

Protección del tramo de costa “La Guardia – La Restinga” en Venezuela. 2: Dinámica Costera

Luis Fermín Córdova López

Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana

e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Ronnie Torres Hugues

Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana

e-mail: ronnie@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

En el tramo costero “La Guardia – La Restinga” se está produciendo una acelerada erosión de la playa. En aras de mitigar este fenómeno se realiza el estudio del comportamiento para condiciones normales y extremas del oleaje, las corrientes en la zona y el transporte de sedimentos, teniendo en cuenta los datos aportados por las autoridades ambientales de Venezuela.

Palabras clave: costa, hidrodinámica, oleaje, sedimentos, Venezuela.

Protection of “La Guardia - La Restinga” coast in Venezuela. Part 2: Coastal Dynamics

ABSTRACT

In the coastal sector of “La Guardia – La Restinga”, an accelerated erosion of the beach is produced. In order to mitigate it, a study about wave, current and sediment transport for calm and extreme conditions is done, take into account the data set from Venezuelan environmental authorities.

Keywords: coast, hydrodynamics, sediments, Venezuela, waves.

INTRODUCCIÓN

En el tramo costero conocido como La Guardia – La Restinga se está produciendo una acelerada erosión de la playa producto de eventos ambientales y la acción del hombre, lo cual está afectando negativamente el desarrollo socio-económico de la zona. Las estructuras colocadas hace más de 20 años han modificado el comportamiento hidrodinámico y el movimiento del sedimento. Sobre la nueva configuración se deben llevar a cabo nuevas acciones para resolver problemas ambientales graves que sufre la región, los que se relacionan con las penetraciones del mar y con el espacio insuficiente para salvaguardar sus botes de pesca. Esto requiere de un estudio abarcador donde se aprecie el comportamiento del oleaje, de las corrientes y del transporte de sedimentos para condiciones de calma y extremas. Para ello se han empleado los modelos matemáticos SWAN y SMC.

ESTRUCTURA DE LA MALLA DEL TERRENO PARA LA MODELACIÓN

La malla de trabajo para la modelación de la hidrodinámica de la región parte de los trabajos de levantamiento batimétrico que realizó un equipo del Ministerio Popular para el Ambiente de la República Bolivariana de Venezuela orientados en la visita técnica realizada al área, cuyo dictamen se recoge en Córdova y Torres (2009). Consiste de 26 rayos que barren la región desde los 3 hasta los 8 m de profundidad. Posteriormente se enlazaron los perfiles medidos y los puntos de los rayos, ver figura 1. Para estos perfiles se recogieron las coordenadas cada 20 metros, llegando hasta los 100 metros desde la costa y a una profundidad de 3 metros aproximadamente, según se explicó en Torres y Córdova (2013).

