

**Fig. VIII.19.** Patrón instantáneo de interferencia de oleaje difractado de ambas puntas de un rompeolas finito. Observe que no todos los antinodos y nodos están marcados, solo aquellos que en el instante esquematizado tienen coincidencia de 2 crestas o de una cresta y un valle, respectivamente.

Solo en la línea de simetría del rompeolas poseerán las olas *diamante* estacionariedad total en dirección  $x$ , pues solo sobre esta línea se superponen olas de igual amplitud (o con igual coeficiente de difracción).

Obviamente este patrón se complica para incidencias oblicua, pero el principio básico de superposición es aplicable.

#### VIII.1.5 Limitaciones de la teoría.

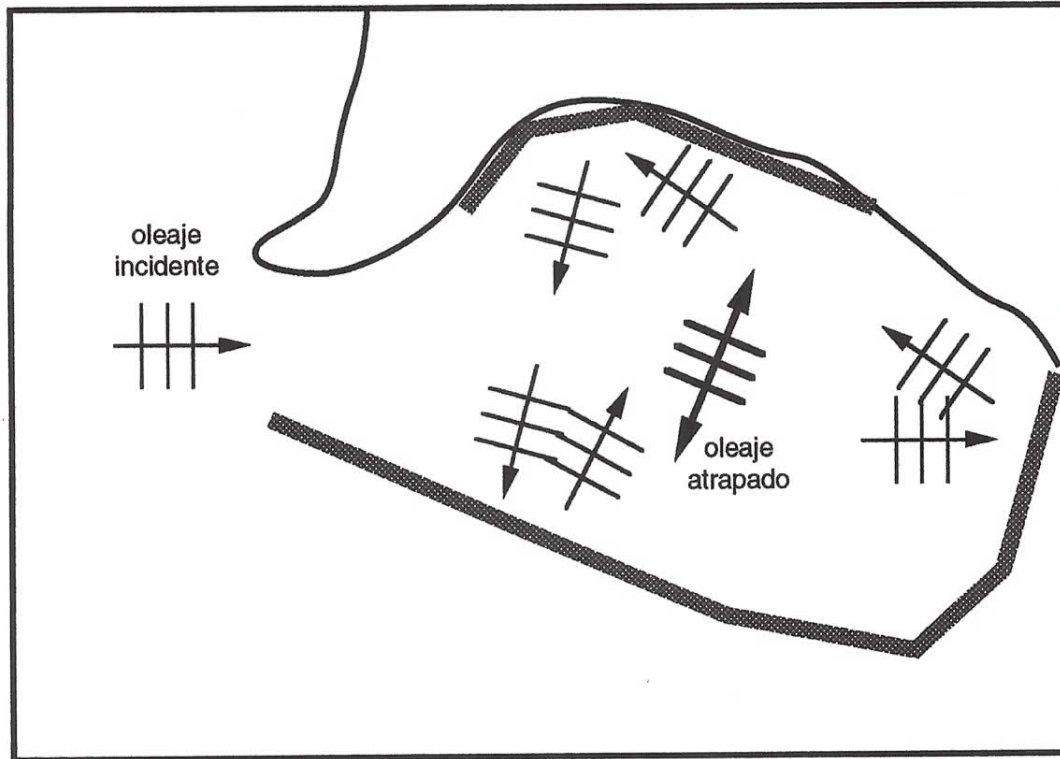
Las siguientes son conceptos no considerados en la teoría que sin embargo están presentes en la práctica y requieren ser considerados y evaluados.

- 1) En muchas ocasiones los rompeolas no son 100% impermeables sino poroso, permitiendo una cierta transmisión de oleaje tras el rompeolas.
- 2) En condiciones extremas las olas pueden sobrepasar la corona del rompeolas afectando las condiciones de oleaje tras el mismo.
- 3) En general el fondo no es horizontal y los problemas de refracción y difracción son simultáneos, pero esto requiere la solución de una ecuación tipo Helmholtz con  $h$  variable (y por lo tanto  $k$  variable). En la práctica se acostumbra calcular solo difracción por 3 o 4 longitudes de onda del rompeolas y aceptar este diagrama con uno de refracción pura más allá. Trabajo relacionado con este tema es el de Bahjos (1968) y el de Mobarek (1962).
- 4) Las olas reales no son monocromáticas (ni tampoco unidireccionales) por lo que cada componente frecuencial (en cada dirección) debe tratarse en forma independiente y después superponerse, siempre considerando la diferencia de fases entre las diferentes componentes. Nótese que cada componente tiene que ser *difractada* con el diagrama apropiado a su longitud de onda  $L_1$ .

