



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.

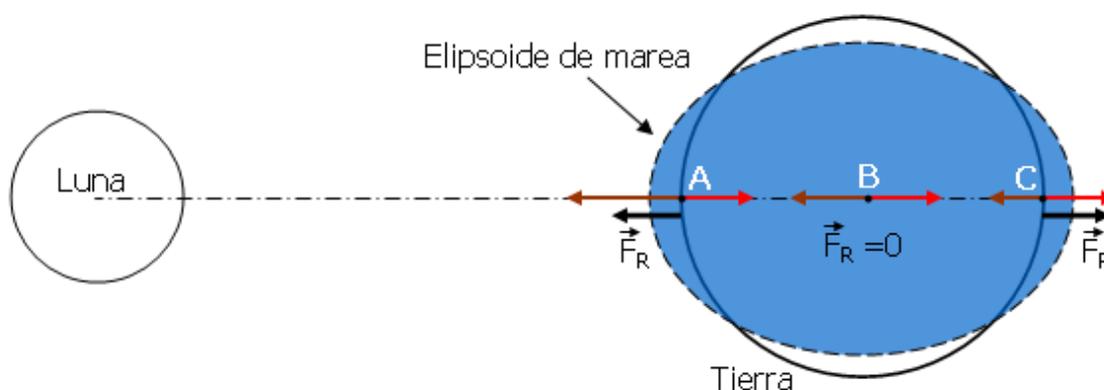


Figura 1.15: Esquema general de marea producida por la Luna

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

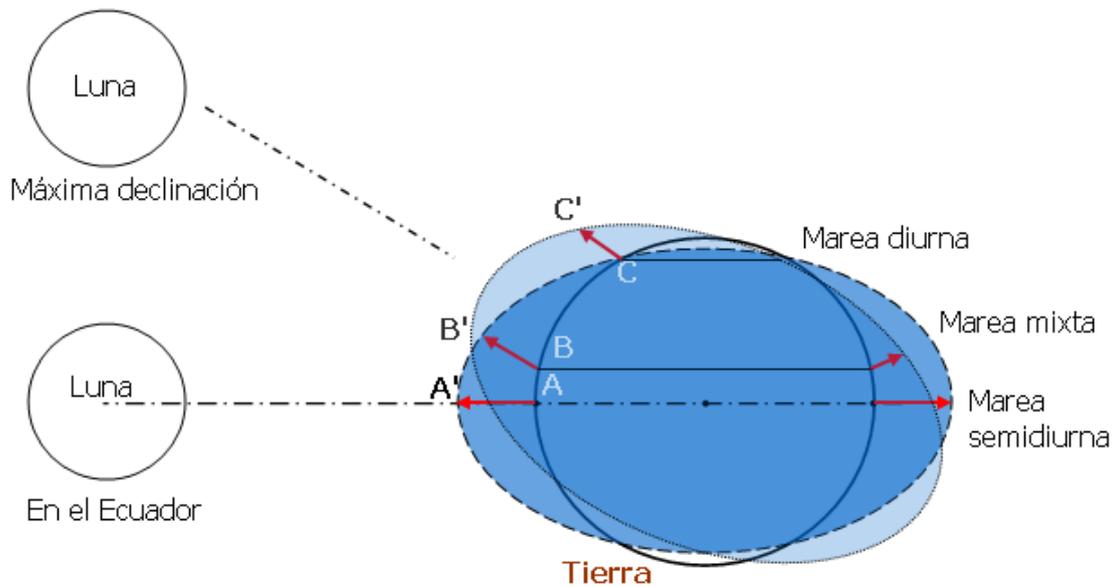


Figura 1.16: Marea producida por la Luna

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-

