Capítulo 5: Hidrodinámica

La hidrodinámica de playa Palmeras se estableció a partir del análisis del oleaje y de la marea. Para el primer forzador se estableció el régimen medio y extremal, y se calcularon corrientes por rotura del oleaje a pie de playa. Para el caso de la marea, se definieron patrones promedios de circulación para cada semestre del año 2011, teniendo en cuenta no solo la marea, sino también las corrientes geostróficas y las inducidas por el viento.

5.1 Hidrodinámica del oleaje

Para conocer las características del clima marítimo en playa Palmeras fue necesario partir de la serie horaria de oleaje del proyecto GOW (*Globe Ocean Waves,* Reguero et al., 2012), ubicada en aguas profundas cercanas a la isla Gorgona (Figura 5-35) y cuya longitud temporal incluye los años 1948 a 2008.

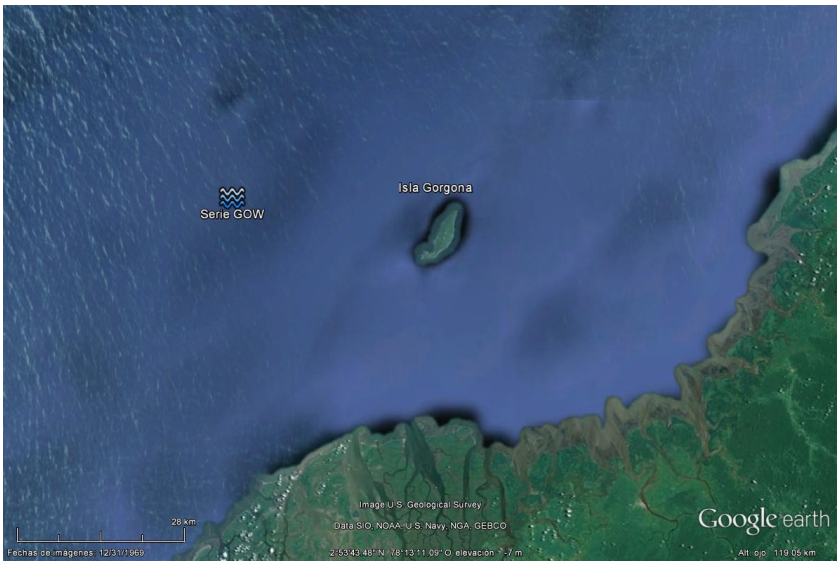


Figura 5-35. Ubicación del punto de oleaje del proyecto GOW usado como condición de frontera para propagar el oleaje hasta el PNN Isla Gorgona. Imagen tomada de Google Earth.

En la Figura 5-36 se muestra la altura de ola significante (Hs), el periodo (T) y la dirección promedia anual de la serie GOW para toda la longitud del registro. Las variables Hs y T muestran un aumento de 0.25 m y 2.2 s en 59 años respectivamente. La dirección del oleaje en aguas profundas también presenta variaciones en los 59 años analizados, pasando a ser desde el WSW para el año 1948 a ser desde el SW para el año 2008.