## VIII.2 REFLEXION

La reflexión de oleaje, en el litoral natural o en una estructura artificial, puede ser de gran importancia para establecer las condiciones de oleaje en una zona costera. Su consideración es más crítica en bahías relativamente cerradas con fronteras altamente reflectivas, puesto que la energía que entra a la bahía por su boca, de ser reflejada en dirección transversal a la boca, puede quedar atrapada, manifestandose una gran agitación en la bahía. Un caso hipotético de

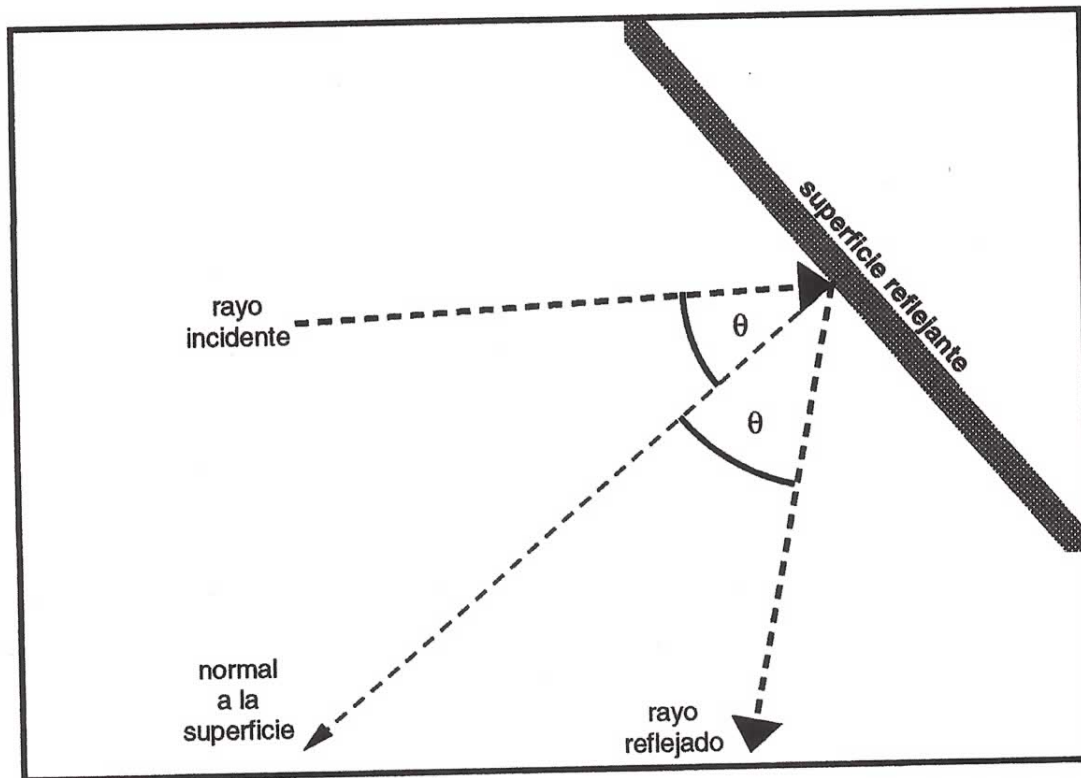
este tipo se presenta en la fig.VIII.20.



**Fig. VIII.20.** Esquema ilustrativo de un caso en el que la energía del oleaje incidente a una bahía puede quedar *atrapado* en la dirección transversal.