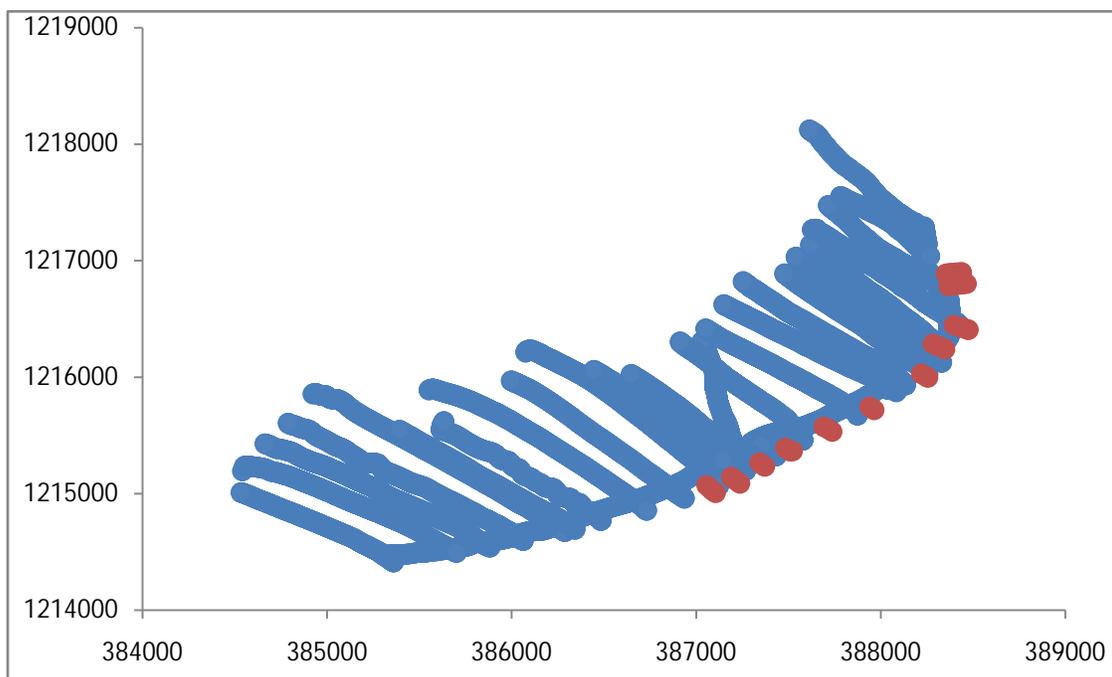


Figura 1. Acoplamiento entre los puntos de batimetría y los puntos de los perfiles (en rojo los puntos de los perfiles, en azul los puntos de los rayos)

Esta información fue suministrada a los modelos matemáticos que son los encargados de realizar la modelación matemática de la hidrodinámica y del transporte de sedimentos. Para ello

se ha empleado el Sistema de Modelado Costero (SMC) versión 2.5 (GIOC 2006) y el modelo SWAN versión 40.85 (Booij et. al. 2007). Específicamente, dentro del SMC se ha empleado el Modelado del Terreno para reproducir la batimetría y la línea de costa incluyendo las estructuras actuales y futuras, ver figura 2, y el modelo MOPLA para el estudio del oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos.

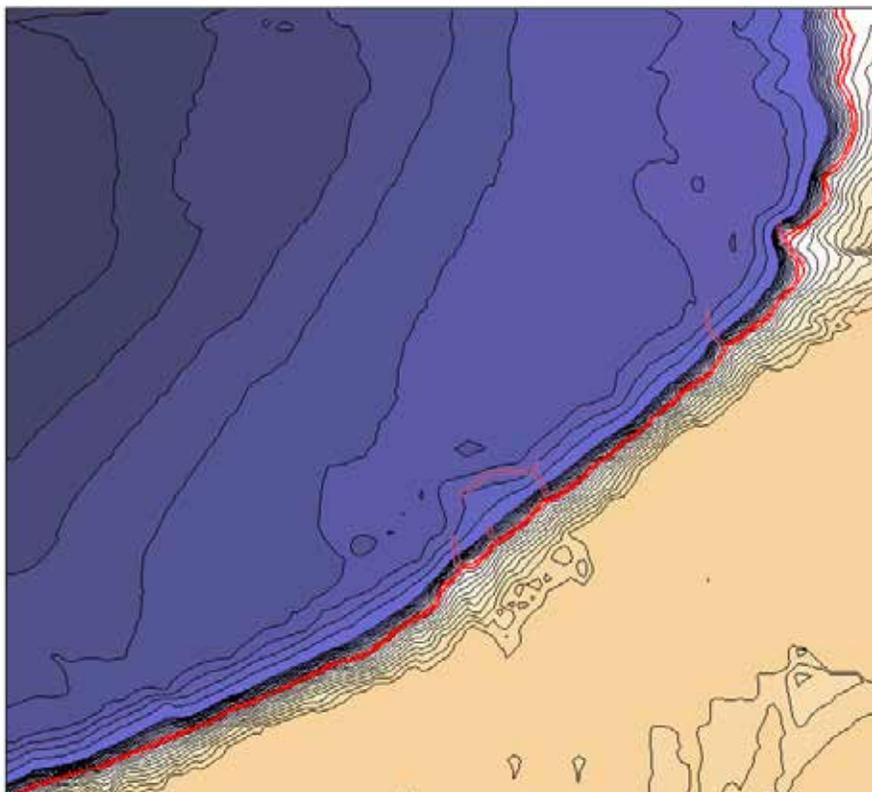


Figura 2. Reproducción en SMC de la batimetría y las estructuras actuales

En esta figura, la línea roja marca la cota cero y las estructuras actuales están representadas por polígonos cerrados de color rojo. La equidistancia del plano es de 1 m, la isobata más próxima a la esquina izquierda superior es la de -8 m, representa la mayor profundidad reflejada en la batimetría utilizada, y a la esquina derecha inferior es de +2 m.

