

# RESILIENCIA DE LA COSTA NORTE DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN ANTE EL DESARROLLO DE PUERTOS PESQUEROS

GEMMA L. FRANKLIN, GABRIELA MEDELLÍN, CHRISTIAN M. APPENDINI, ALEC TORRES-FREYERMUTH, JUAN A. GÓMEZ Y JOSÉ LÓPEZ GONZÁLEZ

La costa del estado de Yucatán, localizada en el norte de la Península del mismo nombre, tiene una extensión de aproximadamente 360 km. A finales de los años sesenta inició la construcción de puertos pesqueros de pequeña escala en esta zona, con el objetivo de contribuir al desarrollo económico de la región. Actualmente, existen doce puertos para actividades de pesca y turismo en el estado de Yucatán. Estos puertos se desarrollaron en comunidades pesqueras ubicadas en islas de barrera, ofreciendo un acceso a zonas de protección y calma por medio de un par de escolleras que conectan el mar con una rada portuaria (Fig. 1). Sin embargo, el transporte litoral de arena, que es dominante de este a oeste, se ha visto interrumpido debido a la presencia de dichas escolleras. Esto ha generado un déficit de sedimento aguas abajo de los puertos (al poniente), resultando en erosión a lo largo de la costa norte de Yucatán. Este déficit de sedimento, en sinergia con algunos efectos del cambio climático, tales como el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas y huracanes, así como el

desarrollo de infraestructura costera mal planeada, afectan la resiliencia del sistema, es decir, su capacidad para recuperarse ante perturbaciones (Lake *et. al.*, 2013), como son los eventos extremos. En este trabajo se evalúa el impacto de los puertos en la línea de costa, a diferentes escalas temporales, utilizando diferentes técnicas de monitoreo costero.

## Materiales y Métodos

Este estudio emplea imágenes de satélite, vuelos de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) y perfiles de playa de alta resolución, para investigar los impactos de diferentes puertos de la costa norte del estado de Yucatán en la línea de costa a diferentes escalas de tiempo, desde periodos estacionales a multi-anales. En el caso de Sisal, se presenta un estudio a escala estacional mediante el monitoreo de alta resolución (Figura 2) con GPS diferencial y VANT llevado a cabo a lo largo de un año (05/2019-04/2020), mientras la comparación de los otros puertos (El Cuyo, San Felipe, Dzilam de Bravo, Chabihau, Telchac, Chuburna y Sisal) se realiza a escala de décadas por medio de imágenes de satélite (1980-2019).

Para estimar las tasas de erosión de la línea de costa asociadas a la construcción de los puertos, se analizaron imágenes de satélite a lo largo de la costa. La herramienta *CoastSat* (Vos *et. al.*, 2019) fue empleada para extraer la línea de costa en zonas aledañas a siete puertos seleccionados (Fig. 3). La variabilidad estacional se estudió a partir de un programa de monitoreo quincenal con GPS diferencial en tiempo real en las playas aledañas al puerto de Sisal (Fig. 2a), con un total de 40 perfiles de playa separados por 100 m, realizados entre mayo de 2019 y abril de 2020. Los perfiles fueron medidos partiendo de la duna, hasta una profundidad aproximada de 1.5 m. Para evaluar la evolución de la línea de costa a cada lado del puerto, la posición de la cota 0 fue extraída en cada perfil de playa. Los cambios en el volumen de la playa al este y oeste del puerto fueron estimados integrando desde el límite terrestre hasta la cota -0.5 m.

Durante el periodo de medición de perfiles de playa alrededor del puerto de Sisal, se llevaron a cabo algunas acciones para mitigar la erosión al oeste del Puerto por parte de particulares y la Administración Portuaria Integral. Específicamente, se instalaron tres rompeolas tipo ReefBalls™ (Fig. 2a y b) y se realizó un relleno de playa de 860 m<sup>3</sup> (Fig. 2c). Para evaluar el relleno de playa se realizaron vuelos con un VANT. El oleaje presentó mayor energía durante los meses de invierno y primavera, lo cual se debe al oleaje generado durante los *Nortes*, mientras que, en primavera, está asociado a las brisas

