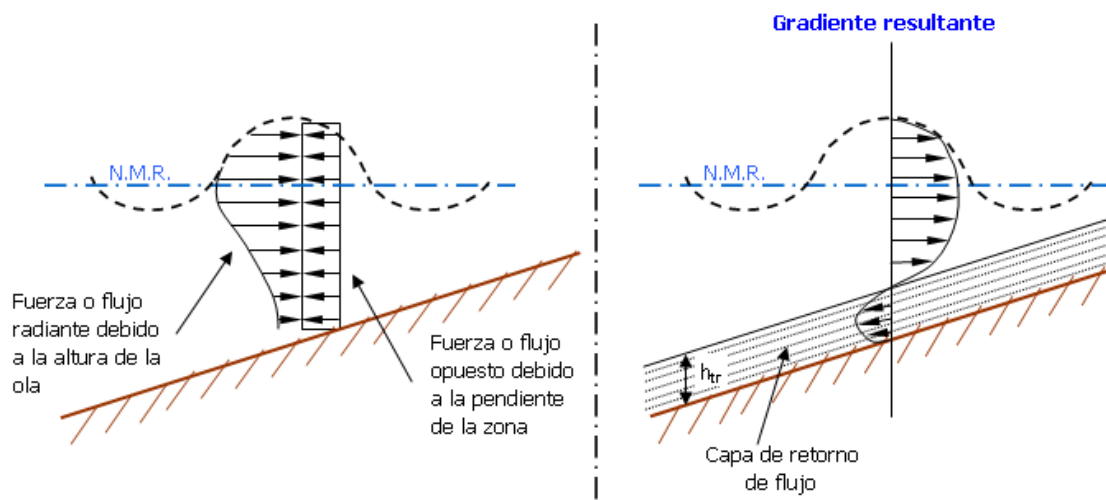


Figura 1.3: Perfil de velocidades. Corrientes de resaca

U_{res}	velocidad de corriente	(m/s)
Q	flujo neto en dirección a tierra	(m ² /s)
h_{tr}	profundidad de la lámina de H_2O	(m)

Valores normales de esta velocidad están en torno a 0,2/0,3 m/s; llegándose a registrar, en situaciones de alta energía y altura de ola (en rompiente) de 5 m, valores de 0,66 m/s cerca del fondo. En playas horizontales (planas) la corriente de resaca presenta un máximo en la parte media de la zona de translación.

Dependen principalmente de:

- ♣ H_b altura de ola en rompiente
- ♣ m pendiente de la playa
- ♣ $\frac{H}{L} \gg \Rightarrow U \gg$

1.2.2. Corrientes de retorno (Rip Currents)

Son debidas a variaciones en el gradiente de flujo, dependen de:

- ♣ Topografía

♣ H_b altura de ola en rompiente

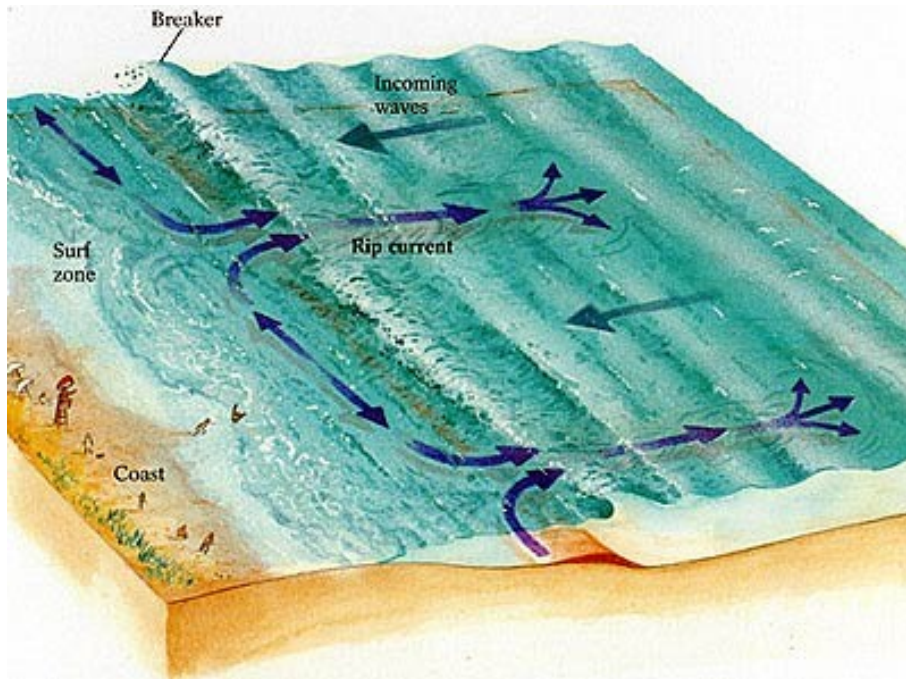


Figura 1.4: Corrientes de retorno. Rip Currents

Se deben principalmente a una segregación horizontal del flujo en la zona de traslación, en particular cuando existen variaciones horizontales en la superficie de la playa.

Son corrientes fuertes y estrechas que se dirigen mar adentro. Las zonas de retorno o rip son fáciles de observar ya que se forman turbulencias debido a la interacción de corrientes. Podemos identificarlas por la formación de intermitencias en la línea de costa o por haber zonas más oscuras, mayor profundidad, que se produce en estas zonas. Desempeñan un papel importante en el transporte de sedimentos fuera de la playa, ya que erosionan la playa. La corriente de retorno se suele dividir en tres zonas:

Corrientes de Alimentación (Feeders)

que fluyen hacia el rip paralelamente a la costa.

Cuello del Rip (Rip Neck)

donde las corrientes de alimentación convergen en un flujo estrecho y rápido que se mueve hacia el mar a través de la zona de rompientes.

Cabeza del Rip (Rip Head)

situado del lado del mar de la zona de rotura, donde se expande y disipa el Rip.

La velocidad de estas corrientes se define como:

$$U_{rip} = \frac{Q \cdot \lambda_{rip}}{A_{rip}} \quad (1.2)$$

donde

U_{rip}	velocidad de corriente	(m/s)
Q	flujo neto en dirección a tierra	(m ² /s)
λ_{rip}	distancia entre canales de retorno	(m)
A_{rip}	área de la sección transversal del canal	(m ²)

Las velocidades de estas corrientes U_{rip} en condiciones normales están en torno a 0,5m/s; en condiciones energéticas bajas o medias $U_{rip} > U_{res}$.

1.2.3. Corrientes de deriva

Son corrientes continuas, paralelas a la costa (longitudinales) dentro del área de batida y traslación del oleaje y debido a las altas velocidades que pueden alcanzar, del orden de 1,5m/s transportan una gran cantidad de sedimento. Se generan cuando el oleaje entra de modo oblicuo sobre la costa.

*** INSERTA IMAGEN

Estas corrientes dependen principalmente de:

- ♣ H_b altura de ola en rompiente
- ♣ mareas, en pleamar $U_{der} \gg$
- ♣ vientos, si soplan paralelos a la costa y en playas con poco pendiente $U_{der} \gg$

1.3. Geomorfología costera: Formas costeras

Dominio litoral (Díaz del Río, 1991)

es la zona de tránsito entre el continente y la plataforma continental, perfectamente caracterizada por ciertos atributos geológicos y por procesos geodinámicos y oceanográficos específicos. Es posible identificar tres sectores en razón de la diferente intensidad con la que actúan los procesos naturales y los productos que generan:

Supralitoral compuesto fundamentalmente por la zona continental emergida que queda expuesta a una menor influencia de los agentes marinos, destacando la acción de los frentes de oleaje en momentos de tormenta.