ESTUDIO HIDRODINÁMICO EN CONDICIONES DE CALMA

Datos de oleaje para condiciones de calma

Después de analizar las diferentes fuentes de información sobre el oleaje, Torres y Córdova (2013) determinaron que la fuente de trabajo para esta zona correspondía al Global Wave Statistics (GWS) (Hogben et al. 1986). Dentro de esta, el oleaje que azota a las costas de Venezuela es caracterizado por las direcciones noreste, norte y noreste de la zona 47. Para cada dirección se han seleccionado las 5 olas que son representativas de ellas, lo cual se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Características del oleaje normal representativo de cada dirección (tomado de Torres y Córdova 2013)

Ola	Noroeste, 1,27%			Norte, 3,79%			Noreste, 27,73%		
	H[m]	T[s]	P[%]	H[m]	T[s]	P[%]	H[m]	T[s]	P[%]
1	0,5	4,5	0,29	1,5	5,5	0,59	1,5	5,5	3,79
2	0,5	4	0,27	0,5	4,5	0,53	1,5	6,5	3,39
3	1,5	4,5	0,16	1,5	4,5	0,44	2,5	6,5	2,64
4	0,5	5,5	0,12	0,5	5,5	0,37	2,5	5,5	1,89
5	1,5	5,5	0,12	1,5	6,5	0,32	2,5	7,5	1,7
Suma			0,96			2,25			13,41

H: altura de ola, T: periodo de la ola, P: probabilidad de ocurrencia

Como se puede apreciar, estas 5 olas registran el 76, el 59 y el 48% del porcentaje de ocurrencia de cada dirección respectivamente, según se explicó en el primer artículo de esta colección.

Propagación del oleaje en condiciones normales

Para analizar el comportamiento del oleaje y las corrientes se han modelado en el módulo MOPLA del SMC las olas de la tabla 1. En la propagación del oleaje se aprecia el efecto que provoca el fondo sobre el oleaje, reproduciendo los fenómenos de refracción, asomeramiento, rotura, fricción y difracción, ver figura 3. Las mayores alturas de olas que llegan a la zona activa de transporte de sedimento provocarán mayor cantidad de flujo de sedimento, así como definirán la dirección del transporte neto, elemento importante en el estudio de rehabilitación del Sector 5, ver tabla 2.

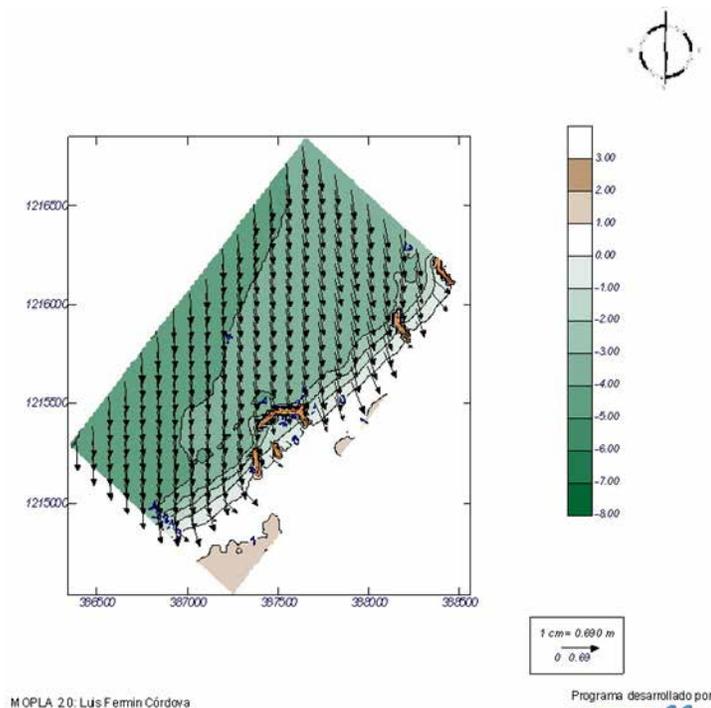


Figura 3. Fenómeno de refracción del oleaje del Norte con $H = 0,5$ m y $T = 4,5$ s

Tabla 2. Máxima altura de ola en la zona costera.

No.	Dirección	Ho [m]	T [s]	Hzc [m]	Posible dirección del transporte de sedimentos
1	Noroeste	0,5	4	0,75	
2		0,5	4,5	0,73	
3		0,5	5,5	0,75	
4		1,5	4,5	1,69	
5		1,5	5,5	1,73	
6	Norte	0,5	4,5	0,69	NE-SO
7		0,5	5,5	0,66	NE-SO
8		1,5	4,5	1,55	NE-SO
9		1,5	5,5	1,63	NE-SO
10		1,5	6,5	1,72	NE-SO
11	Noreste	2,5	7,5	1,30	NE-SO
12		1,5	5,5	1,70	NE-SO
13		1,5	6,5	1,05	NE-SO
14		2,5	6,5	1,50	NE-SO
15		2,5	5,5	1,80	NE-SO

Ho: altura de la ola en aguas profundas,
Hzc: altura de la ola en la zona costera.

