

## INGENIERÍA ECOLÓGICAMENTE MEJORADA PARA INCREMENTAR LA RESISTENCIA DE DUNAS COSTERAS CONTRA LA EROSIÓN POR OLEAJE

MAXIMILIANO-CORDOVA, C.; SILVA, R.;  
MENDOZA, E.; CHÁVEZ, V. Y MARTÍNEZ, M. L.

### Introducción

Las dunas costeras proveen múltiples servicios ecosistémicos que contribuyen con el bienestar de las poblaciones humanas en la costa. Entre estos servicios destaca el de protección costera ante el impacto de ciclones tropicales y tormentas invernales. Durante el inicio de una tormenta, las dunas constituyen una barrera de arena que mitiga el impacto del oleaje y previene la intrusión del mar tierra adentro. En etapas posteriores, las dunas son una fuente de arena que es erosionada por el oleaje y redistribuida en la parte sumergida del perfil de playa donde forma barras que desplazan el rompimiento del oleaje en dirección al mar; en consecuencia, éste disminuye su efecto erosivo (Figura 1).

Debido a la protección costera que brindan las dunas, hay un creciente interés por restaurarlas y/o rehabilitarlas para fortalecer la protección de los intereses humanos de las inundaciones y la erosión. Estas acciones son particularmente relevantes en zonas vulnerables al impacto de tormentas

donde la formación de dunas se ha visto afectada por un déficit de sedimentos, ya sea natural o inducido por las actividades humanas. En estas playas las dunas pueden ser restauradas o rehabilitadas utilizando elementos naturales (plantas) y/o artificiales (como núcleos de tubo geotextil) para que funcionen como una barrera principal o ayuden a aumentar la efectividad de otras barreras.

Las plantas sobre las dunas reducen las tasas de erosión. El grado de protección que este elemento natural otorga depende de factores como la especie de planta, su forma de crecimiento, la densidad de plantas, la cobertura vegetal y la ubicación de las plantas sobre la duna. Sin embargo, las plantas también pueden acelerar la erosión al incrementar el coeficiente de reflexión. Por ello, el uso de plantas para restauración y/o rehabilitación de dunas debe ser fundamentado en análisis hidrosedimentarios y biogeomorfológicos para asegurar su eficacia y evitar efectos negativos al sistema.

Por otra parte, los núcleos de geotextil se utilizan para construir dunas resistentes a las inundaciones que causa la marejada. Este tipo de núcleos están hechos de una membrana permeable rellena y cubierta con arena y plantas. En distintas playas se ha demostrado que estos elementos cumplen con su objetivo; sin embargo, afectan a la dinámica natural del sistema playa-duna. Las playas donde se han instalado núcleos de este tipo son de menor amplitud, con pendientes pronunciadas y sin dunas. En consecuencia, se restringe el hábitat de especies de plantas pioneras que forman dunas y zonas de anidación para especies animales como las tortugas. Además, los geotextiles deben ser constantemente recubiertos con arena para evitar los daños que causan la radiación solar y el oleaje.



Figura 1. Evolución de las dunas costeras ante la ocurrencia de una tormenta en la playa del Farallón, Veracruz.  
Fotos de C. Maximiliano-Cordova

Como una alternativa para el uso de núcleos de geotextil se ha propuesto el uso de núcleos de roca, los cuales, pueden ayudar a prevenir algunos de los efectos negativos previamente descritos. El núcleo de roca es permeable, por lo que, durante el remonte del oleaje el agua puede percolar, con ello, disminuye el coeficiente de reflexión y las tasas de erosión. Esto evita que se forme una barrera vertical (como ocurre con el geotextil) y facilita el intercambio de sedimentos entre la parte emergida y sumergida del perfil de playa. Finalmente, el material permite el crecimiento de las raíces de las plantas por lo que los proyectos de restauración pueden tener mayor éxito y contribuir a crear elementos híbridos más resistentes.

Pese al potencial de los núcleos de roca, se sabe poco sobre su funcionamiento con y sin plantas, además, tampoco se ha contrastado su funcionamiento con el de núcleos de geotextil. Por ello, en el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del IIUNAM nos planteamos el objetivo de comparar la respuesta morfológica de dunas asistidas con núcleo geotextil y de roca, con y sin plantas. Esto permitió generar información sobre cuál puede ser la mejor alternativa para restaurar y/o rehabilitar dunas para proteger los bienes humanos.

### Métodos

Se analizaron datos de tres experimentos hechos en un canal de oleaje de 37 m de largo, 1.2 m de altura y 0.8 m de ancho, en el Laboratorio de Costas y Puertos del IIUNAM.