Interlitoral es la zona más influenciada por el ambiente marino y normalmente sometida a inundaciones.

Infralitoral abarca desde el límite superior de acción del oleaje hasta el nivel inferior de influencia de dicho oleaje. Esta zona es la de mayor energía. Su anchura es muy variada, dependiendo enormemente del lugar dónde nos encontremos, estando en relación directa con la intensidad del oleaje, siendo su profundidad media del orden de 20 m o menos.

La Costa

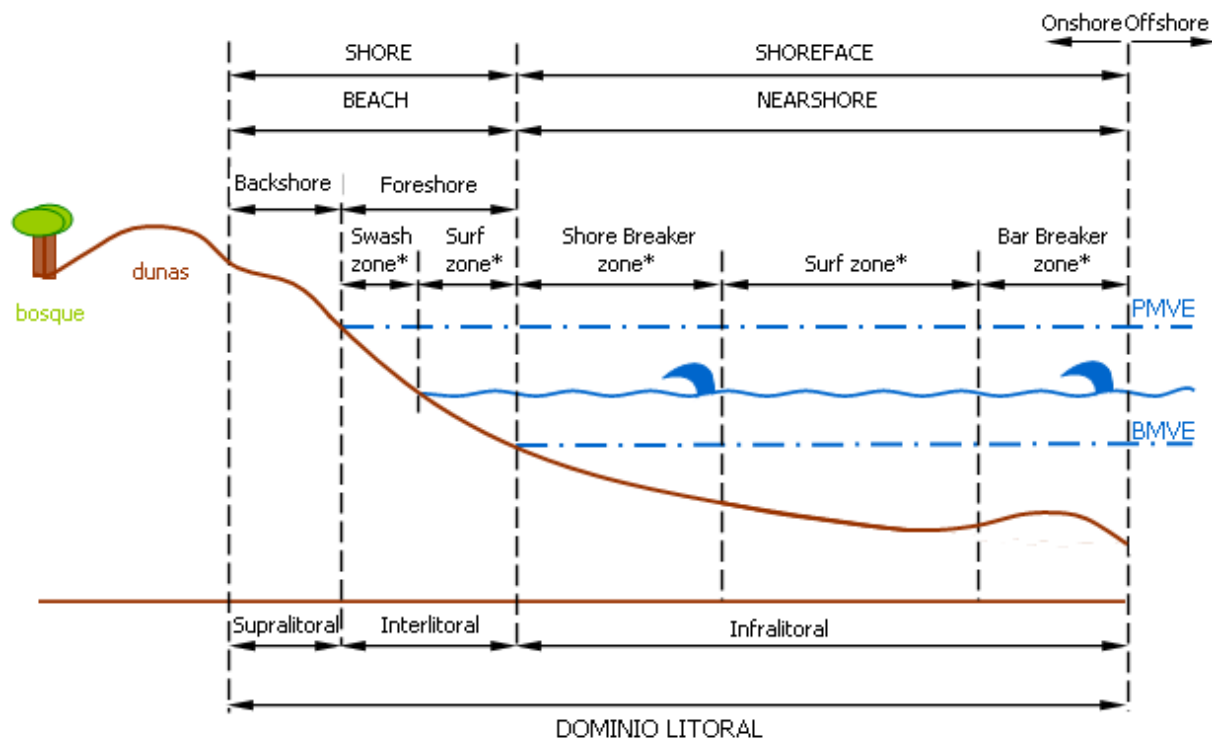
es un componente del Dominio Litoral que tiene fundamentalmente un valor paisajístico y de límite o discontinuidad cartográfica. Es el conjunto paisajístico comprendido por el Supralitoral y el Interlitoral. La costa es un componente del Paisaje Litoral y por lo tanto una parte inseparable de él.

Según Komar (1998) **La Costa** es la zona de confluencia marítimo terrestre en la que se incluirían las playas, los acantilados, los campos de dunas y los estuarios o marismas. Está formada por dos ambientes:

Terrestre (tipo continental) transporte de tierras, sedimentos, ...

Marítimo (tipo marino) efectos del oleaje

Según la Demarcación de Costas del Ministerio de Medio Ambiente, **La Costa** es la franja del territorio que linda con el mar, en la que son sensibles los efectos de los agentes que gobiernan los procesos litorales; oleaje, mareas, corrientes y vientos, y en la que se deja sentir la influencia social y económica que el atractivo del mar genera en su entorno.



* La localización y la anchura varían con las condiciones del oleaje

Figura 1.5: Perfil completo de una playa, Brown et al. (1989)

Términos costeros

- ♣ Beach-Playa
- ♣ Shore-Orilla-Costa
- ♣ Backshore-Playa alta
- ♣ Foreshore-Playa baja
- ♣ Offshore-Mar abierto
- ♣ Nearshore-Ribera cercana

Tipología y longitud de la costa española

- ♣ 7.883 Km de costa
- ♣ 10 Comunidades Autónomas
- ♣ 25 Provincias

- ♣ 478 Municipios
- ♣ Costa Peninsular 4.990 Km
- ♣ Baleares y Canarias 2.890 Km

Tipos

- ♣ Acantilados 4.021 Km 51,1 %
- ♣ Costa baja 1.270 Km 16,0 %
- ♣ Playas 1.991 Km 25,3 %
- ♣ Obras artificiales 600 Km 7,6 %

1.4. Tipos de costas. Ejemplos

Playas

Es una de las formas costeras más extendidas por el mundo. Se define como una acumulación de sedimento no consolidado, de pendiente suave, en el borde del mar u otro cuerpo grande de H_2O , formadas por la acción del mar o del viento marino u otras causas naturales o artificiales. El límite tierra adentro viene marcado por un cambio brusco en la topografía.

Zonación

Las dos zonas principales son:

- ♣ Foreshore-Playa baja
- ♣ Backshore-Playa alta

Sedimentos

Pueden ser de arenas ($0,062 - 2mm$) o de cantos, gravas o guijarros ($> 2mm$).

Deltas (Dominados por el proceso fluvial)

Son acumulaciones de sedimentos fluviales adyacentes o en las proximidades de la desembocadura de un río. Suelen formar depósitos que posteriormente son modelados por la acción del oleaje, corrientes o mareas. La característica principal de un delta es un aporte de sedimentos fluviales a la costa mayor que el que los procesos marinos pueden removilizar y transportar a otros lugares. En general, en un delta, se pueden distinguir cuatro zonas diferentes:

- ♣ Valle fluvial

- ♣ Llanura deltaica alta
- ♣ Llanura deltaica baja
- ♣ Llanura deltaica subacuática

Según el criterio de Coleman y Wright, 1975, existen 6 tipos de deltas.

Estuarios (Dominados por el proceso marino)

Son cuerpos confinados de agua que ocupan las partes bajas de los valles fluviales.

Se producen por elevación del nivel del mar o por hundimiento tectónico, lo que da lugar a la mezcla de aguas marinas y fluviales; mezcla de sedimentos y de procesos de transporte.