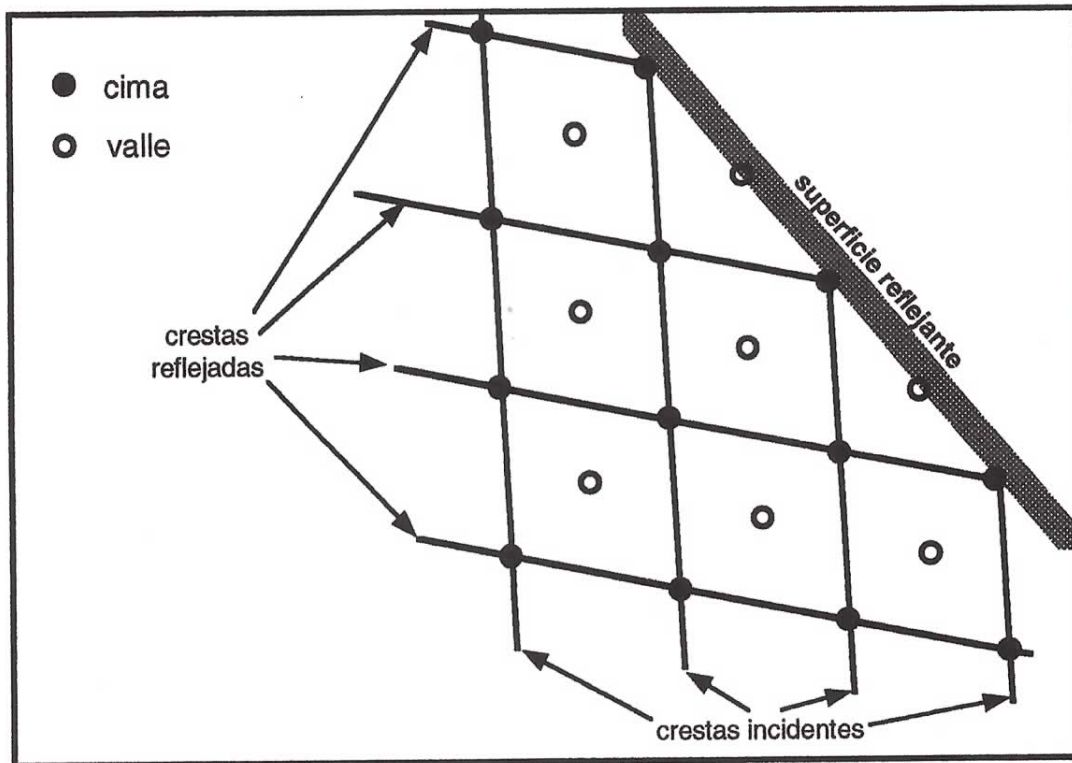
Los principios básicos de la reflexión ya fueron vistos cuando se trató a las ondas estacionarias (ver capítulo III). Aquí solo marcaremos algunos aspectos importantes en cuanto a sus efectos en zonas costeras.

La dirección de reflexión mantiene el mismo ángulo de incidencia que la dirección de incidencia pero en forma simétrica con respecto a la normal a la superficie reflejante, tal y como en la reflexión de un rayo de luz en un espejo. Este hecho se ilustra en la fig.VIII.21.



**Fig. VIII.21.** Esquema ilustrativo sobre la simetría de la reflexión alrededor de la normal a la superficie reflejante.

Esto forma, para incidencia oblicua, hasta en casos sencillos, un patrón de olas de cresta corta que se manifiestan (en forma instantánea) como crestas y valles puntuales alternados, donde las crestas puntuales se presentan en la coincidencia de 2 líneas de cresta, tal y como se muestra en la fig.VIII.22.