En los tres experimentos el canal fue dividido longitudinalmente (Figura 2a) para evaluar dos condiciones de duna de manera simultánea. A cada lado del canal se construyó un perfil de playa con una porción sumergida y una emergida, con una berma y una duna con una base de 0.75 m y una altura de 0.25 m (Figura 2b).

En el experimento 1 (12 condiciones), dunas con tres densidades de plantas (baja, media y alta) y una duna control (sin plantas) (Figura 3a) fueron expuestas a tres condiciones de tormenta: baja ( $H_s=0.1\text{m}$ ;  $T_p=1.118\text{ s}$ ), moderada ( $H_s=0.1\text{m}$ ;  $T_p=1.565\text{ s}$ ) e intensa ( $H_s=0.15\text{ m}$ ;  $T_p=2.012\text{ s}$ ). En el experimento 2 (18 condiciones) se evaluó el efecto independiente y combinado de

dos distribuciones de plantas (plantas sobre toda la duna y plantas sobre la cara protegida de la duna) y la presencia de un núcleo de roca. Además, se evaluó una duna control sin núcleo y sin plantas (Figura 3b). En este experimento se utilizaron las intensidades de tormenta baja ( $H_s=0.08\text{m}$ ;  $T_p=1.565\text{ s}$ ), moderada ( $H_s=0.08\text{m}$ ;  $T_p=1.789\text{ s}$ ) e intensa ( $H_s=0.8\text{ m}$ ;  $T_p=2.012\text{ s}$ ); sin embargo, la altura de ola significativa y el periodo pico fueron ligeramente diferentes a los usados en el experimento 1. En el experimento 3 (9 condiciones), se puso a prueba la eficacia de dunas con núcleo de geotextil con y sin plantas (Figura 3c). Para este tercer experimento se utilizaron las tres condiciones de tormenta con las características del experimento 2. En los tres experimentos *Ipomoea pes-caprae* fue la especie utilizada para evaluar el efecto de las plantas.

Las variables de respuesta analizadas en los tres experimentos fueron el régimen de erosión con base en Sallenger Jr. (2000) y el porcentaje de arena erosionada. El régimen de erosión se determinó a partir de las mediciones del perfil antes y después de la tormenta, con las cuales también, se calculó el volumen y el porcentaje de arena erosionada. Estas mediciones se realizaron con una estación total. El régimen de erosión fue clasificado como a) lavado cuando el remonte del oleaje estuvo confinado a la playa, b) colisión cuando el remonte del oleaje ocurrió sobre la base de la duna y causó erosión, c) sobrelavado cuando el remonte del oleaje excedió la cresta de la duna y hubo erosión en dirección al mar y tierra adentro, y d) inundación cuando la duna permaneció bajo el agua.

### Resultados

#### Régimen de erosión

En los tres experimentos, en la tormenta de baja intensidad, el remonte del oleaje estuvo confinado en la base de la duna, es decir, la erosión ocurrió por colisión. En el experimento 1, este régimen se mantuvo en las tormentas de intensidad moderada y alta; no se observó que el incremento en la densidad de plantas modificará esta respuesta (Figura 4a). Por su parte, en los experimentos 2 y 3 en condiciones de tormenta media e intensa,

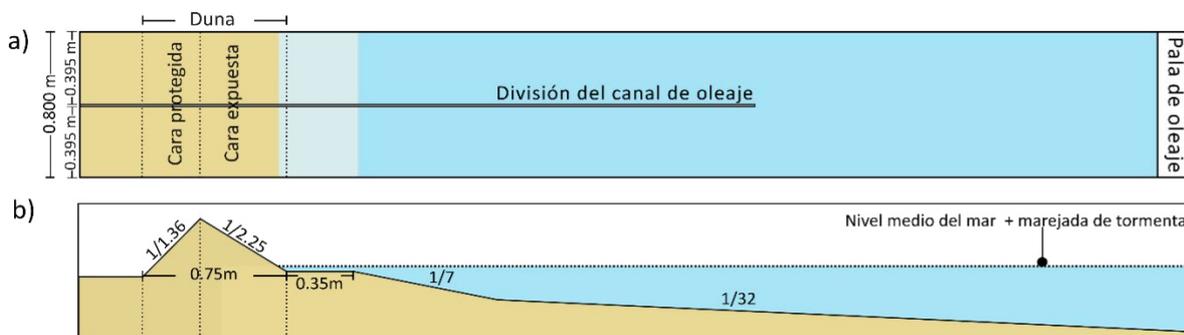


Figura 2. a) Canal de oleaje dividido para evaluar dos perfiles a la vez, y b) perfil de playa y duna