Acantilados

Formación más o menos escarpada en contacto con el mar. Se considera acantilado siempre que formen un ángulo de 60° con la horizontal desde su base hasta su coronación. Son debidos a erupciones volcánicas o a levantamientos asociados a procesos volcánicos locales; a procesos de movimientos en la vertical de bloques de la corteza; también pueden ser de origen tectónico, incluso por erosión de líneas de costa previas. El principal agente de erosión es el oleaje, sobre todo en la base del acantilado. En un acantilado suelen distinguirse tres partes: rasa, frente y pie.

Dunas y Antidunas

Formas de lecho de las playas, de dimensiones horizontales del orden de metros y verticales del orden de decímetros (pequeña escala), que aparecen en ocasiones en la zona de rompientes de las playas. Su crecimiento y desarrollo se encuentra principalmente condicionado por los aportes de sedimentos. Tienen una función protectora de la orilla y actúan como depósito. Generalmente formadas por sedimentos secos.

Tómbolo

Saliente de arena producido por la presencia de una isla, arrecife emergido natural o estructura artificial, debido al cambio de la dinámica del oleaje provocado por la estructura. En el tómbolo, el saliente de arena se une a la estructura, formando un espigón natural de arena entre la costa y la isla o estructura.

Saliente o hemitómbolo

Saliente de arena con el mismo origen del tómbolo o debido al encuentro de dos corrientes costeras opuestas. En el caso de estar producido por una estructura, el saliente no alcanza la misma.

Cordón litoral, puntal o flecha

Cordón arenoso paralelo a la dirección general de la línea de costa, producido por los cambios de dirección de la línea de costa, en zonas con importante transporte longitudinal de sedimentos. En determinadas costas de plataforma somera, los cordones litorales pueden surgir por transporte transversal del sedimento. Cuando el cordón tiende a cerrar una bahía en zonas mareales o con aportación fluvial importante, el cordón alcanza un equilibrio con el prisma de marea o con el caudal fluvial. En zonas sin marea, o con poca aportación fluvial, el cordón puede llegar a cerrarse casi completamente, dejando en la zona de tierra una laguna salobre o dulce denominada albufera.

Islas barrera

Si un cordón litoral queda separado por dos salidas al mar de la marisma interior, se denomina isla barrera. Son alineaciones estrechas, de sedimento arenoso, que se elevan sobre el nivel del mar. Normalmente son paralelas a la costa.



Figura 1.6: Isla barrera

Marismas

Las costas de tipo marisma se desarrollan sobre zonas bajas, de poca pendiente y alta concentración vegetal, sujetas a inundaciones periódicas. Tres factores han de cumplirse para la formación de marismas:

1. abundante entrada de sedimentos a la zona
2. baja energía del oleaje
3. muy baja pendiente

Costas volcánicas

Son las asociadas a terrenos volcánicos más o menos activos. Desarrolladas en materiales fácilmente alterables (cenizas, lavas, ...) o sobre materiales altamente resistentes (basaltos) lo que da lugar a morfologías diversas.

Costas bio-construidas

Son las desarrolladas por la acción constructiva de organismos que viven en ella. Ejemplo: los arrecifes de Coral (se originan cuando los organismos vivos comienzan a crecer hasta colonizar el área en cuestión, elevándose hasta alcanzar la superficie). Suelen ser ambientes muy frágiles y muy susceptibles a las alteraciones y cambios ambientales: T^a , salinidad, etc . . .

1.5. La Ley de Costas

La costa es una porción más del territorio, está sujeta a los instrumentos de planeamiento territorial y urbanístico ordinarios, y está sometida, además, a las determinaciones protectoras establecidas en la Legislación de Costas:

- ♣ Legislación ambiental básica de ámbito estatal que fija los mínimos exigibles en la costa
- ♣ Las Administraciones competentes en materia de ordenación territorial y medio ambiente pueden ampliar sus determinaciones protectoras

La Legislación de Costas se fundamenta en la Constitución Española, que declara expresamente el dominio público estatal de

- ♣ la zona marítimo-terrestre y las playas
- ♣ el mar territorial

Según la Ley de Costas, el suelo de la Costa consta de una parte pública, **DOMINIO PÚBLICO**, y una parte privada, **DOMINIO PRIVADO**.

El **DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO-TERRESTRE**:

- ♣ Constituye la franja de la costa más frágil, sensible, apetecida y relativamente estrecha, por lo que merece un grado de protección especial.
- ♣ El destino natural de estos bienes es su uso libre, público y gratuito por todas las personas.

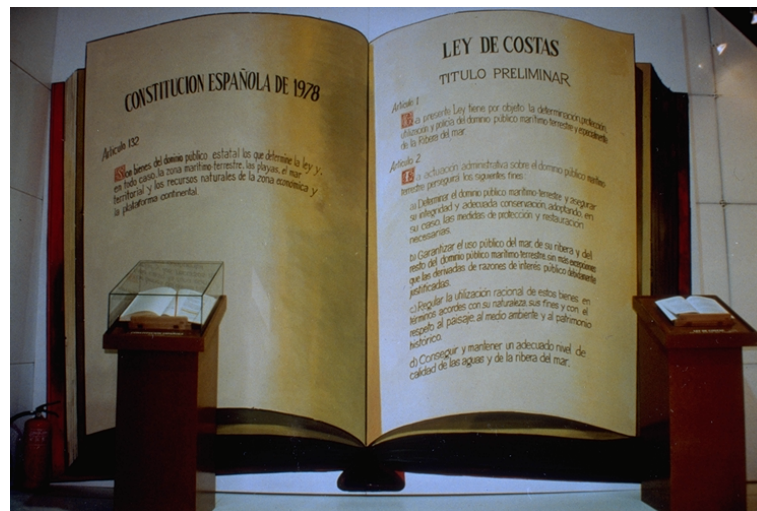


Figura 1.7: La Constitución y La Ley de Costas

- ♣ Los bienes integrados en el dominio público son inalienables, imprescriptibles e inembargables, es decir, no pueden ser objeto de apropiación ni de tráfico comercial alguno, ni siquiera por el Estado.
- ♣ En la Legislación Española se ha utilizado la calificación del **dominio público marítimo-terrestre** al servicio de una finalidad protectora, pues se pretende que su destino natural de uso común por todos sea compatible con el mayor respeto por su integridad física y paisajística.

Los bienes del **Dominio Público Marítimo-Terrestre** son:

1. La Rivera del mar:

La zona marítimo-terrestre

- a) Se refiere a tramos de “*costa rígida*”, o sea, constituida por rocas o materiales cohesivos, que sufren una modificación relativamente lenta como consecuencia de la acción del mar.
- b) Espacio comprendido entre la línea de bajamar máxima viva equinoccial, y el límite hasta donde alcanzan las olas en los mayores temporales conocidos.
- c) Marismas, albuferas, marjales, esteros y, en general, los terrenos bajos que se inundan como consecuencia del flujo y reflujo de las mareas, de las olas, o de la filtración del agua del mar.

Las playas

Zonas de depósito de materiales sueltos, tales como arenas, gravas y guijarros, incluyendo escarpes, bermas y dunas, tengan o no vegetación, formadas por la acción el mar o del viento marino, u otras causas naturales o artificiales.

2. Los acantilados:

son aquellos que forman un ángulo de 60° con la horizontal desde su base hasta su coronación.

3. Islotes:

siempre que no fueran ya de propiedad particular, en cuyo caso sólo su contorno pertenecería al dominio público marítimo-terrestre.