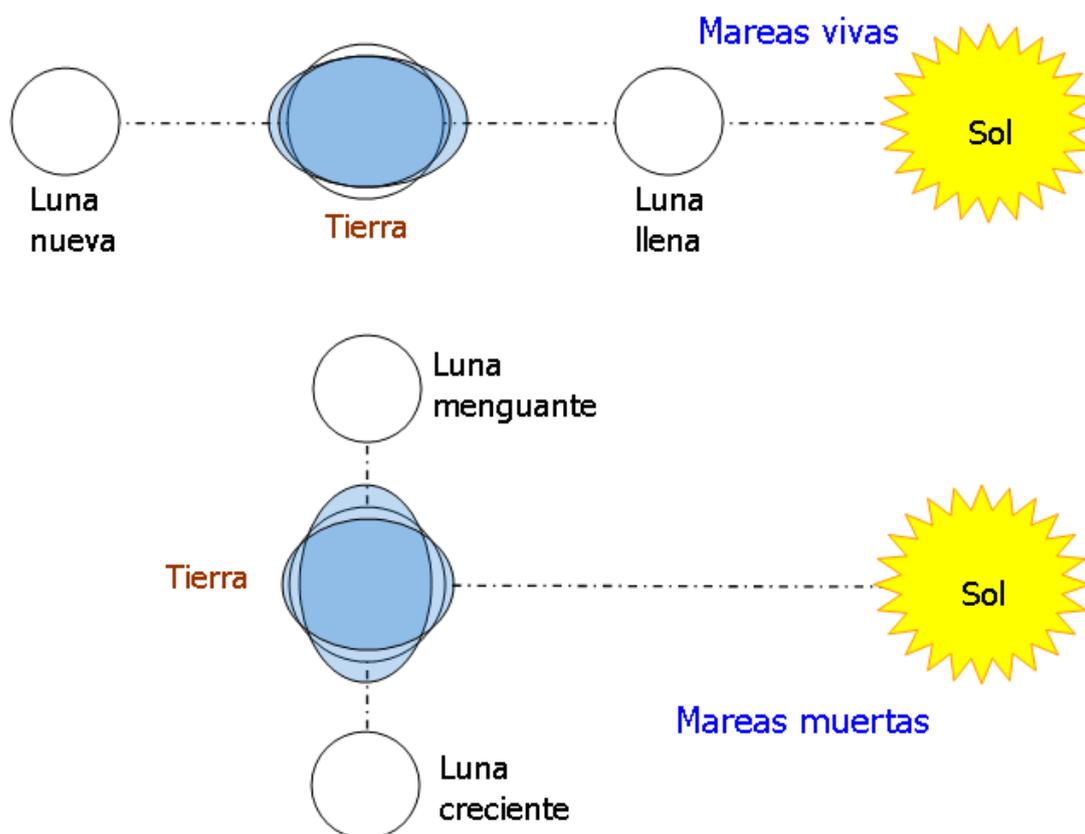


Figura 1.17: Marea Vivas y Muertas

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:

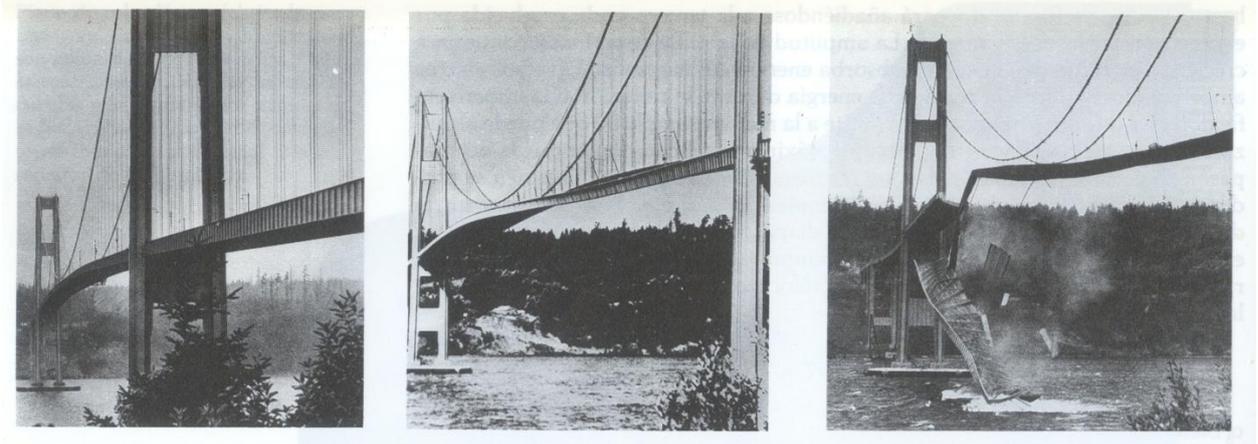


Figura 1.18: Puente de Tacoma Narrows oscilando



Figura 1.19: Puerto de Vega, Asturias

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

Rango de periodos (T):