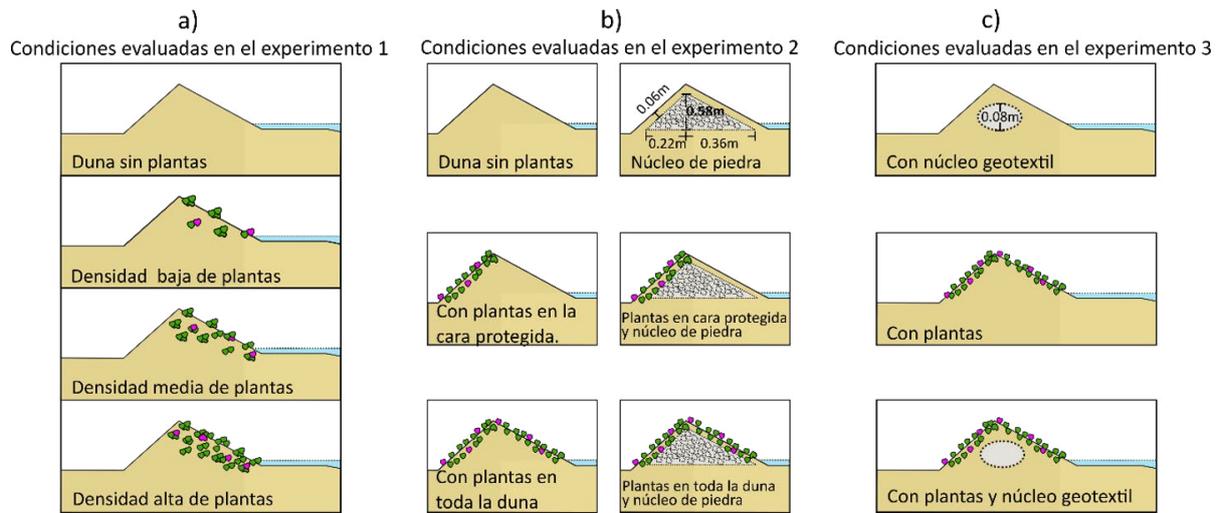


Figura 2. a) Canal de oleaje dividido para evaluar dos perfiles a la vez, y b) perfil de playa y duna

las olas remontaron hasta la cresta de la duna y provocaron la disminución de su altura (Figura 4 b y c). Finalmente, en condiciones de tormenta baja y media, las dunas con planta y geotextil mostraron la misma respuesta geomorfológica que las dunas con núcleo de roca; sin embargo, en condición de tormenta intensa el geotextil resultó ser más resistente ante la inundación por marejada.

**Porcentaje de erosión**

En el experimento 1 se registraron los menores valores de erosión independientemente de la densidad de plantas (Cuadro 1). En este experimento se observó que en la mayoría de los casos las plantas disminuyen la erosión; sin embargo, no se observó una relación clara entre el aumento de la densidad de plantas y la disminución de la erosión. Las tendencias variaron dependiendo de la intensidad de la

tormenta. Para el caso de la tormenta de baja intensidad, la densidad alta de plantas disminuyó la erosión; no obstante, la duna sin plantas no fue la más erosionada y las dunas con vegetación media se erosionaron más que aquellas sin plantas. En las tormentas moderada e intensa, las dunas sin plantas fueron las más erosionadas; para el caso de la tormenta intensa, la densidad alta de plantas fue la más efectiva (Cuadro 1).

En el experimento 2, los porcentajes de erosión incrementaron considerablemente. En este experimento destaca que las dunas con núcleo geotextil y sin plantas fueron las que sufrieron menor erosión en las tres intensidades de tormenta (Cuadro 1). Sin embargo, la erosión incrementó cuando la duna no tenía núcleo y plantas. También, se observó que la erosión incrementó en las dunas sin estructura y con plantas sólo en la cara protegida de la duna.