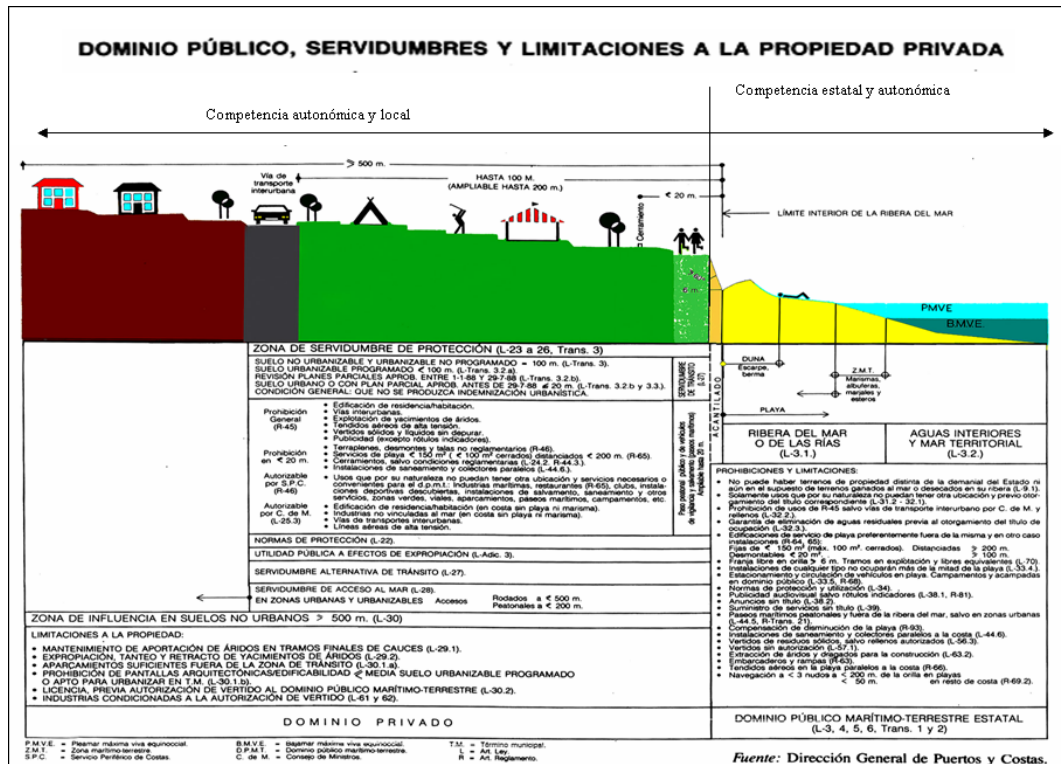


Figura 1.8: Dominio público, servidumbres y limitaciones a la propiedad privada

Y los usos que podemos hacer en el Dominio Público Marítimo Terrestre:

- ♣ Utilización libre, pública y gratuita para los usos comunes y acordes con su naturaleza, como estar, pasear, bañarse, navegar, embarcar, varar, pescar, coger



plantas y mariscos, y otros actos semejantes que no requieran obras ni instalaciones de ningún tipo y que se realicen de acuerdo con las leyes, reglamentos y normas que hayan sido aprobadas conforme a la Legislación de Costas.

- ♣ Otros usos admisibles: Requieren los títulos administrativos exigidos por la Legislación de Costas.
- ♣ Únicamente se podrá permitir la ocupación del dominio público marítimo-terrestre para aquellas actividades o instalaciones que, por su naturaleza, no puedan tener otra ubicación y en todo caso la ocupación deberá ser la mínima posible..

Los principales usos prohibidos:

- ♣ Edificaciones destinadas a residencia o habitación, incluyendo las hoteleras, cualquiera que sea su régimen de explotación.
- ♣ La construcción o modificación de vías de transporte interurbanas y las de intensidad de tráfico (paralelo a la costa) superior a 500 vehículos/día de media anual, salvo que hayan sido declaradas de utilidad pública por el Consejo de Ministros.

Las servidumbres legales del Dominio Público Marítimo-Terrestre consisten en limitaciones a la propiedad particular en tres bandas longitudinales a lo largo de la costa, que son las denominadas zonas de servidumbre **de tránsito, de protección, y de influencia**.

Zona de servidumbre de tránsito

Tiene una anchura de 6 m, contados a partir del límite interior de la ribera del mar (zona marítimo-terrestre o playa).

Zona de servidumbre de protección

Recae sobre una franja de 100 m, a partir del límite interior de la ribera del mar, que puede ser ampliada por la Administración General del Estado, de acuerdo con la Comunidad Autónoma y el Ayuntamiento correspondiente, hasta otros 100 m, cuando sea necesario para asegurar la afectividad de la servidumbre en atención a las peculiaridades del tramo de costa de que se trate.



Figura 1.9: Zona de servidumbre de tránsito



Figura 1.10: Zona de servidumbre de protección

Zona de servidumbre de influencia

Tiene una anchura de 500 m, desde el interior de la ribera del mar.

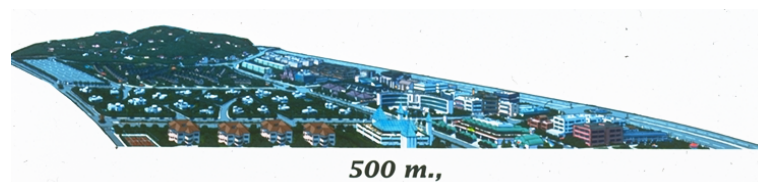


Figura 1.11: Zona de servidumbre de influencia

La problemática principal de la costa española reside en la degradación de ésta debido a la construcción masiva en la ribera del mar, sobre todo en los años sesenta y setenta. Esto ha repercutido directamente sobre el paisaje costero y ha provocado la desaparición de las playas.



Figura 1.12: Problemática de la costa española

Para intentar recuperar la costa y al mismo tiempo, protegerse de las acciones del oleaje, se suelen plantear dos tipos de soluciones. Una primera solución es la construcción de espigones y/o diques exentos, denominada solución dura y la otra posibilidad consistiría en una alimentación artificial de la playa existente y que se suele denominar blanda. Ambas soluciones pretenden recuperar la línea de costa original desaparecida debido a la alteración del equilibrio normal de una playa.

Actualmente, desde la Dirección General de Costas, se está llevando a cabo lo que se conoce como **la Gestión Integral de la Costa**. Ésta, pretende evitar la concentración urbanística y las construcciones frente a la orilla del mar y propiciar un modelo que permita mantener la orilla del mar libre de edificaciones para garantizar su protección y poder dedicarla al uso común del dominio público. Sus líneas principales de actuación son:

- ♣ Recuperación de playas y dunas

- ♣ Reubicación de edificaciones
- ♣ Defensa natural de la costas
- ♣ Regeneración del espacio natural
- ♣ Bajos costes de mantenimiento y reparación:
 - ♠ Protección natural de la costa
 - ♠ Edificaciones alejadas del borde del mar
- ♣ Eficacia a largo plazo: recuperación integral de la costa



Figura 1.13: Solución rígida y blanda



Figura 1.14: Gestión integral de la costa

1.6. Marea astronómica y meteorológica

Son variaciones del nivel del mar que no tienen que ver con el oleaje.