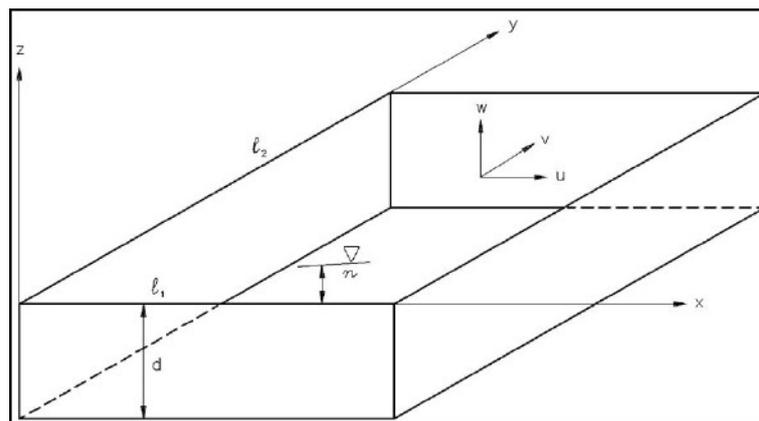


Figura 1.20: Esquema ideal de recinto cerrado

♣ 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 $n = 2$

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

GENERAL

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

En el caso de oscilación longitudinal:

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

GENERAL

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

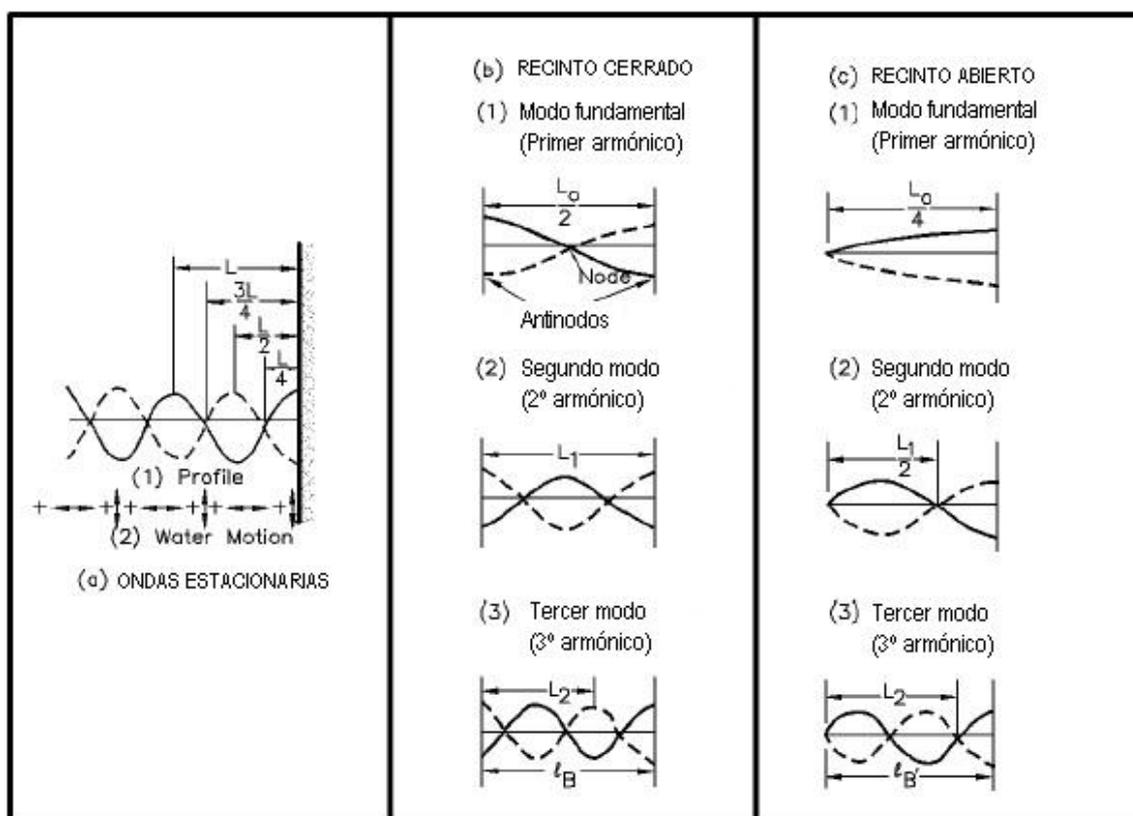


Figura 1.21: Diferentes perfiles de ondas estacionarias. *Shore Protection Manual (1984)*