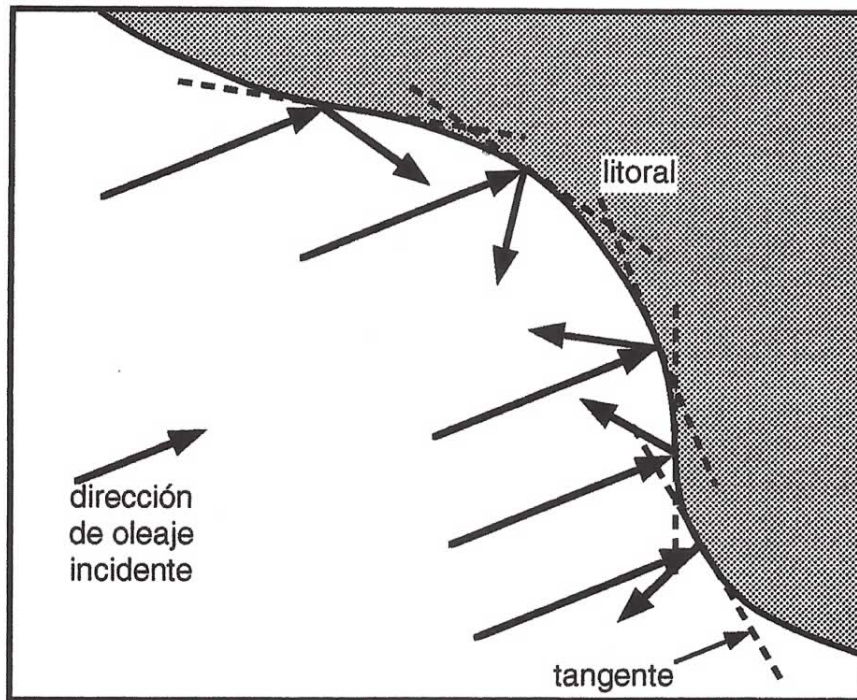
**Fig. VIII.22.** Esquema ilustrativo sobre la formación de *olas de cresta corta* al producirse reflexión sobre una estructura.

La descripción matemática se logra fácilmente extendiendo las olas planas (y uniformes) ya vistas, a direcciones arbitrarias de avance.

$$\eta(x,y,t) = a_1 \cos(k \cos\theta_1 x + k \sin\theta_1 y - \omega t) \quad (\text{VIII-12})$$

$$+ a_r \cos(k \cos\theta_r x + k \sin\theta_r y + \omega t + \delta_r)$$

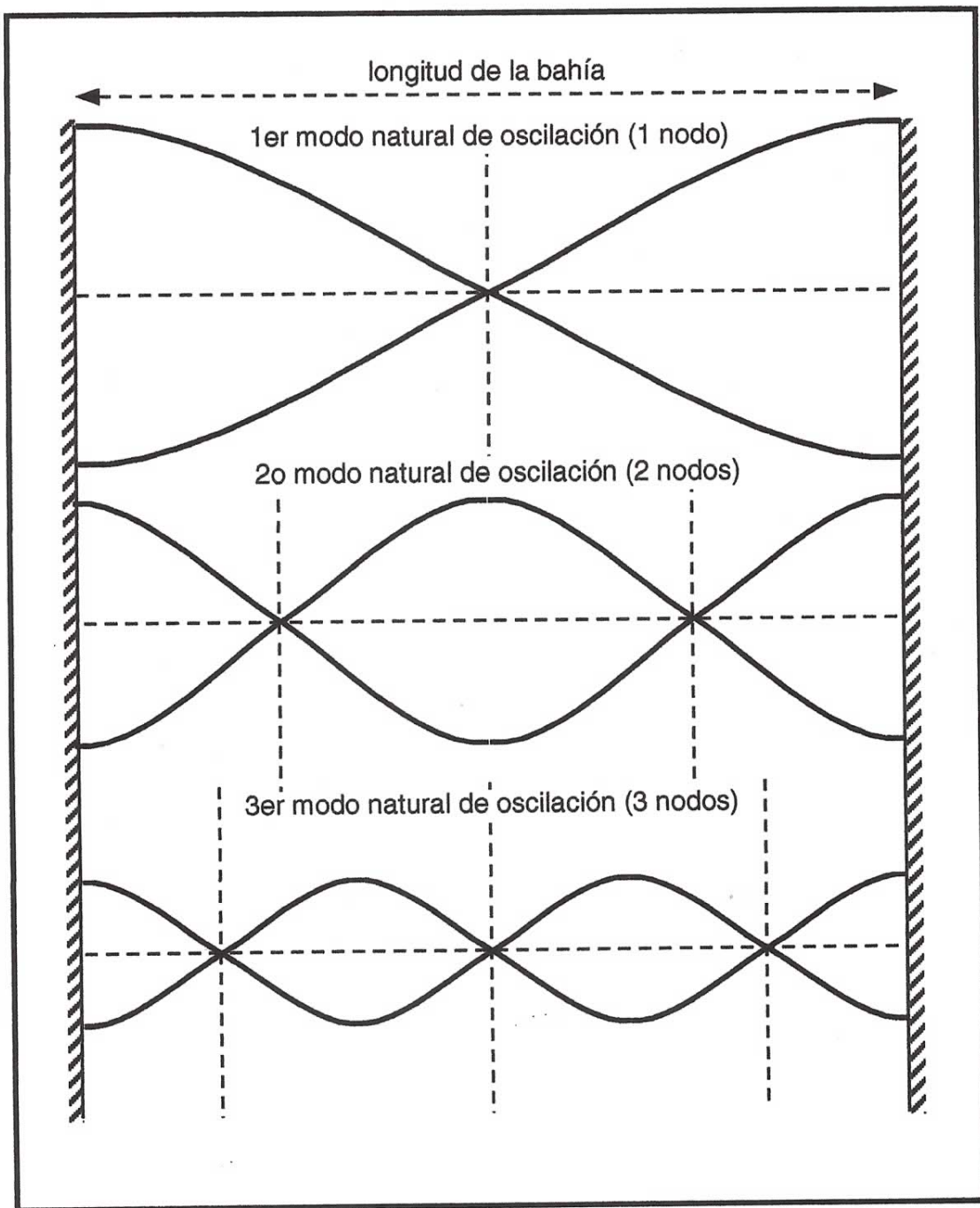
Obviamente, en condiciones naturales, el patrón de incidencia-reflexión puede ser mucho más complicado pues las superficies reflejantes no son necesariamente rectas, en cuyo caso la reflexión local de rayos se puede tratar como si ocurriera en una porción recta tangente a la curva real en el punto de incidencia del rayo. Un ejemplo hipotético aparece en la fig.VIII.23.