Según la clasificación de Kinsman (1965) [3]:

En c.n. la superficie del mar experimenta variaciones de nivel producidas fundamentalmente por dos causas simultáneas:

- ♣ el tiempo atmosférico
- ♣ la atracción gravitatoria

Estas variaciones constan de movimientos periódicos y movimientos irregulares que se superponen de manera que toda medida de elevación de la columna de H_2O en un instante t tiene tres componentes:

$$X(t) = Z(t) + M(t) + R(t)$$

donde

- ♣ $Z(t) \equiv$ nivel medio del mar (varía muy lentamente con el tiempo)

Tipo de onda	Periodo	F. Generadoras	Ejemplo
Ondas capilares	$T < 0,1s$	Viento	Rizado del viento
Ondas de ultragravedad	$0,1 < T < 1s$	Viento	Ondas de viento en una piscina
Ondas gravitatorias	$1 < T < 30s$	Viento y oleaje de viento	Sea y Swell
Ondas infragravitatorias	$30 < T < 5min$	Viento y ondas gravitatorias	Ondas de borde
Ondas largas	$T > 5min$	Borrascas y terremotos y terremotos	Tsunamis
Ondas de marea astronómica	$T = 12/24h$	Rotación Tierra, atracción Tierra/Luna/Sol	Marea astronómica

Tabla 1.1: Clasificación de Kinsman (1965)

♣ $M(t) \equiv$ variaciones periódicas, o sea, la marea astronómica común

♣ $R(t) \equiv$ componente residual o meteorológica (irregular)

El objetivo de un análisis de mareas es predecir la componente periódica que se ajuste todo lo posible a los datos reales.

M(t) Se puede definir la componente de marea como variaciones periódicas del nivel del mar debidas a los efectos combinados de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, la rotación terrestre y la fuerza de Coriolis.

Son predecibles a partir de registros de nivel del mar en un punto.

Su amplitud es variable: desde casi nula (\simeq cm) en el Mediterráneo a 12 m en la bahía de Fundy, Canadá o a los 15 m en el Monte Saint Michel, Francia.

Se trata de ondas largas o de aguas someras que se caracterizan porque su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad media del $H_2O \Rightarrow \frac{d}{L} < \frac{1}{25}$

R(t) Los residuos meteorológicos son las variaciones del nivel del mar que quedan en una serie de registros después de eliminar la marea por medio de un análisis. Los residuos son **irregulares**, como las variaciones del tiempo atmosférico y comprenden las llamadas **ondas de tormenta** ("storm surges") variaciones del nivel del mar debido al

paso de una tormenta que pueden durar desde varias horas a varios días y provocar inundaciones.

Z(t) El nivel medio del mar no es constante. El nivel medio del mar está relacionado con las variaciones estacionales y con el clima. Su rango de variación es muy inferior a los otros dos, del orden de 10 a 20 cm por siglo. El registro geológico muestra que a escala de miles y millones de años el nivel medio ha variado mucho. Desde la última glaciación, hace 10.000 millones de años, el nivel ha subido en algunos lugares más de 40 m.

Los cambios del nivel medio del mar a largo plazo tienen gran interés en la actualidad debido a la posibilidad de que el efecto invernadero esté provocando una aceleración en la subida del nivel medio global. Por medio de mareógrafos se puede conocer las variaciones del nivel medio a largo plazo en un punto determinado con respecto a la Tierra (nivel relativo del mar); aparte de esto, el terreno también sufre movimientos verticales que es necesario extraer de las series de nivel del mar. Los cambios globales del nivel del mar se deducen a partir de observaciones en todo el globo. Actualmente existe una red global de observación de mareógrafos que se puede consultar a través de internet.

Ocasionalmente y superpuestas a estas variaciones de nivel fundamentales se pueden producir otro tipo de fenómenos como son las **secas** y los **tsunamis**.

1.6.1. La Marea astronómica

La atracción gravitatoria que el Sol y la Luna ejercen sobre mares y océanos provoca la aparición de corrientes horizontales que conducen a una subida y bajada del nivel del H_2O . En principio los demás planetas del sistema solar también ejercen esta atracción pero es tan pequeña comparada con la de la Luna y el Sol que no es necesario tener en cuenta.

La **Teoría de equilibrio de Newton** es una simplificación que resulta muy útil para comprender el funcionamiento de las mareas:

Hipótesis:

- ♣ La Tierra completamente cubierta de H_2O
- ♣ No existe fricción con el fondo

en estas condiciones, si se deja transcurrir el tiempo suficiente, se llega a una situación de equilibrio y la superficie del mar adopta la forma de un elipsoide (de marea).



Marea producida por la Luna

Debido a la rotación de la Tierra en torno a su eje, cada punto pasa una vez por cada una de estas posiciones a lo largo de un día lunar (24,84 h) lo que se manifiesta en la existencia de dos pleamares y dos bajamares diarias, es lo que se conoce como **mareas semidiurnas** (2 ciclos por día \simeq 12 h).

La órbita de la luna está inclinada unos $5^{\circ}09'$ con respecto al plano de la eclíptica, línea que aparentemente sigue el Sol en el cielo a lo largo de una año, que forma a su vez $23^{\circ}27'$ con el Ecuador.

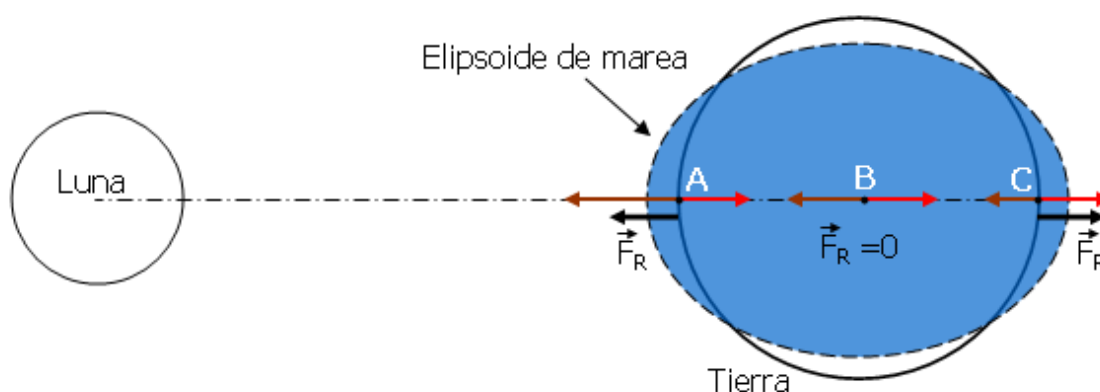


Figura 1.15: Esquema general de marea producida por la Luna

A medida que la Luna se desplaza en su órbita alrededor de la Tierra, con un periodo de 27,32 días, varía su declinación (distancia angular desde el Ecuador); este fenómeno es el responsable de la desigualdad diurna entre dos pleamares o dos bajamares sucesivas y de la existencia de mareas de un ciclo por día, o lo que es lo mismo, **mareas diurnas** en algunos puntos de la Tierra. Si la Luna permaneciese siempre en el Ecuador, las mareas serían semidiurnas en todo el planeta.