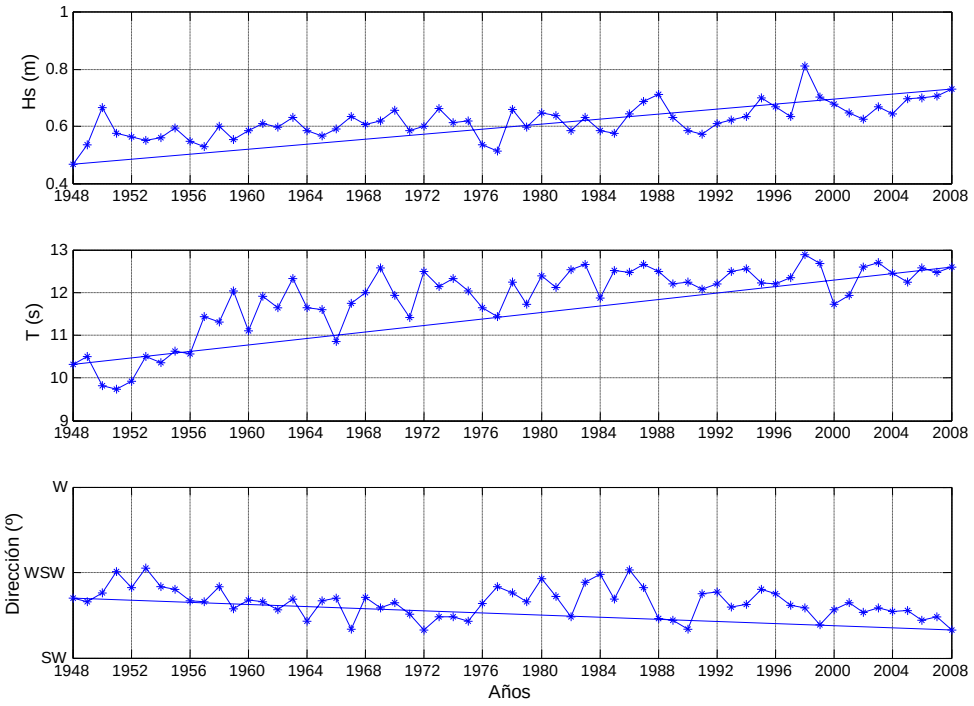


Figura 5-36 Comportamiento interanual de la serie del GOW desde 1948 hasta el 2008. La altura de ola significante (Hs) y el periodo (T) muestran tasas de ascenso durante todo el periodo. La dirección sufre una desviación desde el WSW hacia el SW.

En la Figura 5-37 se muestra la variabilidad mensual interanual de la altura de ola significante para los datos agrupados en décadas. En general, se observa que cada década tiene asociadas mayores alturas de ola en el ciclo mensual con relación a la década anterior, siendo la década 1998-2008 la de mayores valores en los 59 años de datos. Para un mismo mes las variaciones en Hs son de hasta 0.22 m, por ejemplo, junio de la primera década comparado con la última**.**

El periodo del oleaje también muestra un aumento significativo al ser analizado por décadas (Figura 5-38). Esta variable muestra la misma tendencia de la altura de ola, cada década tiene asociado mayores periodos de ola que la década anterior en su ciclo

mensual, teniendo aumentos de hasta 3.3 s para el caso de noviembre de la primera y última década.

Finalmente, el ciclo mensual de la dirección del oleaje en aguas profundas indica que el oleaje tiende a ser más desde el sur, sin embargo sigue la tendencia del ciclo mensual, en la primera época del año un oleaje desde el W y WSW mientras que la segunda tiene oleajes asociados desde el WSW y SW.

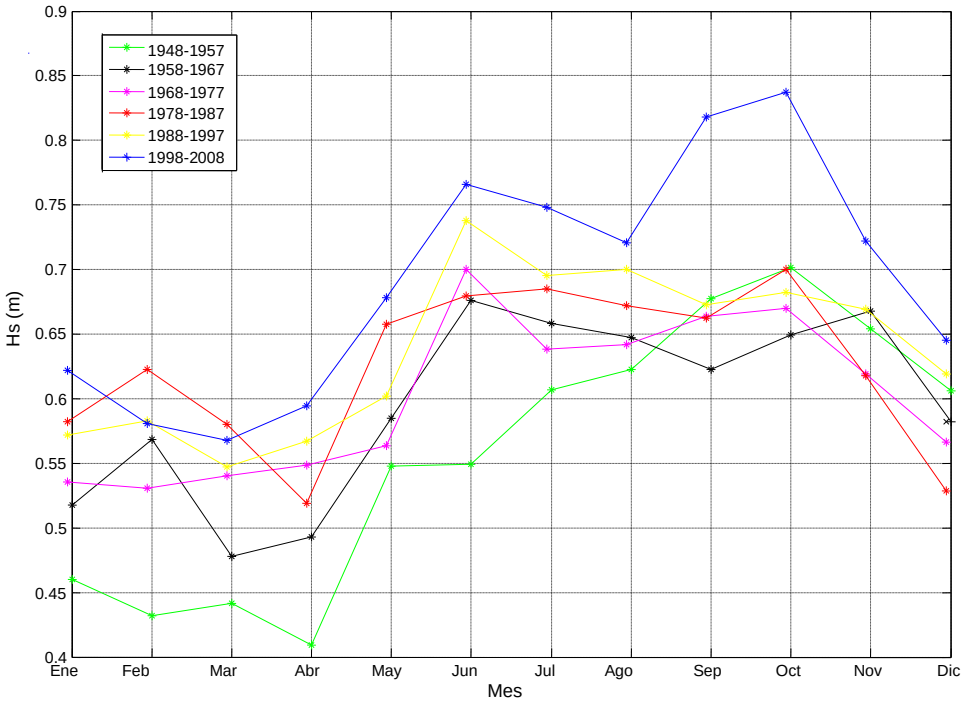


Figura 5-37 Variabilidad mensual interanual de la Hs de la serie GOW. Datos agrupados cada 10 años.