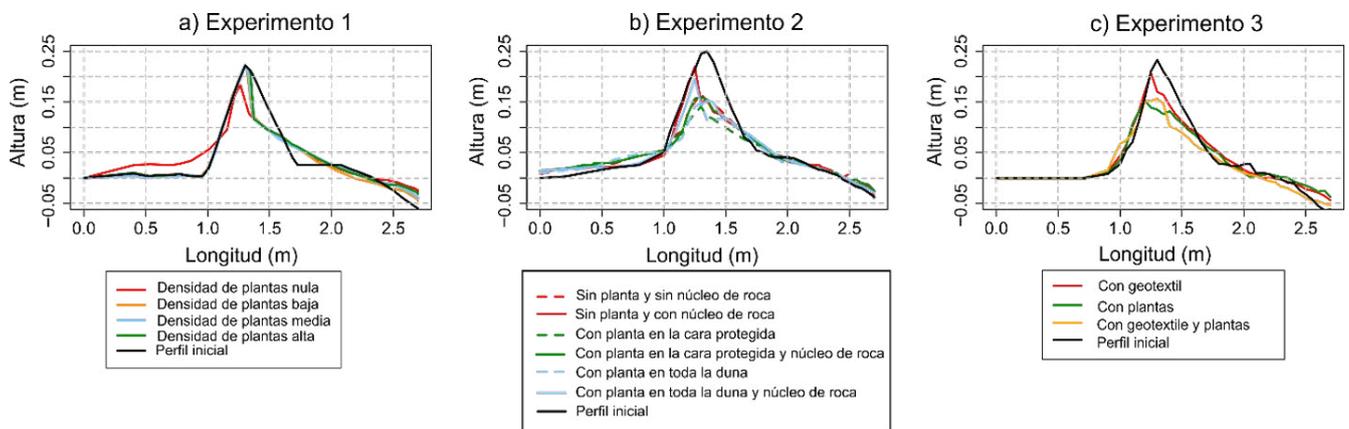


Figura 4. Ejemplo de la respuesta geomorfológica de las dunas en los tres experimentos durante tormenta intensa. En el experimento 1 se observó colisión mientras que en los experimentos 2 y 3 se observó sobrelavado de la duna.

Cuadro 1. Porcentaje de erosión de las 39 condiciones de dunas evaluadas. El incremento en la intensidad del color denota incremento en el porcentaje de arena erosionada.

Experimento	Condición		Erosión de la duna (%)		
	Densidad de plantas		Tormenta baja	Tormenta moderada	Tormenta intensa
Experimento 1	Nula		3.8	8.6	10.8
	Baja		3.8	4.3	6.7
	Media		4.1	6.2	6.9
	Alta		2.5	4.3	5.4
Experimento 2	Ubicación de las plantas	Núcleo			
	Sin plantas	Roca	8.6	12.2	14.0
	En toda la duna	Roca	12.7	17.2	15.5
	En la cara protegida	Roca	12.8	15.7	19.6
	Sin plantas	Sin núcleo	9.2	12.8	18.3
	En toda la duna	Sin núcleo	15.9	19.3	24.0
En la cara protegida	Sin núcleo	15.2	27.1	25.7	
Experimento 3	Densidad de plantas	Structure			
	Nula	Geotextil	12.6	12.6	4.8
	Alta	Geotextil	5.3	7.4	15.1
	Alta	Sin núcleo	4.3	5.2	11.9

Por su parte, en el experimento 3, en las tormentas baja y moderada, las dunas sin plantas y con tubo de geotextil fueron las más erosionadas. Le siguieron las dunas con geotextil y plantas; finalmente, las dunas con plantas y sin núcleo (con valores comparables a los del experimento 1 donde sólo se usaron plantas). Sin embargo, en la tormenta de alta intensidad, el tubo geotextil fue el menos erosionado, seguido de la duna con sólo plantas y la duna con plantas y núcleo geotextil (Cuadro 1). Finalmente, al comparar los resultados del experimento 2 y 3 se encontró que en la tormenta de baja intensidad la duna con núcleo de roca retuvo más arena en comparación con la duna con núcleo geotextil. En la tormenta moderada ambos núcleos fueron igual de efectivos, pero, en la tormenta intensa el núcleo de geotextil fue más efectivo. Para el caso de ambos núcleos con plantas, el geotextil fue más efectivo que el núcleo de roca en las tormentas de intensidad baja y moderada, mientras que ambos núcleos con plantas fueron igual de efectivos en la tormenta intensa.

### Conclusión

Se encontró que las plantas mitigan la erosión que induce el oleaje de tormenta; sin embargo, no se observó una relación clara entre el aumento de la densidad de plantas y la disminución

de la erosión. Por otra parte, cuando las dunas tienen núcleo de roca o geotextil son más vulnerables a la erosión. En especial, en el caso de núcleos de piedra, éstos disminuyen su eficiencia en presencia de plantas. Por su parte, las plantas pueden incrementar la resistencia de las dunas con núcleo de geotextil en condiciones de tormenta baja y media. Finalmente, no se observaron grandes diferencias entre el funcionamiento de núcleos de geotextil y de roca, por lo que estos últimos pueden ser una opción viable para sustituir a los primeros y evitar los daños que los geotextiles causan al sistema playa-duna.

### Para saber más

Maximiliano-Cordova, C.; Silva, R.; Mendoza, E.; Chávez, V.; Martínez, M. L. y Feagin, R. A. (2023). Morphological Performance of Vegetated and Non-Vegetated Coastal Dunes with Rocky and Geotextile Tube Cores under Storm Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2061.

### Referencias

Sallenger Jr, A. H. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research* 2000, 16, 890-895.