Mareas producidas por el Sol

El Sol produce un elipsoide análogo al de la Luna, con sus correspondientes mareas diurnas y semidiurnas. Las mareas solares son menos intensas que las lunares porque se

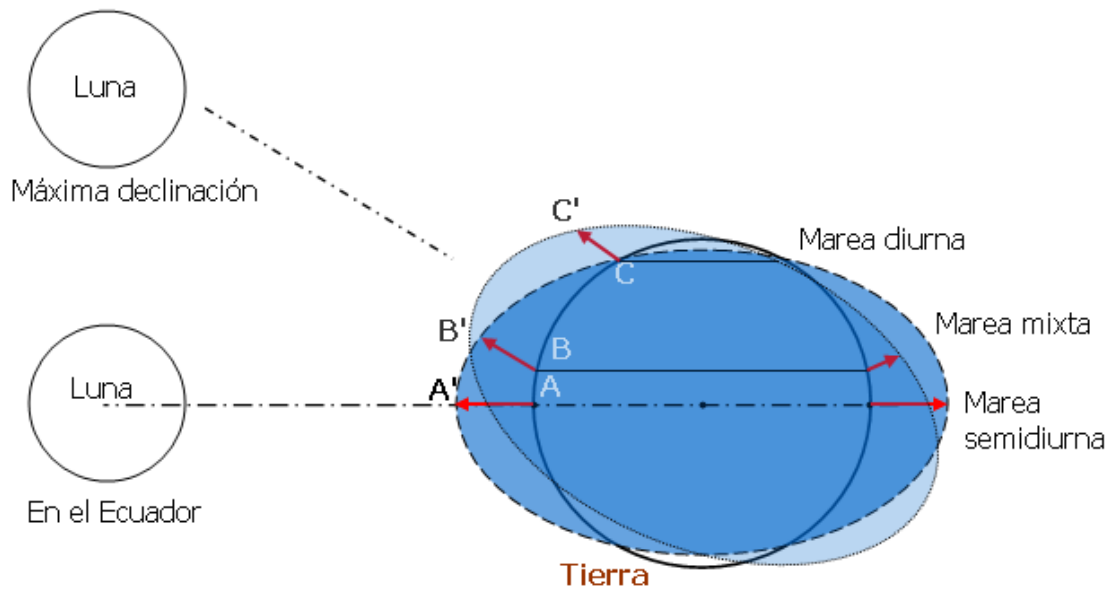


Figura 1.16: Marea producida por la Luna

encuentra demasiado lejos, aunque tenga mayor masa que la Luna.

Efectos combinado del Sol y la Luna

En cada punto la marea se debe a los efectos combinados de mareas lunares y solares que se propagan de Esta a Oeste con la rotación de la Tierra.

En las fases de Luna nueva o llena los dos astros están alineados con la Tierra, de manera que se suman sus fuerzas y se producen las mareas de mayor intensidad, son las **MAREAS VIVAS**; por otro lado en las fases de cuarto menguante o cuarto creciente se encuentran formando un ángulo recto con lo que la diferencia entre la pleamar y bajamar, carrera de marea, es menor, **MAREAS MUERTAS**.

1.7. Ondas de Tormenta o Residuos Meteorológicos

Las desviaciones típicas de los niveles observados respecto de los niveles de marea previstos varían entre unos pocos cm en islas tropicales oceánicas y varias decenas de cm en latitudes altas, tormentosas y con aguas poco profundas. En tierras bajas, próximas a zo-

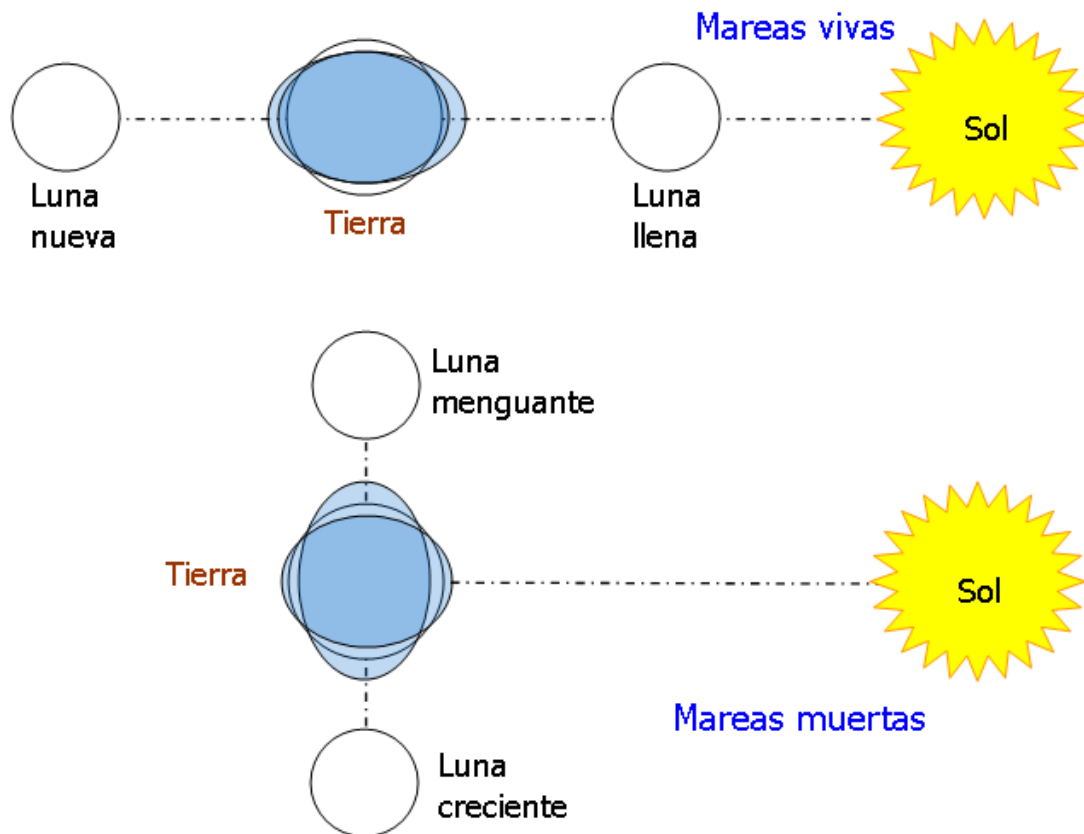


Figura 1.17: Marea Vivas y Muertas

nas de aguas someras, se producen graves inundaciones al coincidir tormentas importantes, que causan un aumento del nivel del agua, con la marea alta en fase de mareas vivas. La atmósfera ejerce su influencia sobre el mar de dos maneras:

- ♣ La presión atmosférica ejerce una fuerza vertical continua sobre la superficie del mar, de manera que sus variaciones producen cambios del nivel del H_2O . En general, un incremento de 1 mbar de presión atmosférica produce aproximadamente una disminución de 1 cm.
- ♣ El viento cuando sopla sobre el mar provoca un desplazamiento del agua que si se ve interrumpido por la presencia de tierra produce una convergencia y por lo tanto un ascenso del nivel del mar. El Huracán Carol, el 31 de agosto de 1954 en Rhode Island, EEUU, con una presión de 960 mbar provocó una subida de entre 2,5 m y 3,5 m por encima de la marea astronómica.

*** INSERTA IMAGEN

En una tormenta estos dos efectos se dan a la vez. El término inglés "surge" se utiliza para denominar un fenómeno asociado a las tormentas y es muy evidente en una gráfica de residuos. Puede ser "surge positiva", elevación del nivel y "surge negativa", disminución del nivel del mar. Tienen gran repercusión económica pues afectan a la navegación de grandes buques en aguas someras.