**Fig. VIII.23.** Reflexión en un litoral realista donde se utilizan las tangentes locales para su cálculo.

### VIII.2.1 Reflexión en una bahía cerrada y agitación portuaria.

Como ya se ha visto, una superficie altamente reflejante puede localizarse en los antinodos de una onda estacionaria. En general las frecuencias que tengan una longitud de onda tal que un número entero de antinodos se localizen en la longitud de la bahía serán preferencialmente excitadas por el oleaje entrando a la bahía, pudiendo presentar grandes oscilaciones dentro de esta. Este fenómeno corresponde a la presencia de frecuencias y/o modos naturales de oscilación y el consecuente peligro de resonancia. Los primeros modos naturales de oscilación (en una dirección) de una bahía hipotética se esquematizan en la fig.VIII.24.



**Fig. VIII.24.** Esquema de los primeros tres modos naturales de oscilación de una bahía ideal unidimensional.

La longitud del patrón incidente reflejada tiene longitud  $L/2$ , con  $L$ , la longitud de la onda, dada por

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi h}{L} \right) \quad (\text{VIII-13})$$

(recuerde la relación de dispersión). Los períodos naturales de oscilación en la bahía son los que producen

$$\frac{l_b}{L} = 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, \dots \quad (\text{VIII-14})$$

lo que se dá respectivamente para los periodos

$$T_j = \left[ \frac{4\pi l_b}{j g \tanh(\pi j h / L)} \right]^{1/2} \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{VIII-15})$$

De estos períodos, los que en la práctica son de más cuidado son los mayores (para  $j$  pequeño) pues entre más larga la ola, mayor reflexión tendría una estructura moderadamente tendida. O sea, aún las playas pueden ser altamente reflejantes a ondas muy largas.