Estudio de las corrientes debido a oleaje en condiciones normales

La distribución de las corrientes está estrechamente vinculada con el comportamiento del transporte de sedimentos, de esta forma se aprecia cómo las corrientes generadas por el oleaje del noroeste presentan mayoritariamente componentes perpendiculares a la costa, ver figura 4, lo que genera un transporte de sedimentos en el mismo sentido. Mientras que para las direcciones norte y noreste esta se mueve, principalmente, paralela a la costa, ver figura 5. Los valores promedio de velocidad de corriente se encuentran en el intervalo entre 0.06 y 0.08 m/s, en el caso de los valores máximos estos están en el orden de los 0,15 m/s, particularmente se observan en la zona crítica motivo de estudio.

ESTUDIO HIDRODINÁMICO EN CONDICIONES EXTREMAS

Propagación de oleaje en condiciones extremas

La propagación del oleaje para las condiciones extremas se lleva a cabo a partir de dos fuentes de información las cuales se ilustran en la tabla 3, la duración seleccionada del fenómeno es 12 horas, también se realiza la propagación y aplicando el modelo SWAN.

En la modelación de estas condiciones, como es de esperar, los fenómenos de asomeramiento, rotura y fricción con el fondo son más efectivas en la transformación de la ola para los casos 4, 5 y 6, que corresponden con la mayor altura de ola en Aguas Profundas.

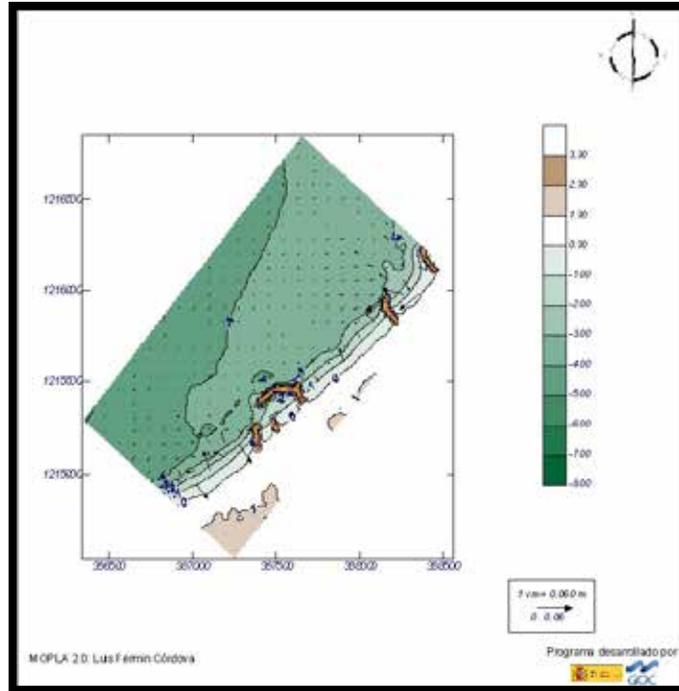


Figura 4. Comportamiento de las corrientes para oleaje del NO con $H=0,5$ m y $T = 5,5$ s