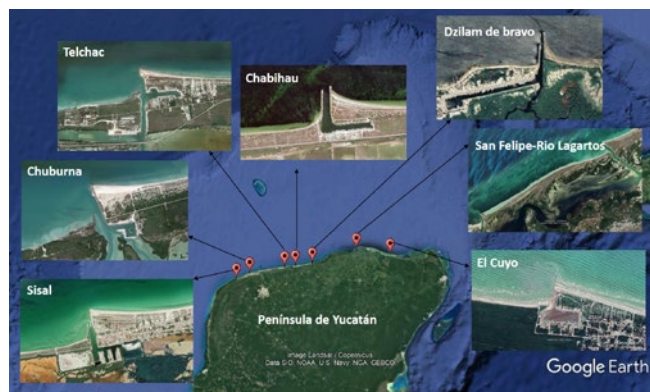


Figura 1. Área de estudio. Puertos de la costa norte de Yucatán estudiados en este trabajo. Imágenes de Google Earth



Figura 2. Posición de los perfiles de playa levantados en Sisal (amarillo), los polígonos de los vuelos (cuadros negros y puntos de control en rojo) y la ubicación de los Reefballs™ (líneas en azul claro). Modificada de Franklin *et. al.* (2021)

locales. El oleaje incidente con un ángulo alto fue más persistente durante los meses de primavera-verano, sin embargo, se presenta la mayor parte del año y es quien controla el transporte litoral en la zona.

## Resultados

Los resultados del análisis de las imágenes de satélite demuestran que los puertos han generado acreción en playas localizadas al este, cuyo avance se encuentra controlado por la extensión de las escolleras y la orientación local de la línea de costa. Una vez que la línea de costa alcanza el extremo de la estructura, se acelera el proceso de *bypass* natural de arena hacia el oeste de los puertos y resulta en el azolvamiento de los canales de acceso. El *bypass* natural de arena puede ayudar a mitigar la erosión al oeste de los

puertos, sin embargo, el azolvamiento de los canales muchas veces impide el acceso a los puertos, generando la necesidad de los dragados.

La Figura 3 muestra las imágenes de las líneas de costa antes y después de la construcción de los puertos. La excepción al patrón descrito anteriormente se presenta en el puerto de El Cuyo, el cual, tiene una orientación más parecida al ángulo de incidencia del oleaje, por tanto, las tasas de transporte son menores y el transporte litoral neto es menor. Los puertos de Chabihau, Dzilam de Bravo y San Felipe-Ría Lagartos, se ubican en un área donde se presentan ondas de arena submarinas que afectan la hidrodinámica de la zona. Los resultados muestran una tendencia clara de acumulación al este y erosión al oeste de los puertos (Tabla 1). Su efecto sobre la línea de costa varía de 920 a 1780 m al este de los puertos y de 1450 a 3000 m al oeste (Tabla 1).

Tabla 1. Estimaciones del efecto de los puertos en la línea de costa del norte de Yucatán. Modificada de Franklin *et. al.* (2021)

Ubicación (m)	El Cuyo	San Felipe	Dzilam de Bravo	Chabihau	Telchac	Chuburna	Sisal
Avance del lado este de la escollera	170	Avance y retroceso obvio, pero con morfología compleja	270	340	310	310	340
Avance del lado oeste de la escollera	-50		-90	-100	-240	-240	-150
Extensión del efecto al este	920		1000	2100	1500	1500	1780
Extensión del efecto al oeste	3000		1450	2730	2500	2500	2550