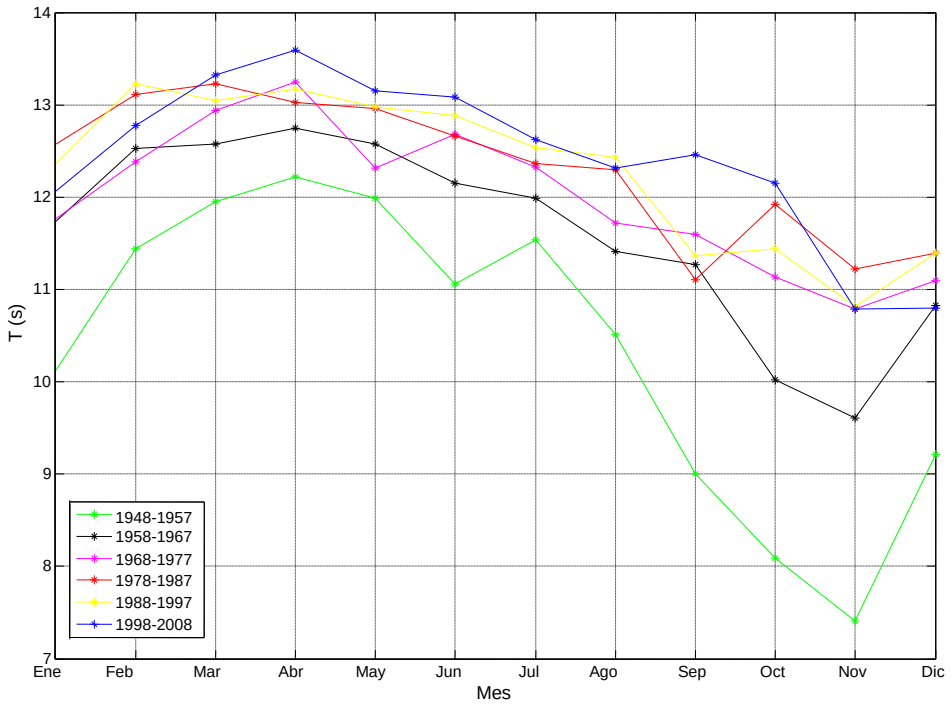


Figura 5-38 Variabilidad mensual interanual del T de la serie GOW. Datos agrupados cada 10 años.

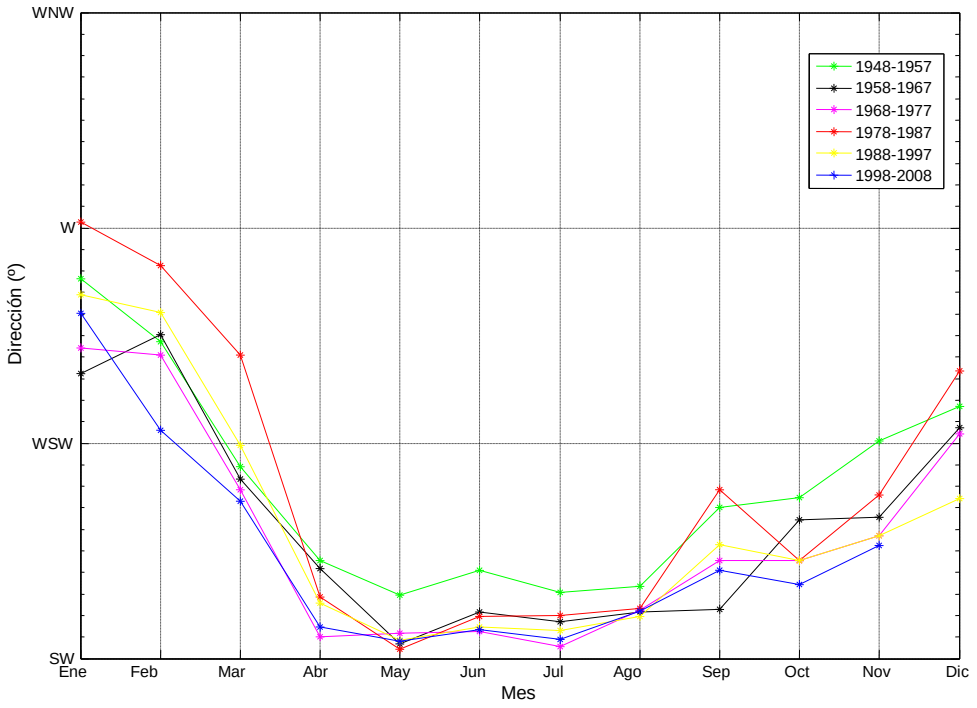


Figura 5-39 Variabilidad mensual interanual de la dirección del oleaje de la serie GOW. Datos agrupados cada 10 años.

A partir de la serie GOW en aguas profundas descrita anteriormente, se realizó la caracterización del régimen medio y extremal del oleaje local en playa Palmeras. Igualmente, a partir de esta serie se establecieron los escenarios más representativos para las corrientes por rotura del oleaje, las cuales fueron calculadas utilizando el modelo COPLA del SMC (Sistema de Modelado Costero).