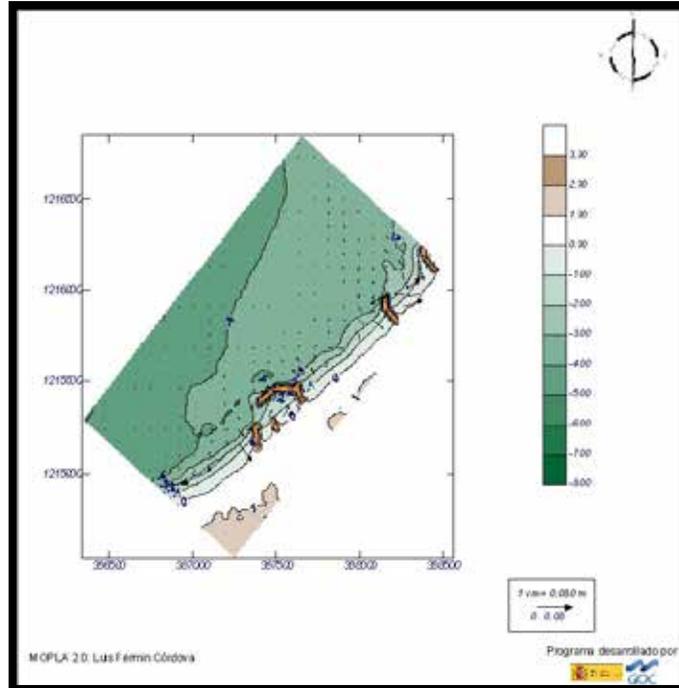


Figura 5. Comportamiento de las corrientes para oleaje del N con $H=0,5$ m y $T = 4,5$ s

Tabla 3. Características del oleaje para condiciones extremas

No.	H[m]	T[s]	ϕ [°]	Dirección	Fuente
1	4	12	+45	Noroeste	(Padrón 1990)
2	4	12	0	Norte	(Padrón 1990)
3	4	12	-45	Noreste	(Padrón 1990)
4	10,68	17,55	+45	Noroeste	GWS
5	10,68	17,55	0	Norte	GWS
6	10,68	17,55	-45	Noreste	GWS

ϕ : ángulo de aproximación de la ola

No obstante lo señalado, a lo largo de la propagación, en todos los puntos del rayo, las alturas de ola para estos casos son mayores que en los casos 1, 2 y 3, ver figura 6. Véase como en esta figura decae rápidamente la altura de ola para el caso 5, lo mismo ocurre con las otras direcciones. Esto representa gráficamente el fenómeno antes mencionado. Además, se ha obtenido el comportamiento de las alturas de olas en la isobata 3, ver figura 7 y tabla 4, cuando existe 1 m de marea, es decir 4 m de profundidad. De esta se puede apreciar cómo el oleaje que produce más altura de ola en la zona del comienzo de La Restinga, punto 8, es el proveniente del norte.

Por lo que se considera, para el diseño de las acciones ingenieras, el oleaje en Aguas Profundas con $H = 10,68$ m y $T = 17,55$ s, proveniente del Norte.

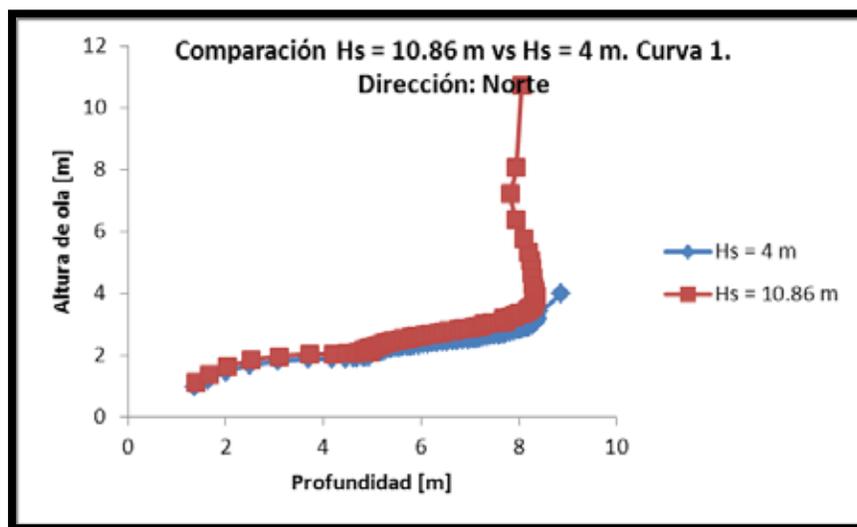


Figura 6. Decaimiento de las alturas de ola para la dirección norte

En la tabla 4 se muestran elementos de la propagación del oleaje en los puntos de la isobata 3, la cual se encuentra frente a las estructuras.

Para el diseño de las estructuras se considerará el oleaje con mayor altura de ola significativa, $H = 2,17$ m y $T = 15,33$ s.