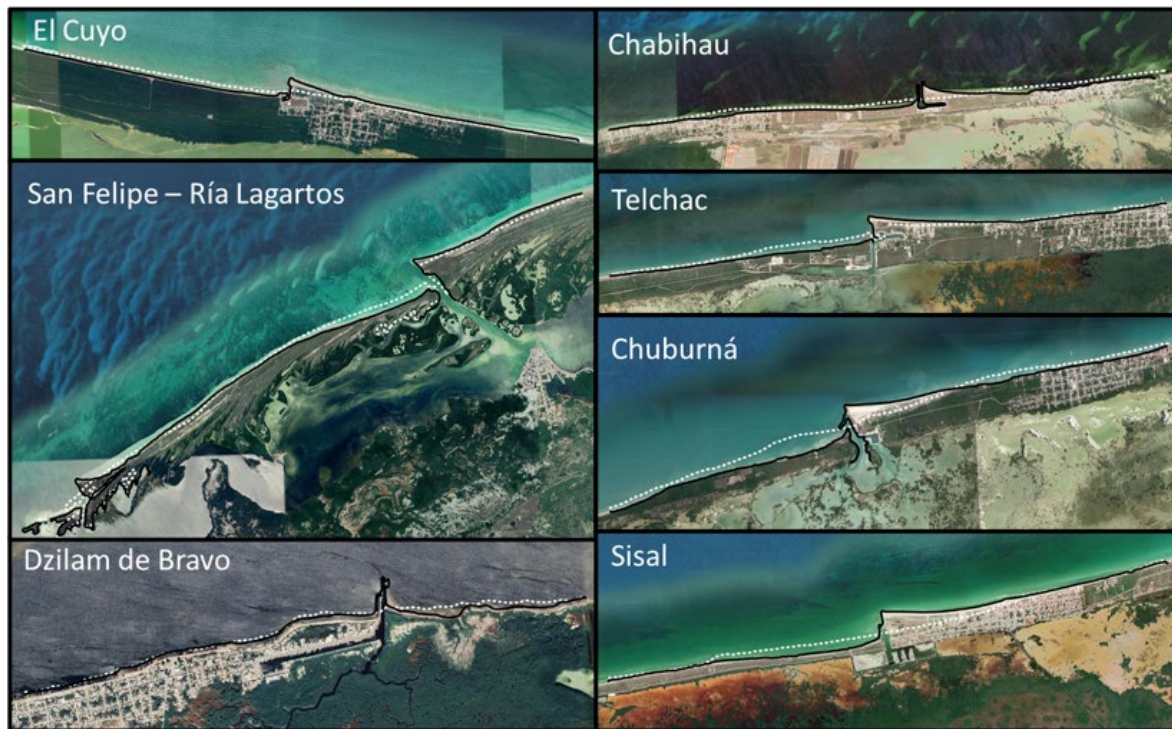


Figura 3. Cambios en la línea de costa en varios puertos en el norte del Yucatán, obtenidos con CoastSat. La línea de costa actual (línea negra) corresponde a 2020 y la línea de costa antes de la construcción del puerto (línea blanca punteada) corresponde a 1984 (San Felipe -Ría Lagartos and El Cuyo), 1985 (Sisal y Telchac), 1986 (Chuburna), y 1987 (Chabihau y Dzilam de Bravo) (Figura modificada de Franklin, *et. al.*, 2021)

En el caso del puerto de Sisal, a lo largo del año, el volumen al este del puerto muestra un comportamiento cíclico estacional con una ganancia de arena al final del periodo de estudio del orden de  $76.0 \text{ m}^3/\text{m}$  (Fig. 4a), mientras, el lado oeste presenta una variación neta de  $-60.4 \text{ m}^3/\text{m}$  (Fig. 4a). Lo anterior muestra el efecto que genera el puerto al interrumpir el transporte del sedimento a lo largo de la costa, afectando así, la resiliencia del sistema.

La posición de la línea de costa extraída de cada perfil para todas las campañas muestra cambios parecidos a aquellos observados en el volumen de la playa. La posición con respecto al muestreo inicial al este del puerto (Fig. 4b), muestra variabilidad significativa con un aumento neto en el ancho de la playa para la mayoría de los perfiles, con un promedio general de 3 m y un máximo de 8 m. La posición al oeste del puerto (Fig. 4b), también, muestra variabilidad significativa, con una disminución en el ancho de playa

en promedio de -1.5 m y un máximo de -10.1 m (P25). La excepción ocurre al frente de donde fue instalada la primera sección de ReefBalls™ (P27-P32), donde se muestra un incremento en el ancho de la playa promedio de 5.7 m y máximo de 10.7 m en P31 (Fig. 4b). La disminución-aumento en el ancho de la playa reduce-incrementa la resiliencia de la costa ante eventos extremos.

La línea de costa obtenida con los VANT fue comparada con la obtenida con los perfiles de playa para comparar los métodos. Los resultados muestran diferencias en promedio al este del puerto de 1-3.5 m, un valor máximo de  $3.6 \text{ m} \pm 1.9$  y un valor mínimo de  $1.12 \text{ m} \pm 0.4$ . Al oeste del puerto, la diferencia en promedio presentó un valor máximo de  $4.2 \text{ m} \pm 4.1$  m y un mínimo  $0.7 \pm 0.4$  m. Ambos métodos presentan tendencias muy parecidas, pero, las diferencias en algunos casos indican que aún se requiere estudiar con más detalle para identificar los factores que generan estas diferencias.