*** INSERTA IMAGEN

1.8. Otras variaciones del nivel del mar

1.8.1. Los Tsunamis

Un **Tsunami** (del japonés Tsu "puerto" y nami "gran ola") es una ola o una sucesión de olas que se producen en el agua cuando ésta es empujada por una gran fuerza que la hace desplazarse verticalmente.

¿Qué origina un Tsunami?

Los Tsunamis pueden ser provocados por **erupciones volcánicas, terremotos, meteoritos, derrumbes o explosiones**. La energía del Tsunami se mantiene prácticamente constante durante su desplazamiento. Al llegar a la costa, las olas disminuyen su velocidad, debido a la menor profundidad, pero se peraltan mucho (crecen en vertical), aumentando su altura H .

Las placas tectónicas

Los terremotos son la principal causa de los Tsunamis. Se producen cuando los bordes de las placas tectónicas colisionan entre sí. El manto terrestre está formado por doce grandes placas y otras de menor tamaño.

La velocidad e intensidad de las olas

Las olas viajan a velocidades elevadas (de 700 a 1000 Km/h) siendo casi imperceptibles cuando atraviesan aguas profundas. Su velocidad se reduce en aguas someras a medida que la altura de la onda aumenta rápidamente (la ola se peralta $\frac{H}{L} \gg$) luego se produce un impresionante descenso del nivel del mar seguido por la primera ola gigantesca, que puede superar los 30 m de altura cuando alcanza la línea de la costa y a continuación por varias más.

Clasificación de los Tsunamis

El mayor Tsunami del que se tiene noticias fue el provocado entre las islas de Java y

Sumatra por la erupción del volcán Krakatoa en mayo de 1883 dónde la ola producida alcanzó una altura de 42 m.(Ver tabla 1.2)

Grado	Denominación	Consecuencias
Grado 1	Muy ligero	Las olas sólo registradas por mareógrafos
Grado 2	Ligero	Las olas percibidas por personas del mar en la costa
Grado 3	Bastante fuerte	Inundación de costas con pendientes suaves. Daños en estructuras ligeras junto a la costa
Grado 4	Fuerte	Inundación de la playa hasta cierta altura. Barcos arrastrados a tierra o mar adentro
Grado 5	Muy fuerte	Inundación general de playas. Daños en muelles y estructuras. Personas ahogadas
Grado 6	Desastroso	Destrucción completa o parcial de las construcciones hasta cierta distancia de la playa. Daños graves en barcos grandes. Víctimas

Tabla 1.2: Clasificación de los Tsunamis

Cuadro comparativo

Profundidad (m)	Velocidad (Km/h)	Longitud de onda (m)
7000	842,8	282,0
4000	712,7	213,0
2000	504,2	151,0
200	159,4	42,7
50	79,0	23,0
10	39,6	10,6

Tabla 1.3: Cuadro comparativo Tsunami (Usando T^a lineal de Airy)

El último gran Tsunami (26 de diciembre de 2004, Indonesia)

El Tsunami que recorrió el océano Indico desde Tailandia hasta las costas de Somalia se produjo tras un sismo o movimiento sísmico submarino, de 9 grados de magnitud en la escala Richter, cuyo epicentro se encontraba a unos 160 Km de la Costa de Sumatra y a una profundidad de 10 Km. La zona dónde se originó el sismo en un lugar de conflicto dónde dos placas colisionan; la placa australiana subduce o se introduce por debajo de la placa de Sunda. Parte del lecho oceánico se rajó de forma súbita, una lámina de fondo oceánico de unos 1000 Km de longitud por 200 Km de altura se rompió, y en una fracción de segundo, se desplazó verticalmente 15 m hacia arriba (cómo un émbolo). El desnivel del mar creó los destructivos frentes de olas de centenares de kilómetros. Hubo otro seismo, poco tiempo después, en la isla de Nias, en Indonesia, con un magnitud de 8,7 grados en la escala de Richter estando su epicentro localizado a una profundidad de 30 km. Al ser más profundo “no hubo desplazamiento del lecho” y aunque el seismo cumplió la condición necesaria para provocar un tsunami, que es tener una magnitud de al menos 7 grados, no fue así debido a la gran profundidad a la que se produjo, ya que cuanto más superficial y próximo al lecho oceánico es el temblor, mayores posibilidades tiene de crear olas gigantes.

Tsunamis en España

Los últimos tsunamis que ocurrieron en España, tuvieron lugar, según el IGN (Instituto Geográfico Nacional), en Mayo de 2003 en Baleares y en la costa mediterránea peninsular dañando embarcaciones en las Islas Baleares y en el Puerto de Denia. Tuvieron su origen en movimientos sísmicos en Argelia y el primero de ellos dañó embarcaciones en Baleares y en el puerto alicantino de Denia, dónde se produjo una notable oscilación

del nivel del mar. Seis días después el 27 de mayo, las ondas formadas por el agua del mediterráneo causaron variaciones del nivel del mar de hasta 15 cm en las islas de Mallorca y Menorca. La base de datos del IGN tiene registrados tsunamis que causaron inundaciones en Baleares el 31 de Enero de 1756 y en las costas del Mar de Alborán el 9 de Octubre de 1790.

1.8.2. Las Secas

Los fenómenos de resonancia o Secas, constituyen una parte esencial a la hora de diseñar cualquier estructura u obra que pueda estar condicionada por este tipo de comportamiento. La resonancia tiene lugar si la oscilación generada por una fuerza externa tiene un periodo T cercano o igual al periodo de oscilación natural del sistema (caracterizado en nuestro caso por la configuración geométrica del puerto o dársena y la profundidad de la lámina de agua). La resonancia se traduce en una amplificación de la amplitud de la onda estacionaria o cuasi-estacionaria formada y suele ser mas relevante en el caso de ondas estacionarias longitudinales ya que hay mas reflexión y menos disipación de energía en el contorno. Es por ello, que debe ser estudiada con el más mínimo detalle. Por poner un par de ejemplos de la importancia de este tipo de fenómeno, un viento turbulento produjo ondas estacionarias en el puente colgante de Tacoma Narrows (Washington, (Estados Unidos)(Ver figura ??) haciendo que se derrumbara el 7 de Noviembre de 1940, sólo cuatro meses después de haber sido abierto al tráfico. En el Puerto de Vega (Asturias, (España)(Ver figura 1.19) el 1 de Enero de 1998 se produjo un fenómeno de resonancia en la dársena interior del puerto debido a un temporal que se formó muy cerca de la costa. La consecuencia de este fenómeno fue que el nivel de agua de la dársena interior comenzó a elevarse rápidamente y a continuación se vació completamente, con el consiguiente desastre de la flota que se encontraba amarrada en el puerto.

Para cualquier cuerpo de H_2O encerrado existen un conjunto de periodos naturales de oscilación en los cuales es posible establecer movimientos.