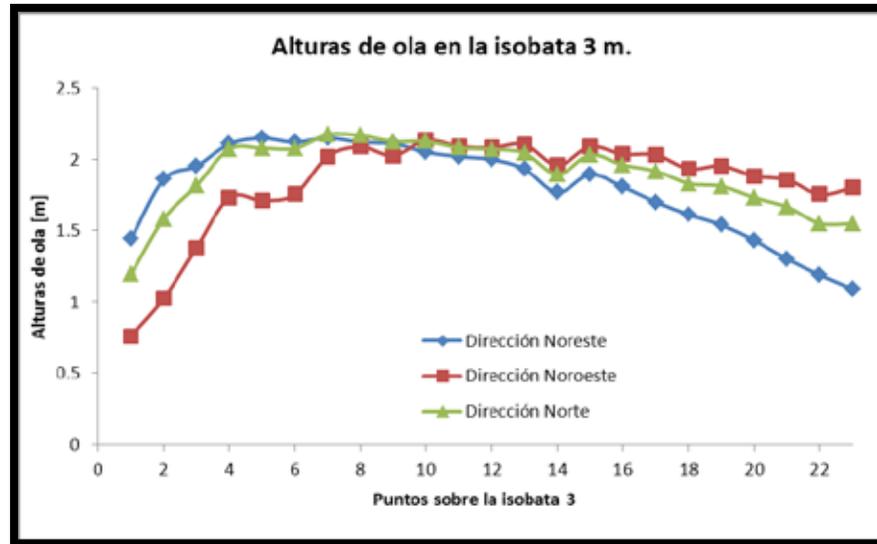


Figura 7. Comportamiento de las alturas de ola en la isobata 3

Tabla 4. Alturas de ola para condiciones extremas en la isobata 3

No.	Puntos	H [m]	T [s]	Wave Setup [m]
1	Comienzo de La Restinga	2,17	15,33	0,026
2	Espigón 1	2,13	15,32	0,027
3	Atracadero	2,13	15,38	0,029
4	Nuevo Atracadero	2,07	15,39	0,031
5	Rompeolas Sector 3	1,90	15,38	0,036
6	Espigón sector 3	2,03	15,37	0,022
7	Rompeolas Sector 2	1,96	15,35	0,025
8	Espigón sector 2	1,83	15,33	0,027

Estudio de las corrientes debido a oleaje en condiciones extremas.

Para estas condiciones, el valor de velocidad de la corriente para la zona de La Restinga oscila entre 0,11 y 0,17 m/s, ver figura 8, que resulta en cerca del doble del valor que para las condiciones normales, por lo cual bajo estas condiciones se pone en movimiento más cantidad de sedimentos.