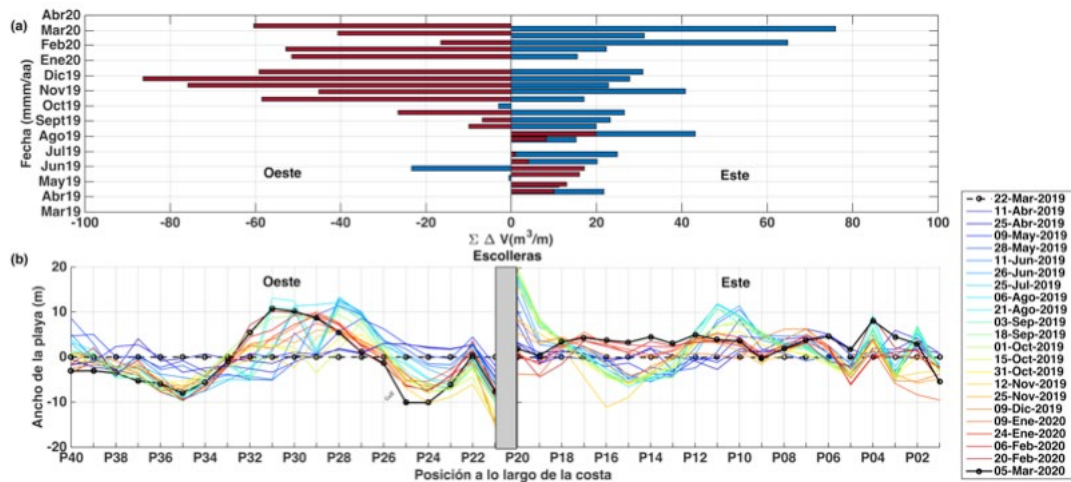


Figura 4. a) Cambio del volumen acumulado al este (azul) y al oeste (rojo) del puerto. b) Cambios en la posición de la línea de costa con respecto al muestreo al oeste y al este del puerto de Sisal. Modificados de Franklin *et. al.* (2021)

Con respecto al relleno de playa, se observó un aumento en el volumen de arena en febrero de 2020 (6 de febrero, 860 m<sup>3</sup>). Sin embargo, dos semanas después, el volumen registrado alcanzó el volumen estimado al inicio del muestreo en abril de 2019 (390 m<sup>3</sup>).

## Conclusiones

El uso de mediciones directas e imágenes de percepción remota, demuestra que los puertos de Yucatán generan una tendencia clara de acumulación de arena al este de ellos y erosión al oeste. En el orden de décadas, la erosión estimada hacia el oeste de los puertos por medio de imágenes de satélite fue entre 50 y 240 m. La longitud de las escolleras y la periodicidad de los dragados de la playa, juegan un papel importante en el efecto de los puertos sobre la línea de costa. Los cambios en la línea de costa en la zona alejada del puerto de Sisal son similares a los otros puertos, depositación al oriente y erosión aguas abajo, a pesar de que se presenten otras estructuras que modulen estas tendencias (como los ReefBalls™ y el muelle de Sisal). El déficit de sedimento corriente abajo debido a la presencia de los puertos afecta la resiliencia del sistema al disminuir su capacidad de recuperación ante eventos extremos. Estos estudios ayudan a entender mejor el efecto del desarrollo de puertos en

la costa y su resiliencia, además, proporciona información que ayude a mejorar los sistemas de manejo en la zona costera.

## Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero del CONACYT a través de los proyectos Cátedras CONACYT-1146, INFR-2014-01-225561, CB-284819, LANRESC [299063], TAMU-CONACYT 19-20-013y de la DGAPA UNAM (PAPIIT IN101218 y PAPIIT IA100418) y a Camilo Rendón Valdez por su apoyo técnico en el campo y Gonzalo Martín Ruiz y Roger Pacheco Castro por su apoyo en cómputo. |

## Referencias

- Franklin, G. L.; Medellín, G.; Appendini, C. M.; Gómez, J. A.; Torres-Freyermuth, A.; González, J. L. y Ruiz-Salcines, P. (2021). Impact of port development on the northern Yucatan Peninsula coastline. *Regional Studies in Marine Science*, 101835.
- Lake, P. S. (2013). Resistance, resilience and restoration. *Ecological management & restoration*, 14(1), 20-24.
- Vos, K.; Harley, M. D.; Splinter, K. D.; Simmons, J. A. y Turner, I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Eng.* 150, 160-174.