### VIII.2.2 Reflexión por playas.

La estimación del coeficiente de reflexión para playas puede hacerse a través de expresiones propuestas por Thijsee (1949) que consideró dos factores independientes, uno función de rugosidad y permeabilidad

$$R_1 = \begin{cases} 0.8 & \text{playas suaves impermeables} \\ 0.3 \text{ a } 0.6 & \text{playas rugosas y estructuras con pendiente} \end{cases} \quad (\text{VIII-16})$$

y otra función de la pendiente de la playa y la pendiente de la ola



$$R_2 = \begin{cases} \frac{\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{\max}}{H_o/L_o} & \text{para } \frac{H_o}{L_o} > \left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{\max} \\ 1 & \text{para } \frac{H_o}{L_o} \leq \left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{\max} \end{cases} \quad (\text{VIII-17})$$

donde  $\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{\max}$  es una pendiente de ola crítica para una playa dada, abajo de la cual la reflexión será total y arriba de la cual solo sería parcial, y esta dada por

$$\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{\max} = \left(\frac{2\beta}{\pi}\right)^{1/2} \frac{\text{sen}^2 \beta}{\pi} \quad (\text{VIII-18})$$

para una playa con ángulo (con respecto a la horizontal)  $\beta$  (en radianes). El coeficiente de reflexión de la playa estaría dado por

$$R = R_1 R_2 \quad (\text{VIII-19})$$

### VIII.3 TRANSMISION A TRAVES DE ESTRUCTURAS.

La transmisión de una fracción del oleaje incidente a través de una estructura puede darse por tres motivos:

- a) Si la cresta de la estructura esta por debajo del nivel medio del mar, parte del oleaje será reflejado y parte será transmitido a través de la porción de área hidráulica por arriba de la cresta.
- b) Si la cresta de la estructura emerge por arriba de la superficie del agua en su nivel medio, durante el oleaje esta cresta puede ser rebasada por la altura de la ola o por el nivel de alcance de agua (*runup* en inglés), transmitiendo parte de la energía incidente por

arriba de ella.

- c) Si la estructura tiene características porosas, como en el caso de un rompeolas hecho de roca, existe movimiento de agua a través de los conductos tortuosos en su interior y parte de la energía incidente puede ser transmitida al otro lado.

En los tres casos, se puede considerar que el agua del lado resguardado de la estructura está siendo excitada a la misma frecuencia que la del oleaje incidente, por lo que es de esperarse que la ola transmitida tenga la misma frecuencia que la incidente, aunque puede existir un cierto defasamiento. Es por esto que se acostumbra manejar este fenómeno a través de un coeficiente de transmisión que afecta solo a la amplitud y que esta definido como la relación de altura transmitida a la altura incidente.

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad \text{(VIII-20)}$$

La estimación de condiciones de oleaje en un área resguardada por una estructura deben considerar la posibilidad de este oleaje transmitido, además de difracción, refracción y reflexión.

Soluciones analíticas existen para pocos casos y es común recurrir a pruebas en modelos hidráulicos a escala para obtener las características de transmisión de una cierta estructura. Expresiones analíticas y empíricas para varios casos se presentan en el Shore Protection Manual (1977). Aquí no se mencionarán explícitamente pues, debido a la gran cantidad de condiciones específicas a considerar, su tratamiento sería más adecuado en textos prácticos de diseño de obras marítimas y costeras.

En algunas ocasiones, formaciones naturales como barras de arena, actúan como estructuras de resguardo para la zona tras de ellas. Estas barras se forman usualmente en las épocas del año de calma y proporcionan una excelente protección contra oleaje en la siguiente época de tormentas. Desgraciadamente, el hombre moderno, en su afán de modificar a la naturaleza por razones turísticas, comunmente escoge barras de arena de

este tipo que emergen del nivel medio del mar, como localización de casas habitación e instalaciones turísticas, colocándose en la zona de gran peligro. Una vez hecha la inversión, se intenta estabilizar artificialmente estas barras que tienen una alta variabilidad morfológica anual, inutilizándolas como protección en época de tormentas y en ocasiones empeorando la situación original o trasladando el problema a otra región. En este sentido, la ingeniería marítimo-costera ha pecado frecuentemente al ignorar las condiciones naturales del litoral. Solo en las últimas décadas, después de enormes inversiones necesarias para mantener el *litoral artificial* establecido y numerosos fracasos al respecto, se empieza a considerar el estado de equilibrio dinámico del litoral y a utilizarlo con ventaja.