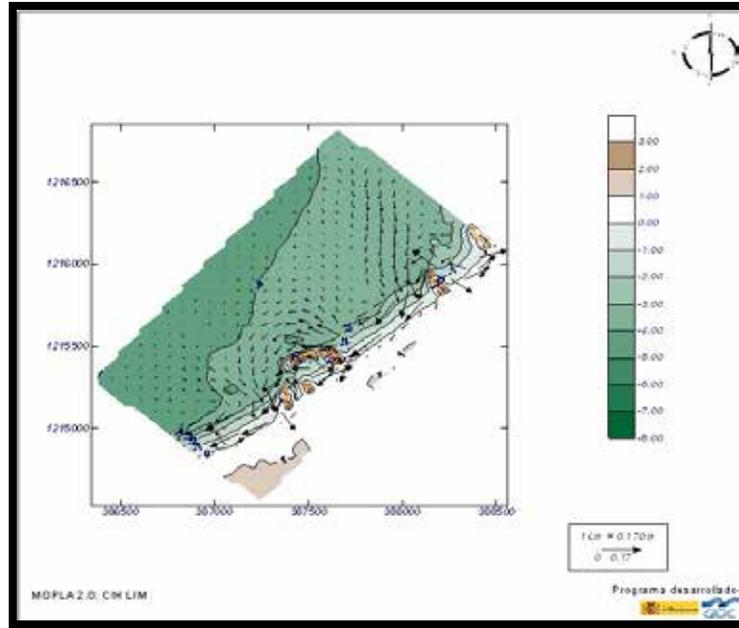


Figura 8. Vectores de Corriente para condiciones extremas provenientes del Norte

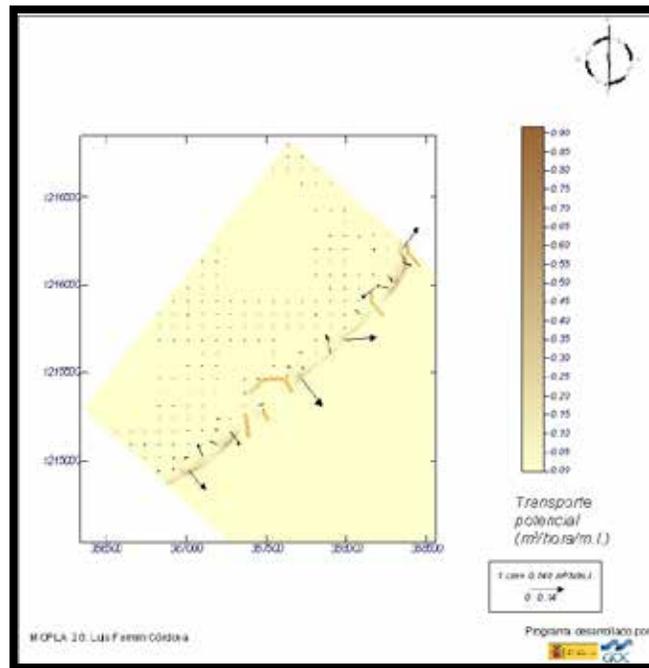


Figura 9. Comportamiento del Transporte de sedimentos para oleaje del NO con $H = 0,5$ m y $T = 5,5$ s

Se ha estimado el transporte de sedimentos, S, para las condiciones de oleaje seleccionadas en la zona de La Restinga, lo cual se muestra en la tabla 5.

ESTIMACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CONDICIONES DE CALMA

El transporte de sedimentos se estima para condiciones normales y extremas a partir del SMC. El comportamiento de este fenómeno será observado detalladamente en el comienzo de La Restinga y a lo largo del Sector 5. Como se ha explicado anteriormente, el transporte de sedimentos está fuertemente vinculado con las corrientes que se producen por la rotura del oleaje a pocos metros de la costa. Esto se manifiesta en la figura 9.

Tabla 5. Estimación del transporte de sedimentos para condiciones normales

No	H [m]	T [s]	Dirección	Probabilidad de ocurrencia [%]	S [m ³ /h/ml]	Ancho zona activa [m]	S [m ³ /a]
1	0,5	4,5	Noroeste	0,2853	-0,20	50	-250
2	0,5	4	Noroeste	0,2664	-0,18	50	-210
3	1,5	4,5	Noroeste	0,1565	-1,20	80	-1316
4	0,5	5,5	Noroeste	0,1237	0,45	50	244
5	1,5	5,5	Noroeste	0,1199	-1,60	90	-1512
Total							-3045
6	1,5	5,5	Norte	0,5854	3,00	90	13846
7	0,5	4,5	Norte	0,5322	-0,30	50	-699
8	1,5	4,5	Norte	0,4372	1,70	90	5860
9	0,5	5,5	Norte	0,3687	0,55	30	533
10	1,5	6,5	Norte	0,1026	5,00	90	4044
Total							23584
11	1,5	5,5	Noreste	3,7864	2,00	20	13268
12	1,5	6,5	Noreste	3,3966	3,00	30	26779
13	2,5	6,5	Noreste	2,6449	3,00	40	27803
14	2,5	5,5	Noreste	1,8932	2,50	40	16584
15	2,5	7,5	Noreste	1,6983	4,00	50	29754
Total							114188
TS NETO							134727
Nota: el signo negativo indica que la arena se mueve de Oeste a Este							

ESTIMACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CONDICIONES EXTREMAS

Para estimar el transporte de sedimentos producido por condiciones extremas se opera de la misma forma que para el caso de condiciones normales. Los resultados se observan en la tabla 6, en la última columna se muestra el volumen de sedimento que es movido producto de este temporal a lo largo de su duración.

Tabla 6. Estimación del transporte de sedimentos para condiciones extremas

No	H [m]	T[s]	Dirección	S [m ³ /h/ml]	Ancho zona activa [m]	S [m ³ /h]	V [m ³]
1	10.68	17.55	Noreste	20	50	1000	12000
2	10.68	17.55	Norte	100	80	8000	96000
3	10.68	17.55	Noroeste	-32	80	-2560	-30720

Esto significa que los eventos que presentan la dirección Norte ocasionan las mayores tasas de erosión. El comportamiento del transporte por la dirección Norte se aprecia en la figura 10.