Los periodos de **las secas** dependen de:

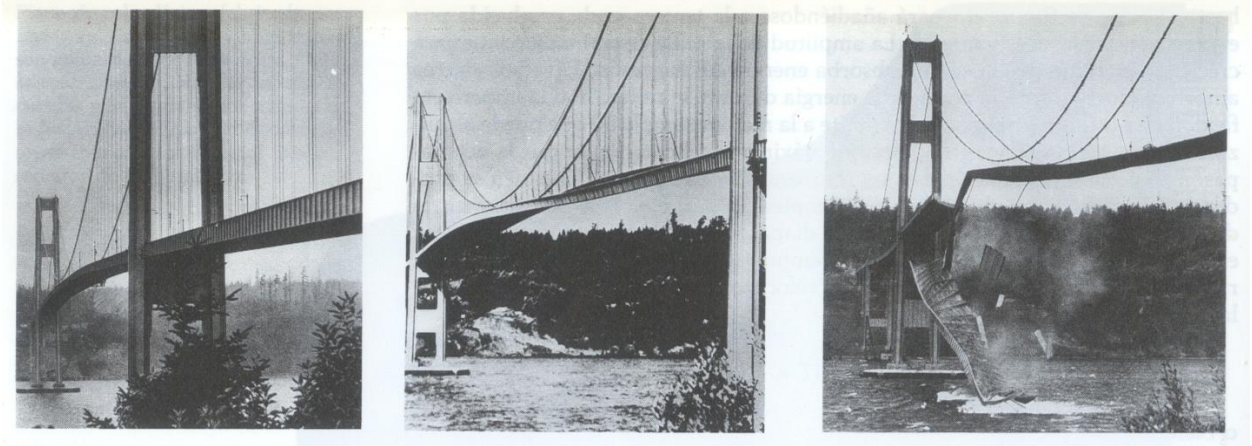


Figura 1.18: Puente de Tacoma Narrows oscilando



Figura 1.19: Puerto de Vega, Asturias

- ♣ Las dimensiones horizontales
- ♣ La profundidad de la lámina de H_2O

Rango de periodos (T):

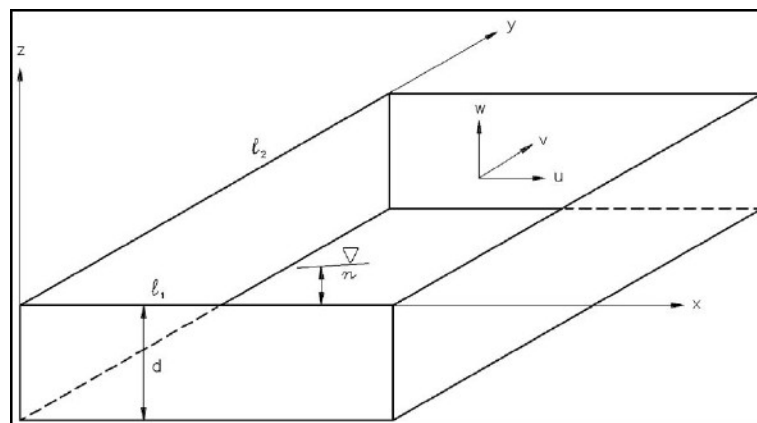


Figura 1.20: Esquema ideal de recinto cerrado

♣ desde $T < 1s$ taza de café, por ejemplo

♣ hasta $T > 1h$ mares y océanos

En un registro aparecen pequeñas oscilaciones superpuestas a la señal de marea principal

*** INSERTA IMAGEN

Origen \Rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{cambios en el viento} \\ \text{cambio en la presión atmosférica} \end{array} \right.$

Para un cuerpo cerrado de H_2O el movimiento de **seca** puede ser considerado como una onda estacionaria.

En el caso de **oscilación transversal**:

MODO FUNDAMENTAL o 1^{er} ARMÓNICO $n=1$

$$T_o = \frac{L}{c} = \frac{2L_t}{\sqrt{gd}} \quad (1.3)$$

2^o ARMÓNICO $n = 2$

$$T_2 = \frac{L}{c} = \frac{L_t}{\sqrt{gd}} \quad (2nodos) \quad (1.4)$$

GENERAL

$$T_n = \frac{2L_t}{n\sqrt{gd}}; \quad n = 1, 2, 3... \quad (1.5)$$

En el caso de oscilación longitudinal:

$$T_o = \frac{L}{c} = \frac{4L_t}{\sqrt{gd}} \quad (1.6)$$

GENERAL

$$T_n = \frac{4L_t}{(1 + 2n)\sqrt{gd}}; \quad n = 0, 1, 2, 3... \quad (1.7)$$

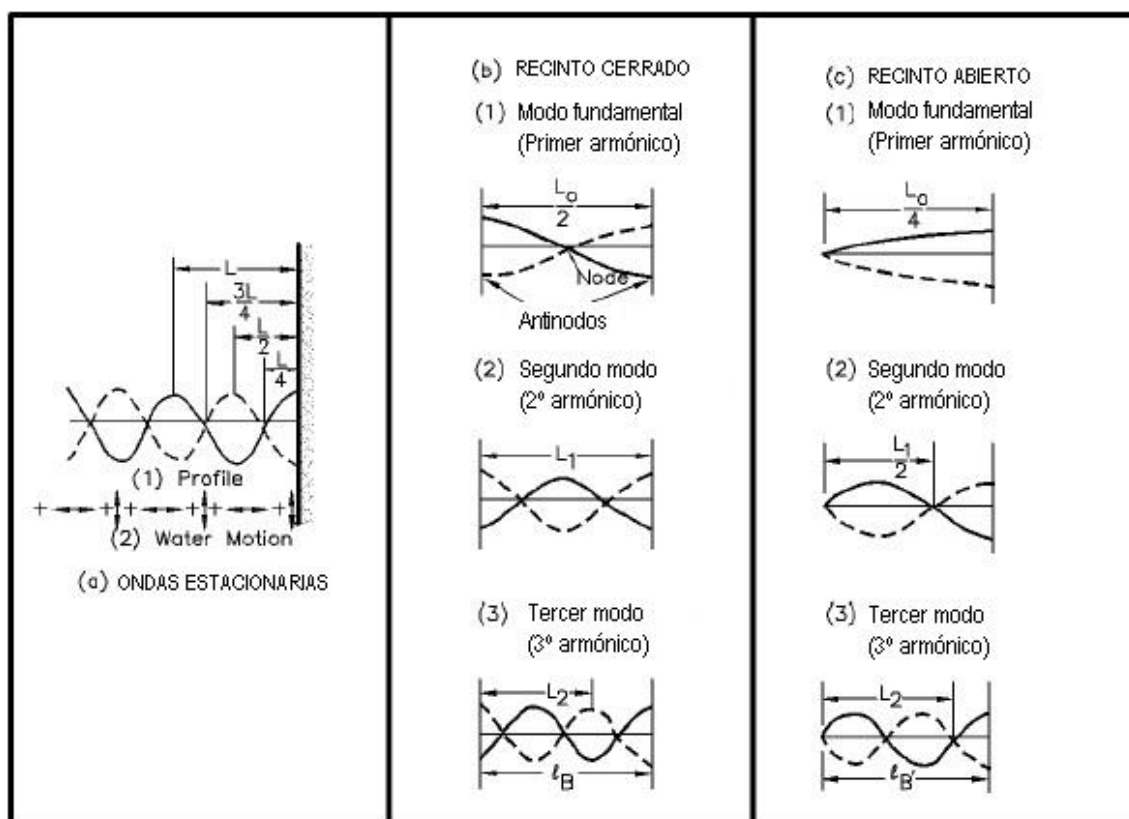


Figura 1.21: Diferentes perfiles de ondas estacionarias. *Shore Protection Manual (1984)*