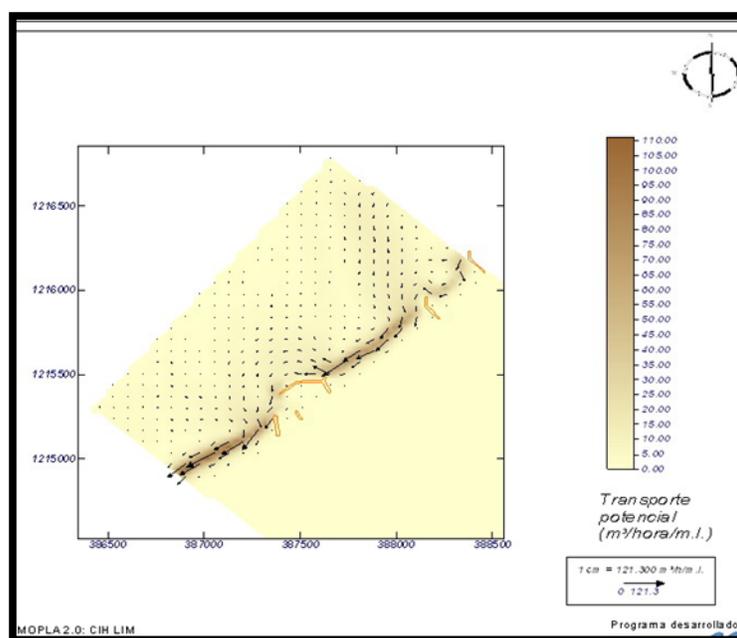


Figura 10. Comportamiento del transporte de sedimentos debido al oleaje extremo del N

En la misma se aprecia que en la zona de La Restinga el transporte de sedimentos está orientado hacia el Suroeste. En caso de que se considere realizar un vertimiento de arena en la zona de La Restinga, Sector 5 y colocación de un rompeolas paralelo a la línea de costa para disminuir la energía del oleaje, el volumen inicial del vertimiento debe tener en cuenta la pérdida ocasionada por eventos de este tipo más una reserva del 40% de este valor de acuerdo al criterio de diseño de suministro de arena utilizado por compañías holandesas, en la que se considera las pérdidas de material de menor granulometría por efecto del oleaje.

El volumen de mantenimiento de esta acción ingeniera debe ser igual a la cantidad de arena que señala la tabla 6, en caso de mantenerse la actual condición de transporte de sedimento.

CONCLUSIONES

Según el análisis realizado se establecen para condiciones normales 15 casos de oleaje, correspondiente a los 5 con mayor probabilidad de ocurrencia por cada dirección analizada. Estos casos han sido obtenidos del GWS. Para condiciones extremas fueron analizados los valores aportados por dos fuentes, resultando como la más desfavorable la relacionada con una altura de ola de $H=10,68$ m y un periodo de la ola $T=17,55$ s. Para estas condiciones, se ha visto que, producto de los diferentes fenómenos que se ponen de manifiesto en la propagación del oleaje, las olas que llegan a la isobata 3, en la que se ubican las terminaciones de estructuras presentes, la altura de ola es de 2,17 m y el periodo es de 15.33 s.

La corriente en condiciones normales presenta una velocidad de 0,08 m/s, la dirección de la misma depende en gran medida de la dirección del oleaje. Por su parte, para condiciones extremas esta llega a alcanzar cerca del doble de velocidad, encontrándose valores de hasta 0,17 m/s en la zona de La Restinga.

Para condiciones de calma se aprecia que producto del oleaje proveniente de las 3 direcciones se pone de movimiento en el año un valor neto de 134727 m³ de noreste a suroeste. Para condiciones extremas los mayores volúmenes de pérdida se establecen para la dirección norte, siendo de $96\ 000$ m³.

REFERENCIAS

- Booij, N.; Ris, R. and Holthuijsen, L. (2007).** “SWAN version 40.85”, Delft University of Technology, SR01-US, The Netherlands, Dec.
- Córdova, L. y Torres, R. (2009).** “Resultado de las visitas técnicas realizadas a diferentes zonas costeras del litoral costero de la República Bolivariana de Venezuela.” Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, Reporte Técnico RT: 0109, La Habana, Nov.
- GIOC (2006).** “Sistema de Modelado Costero”. Universidad de Cantabria, Manual M01-SMC, Cantabria, Jun.
- Hogben, N.; Dacunha, N. and Olliver, G. (1986).** “Global Wave Statistics”. Ed. BMT Fluid Mechanics Limited, England.
- Padrón, D. (1990).** “Memoria justificativa”, Departamento Estatal Ambiental, Reporte Técnico MJ-0190, Venezuela, Sep.
- Torres, R. y Córdova, L. (2013).** “Protección del tramo de costa "La Guardia - La Restinga" en Venezuela. 1: Caracterización”. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIV, No.1, pp.19-33, CIH, CUJAE, La Habana.