5.1.1 Régimen medio del oleaje local

Con el fin de caracterizar el oleaje en playa Palmeras en escala estacional e interanual, fue necesario implementar un modelo numérico de generación y propagación del oleaje, y establecer las posibles tendencias a mediano y largo plazo. El modelo elegido para las simulaciones fue el SWAN (*Simulating WAves Nearshore*) desarrollado por la Universidad de Delft (Booij, Ris, & Holthuijsen, 1999).

Para representar con detalle la hidrodinámica del oleaje en la zona de estudio, se discretizó el domino en cuatro mallas anidadas, donde las exteriores alimentan las interiores. La primera de ellas tenía como condición de frontera la serie horaria del proyecto GOW para los años 1990 – 2008, pues por limitaciones computacionales no se pudo trabajar con la serie completa. Igualmente, el modelo utilizó vientos de reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), como condiciones de frontera (ver Capítulo 3).

Se obtuvieron tres series de oleaje horarias durante 19 años (1990-2008) en puntos distribuidos alrededor de playa Palmeras como se muestra en la Figura 5-40. El primero de estos puntos (rojo) corresponde a la serie simulada (llamada serie simulada en este trabajo) ubicada en el mismo punto de mediciones del sensor Awac 1000 con el fin de validar los datos simulados con datos medidos in-situ. Los puntos F1 y F2 (amarillos) se simularon para determinar el flujo medio de energía del oleaje en playa Palmeras (ver Capítulo 7).

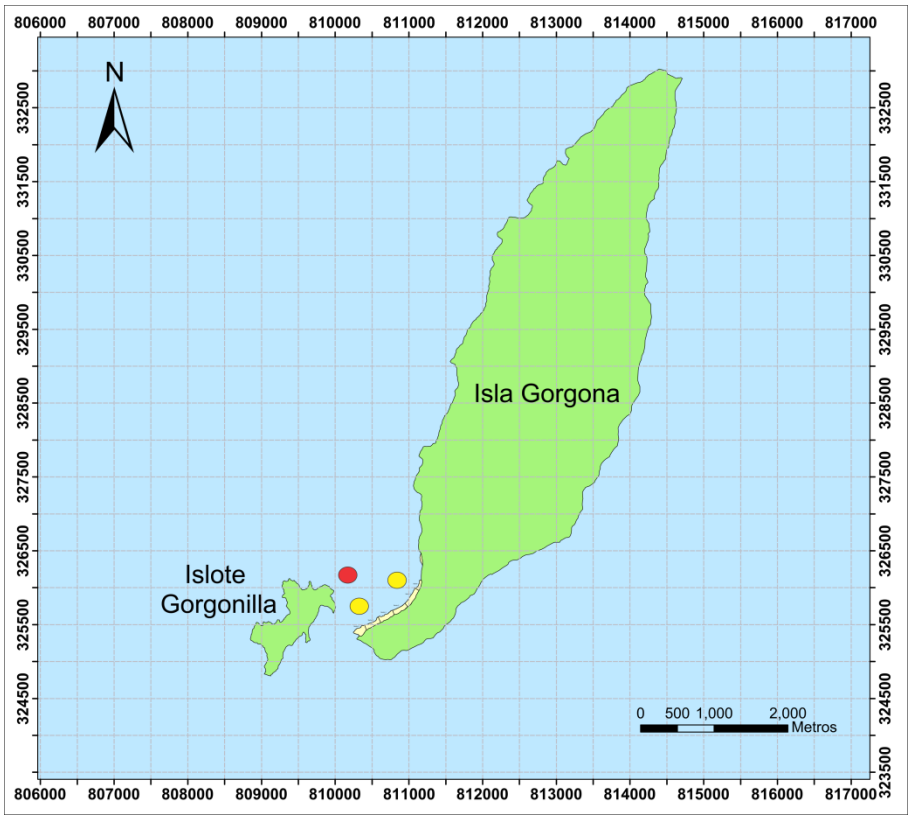


Figura 5-40 Ubicación de las series a pie de playa resultantes de la propagación del oleaje de fondo (GOW) con el SWAN.

Validación

La validación consiste en comparar los resultados del modelo con un conjunto de datos medidos, con el fin de comprobar que se está reproduciendo la dinámica real del sistema. En este caso se hizo una validación en el dominio de la probabilidad, que consistió en la comparación directa de las funciones de probabilidad acumulada para las series simulada y medida.

En la Figura 5-41 se muestra el esquema metodológico seguido para la validación de las propagaciones hasta playa Palmeras. Se partió de una serie en aguas profundas validada (Requejo, 2009), la cual fue la condición de contorno para las simulaciones hasta aguas someras aledañas a la zona de estudio.

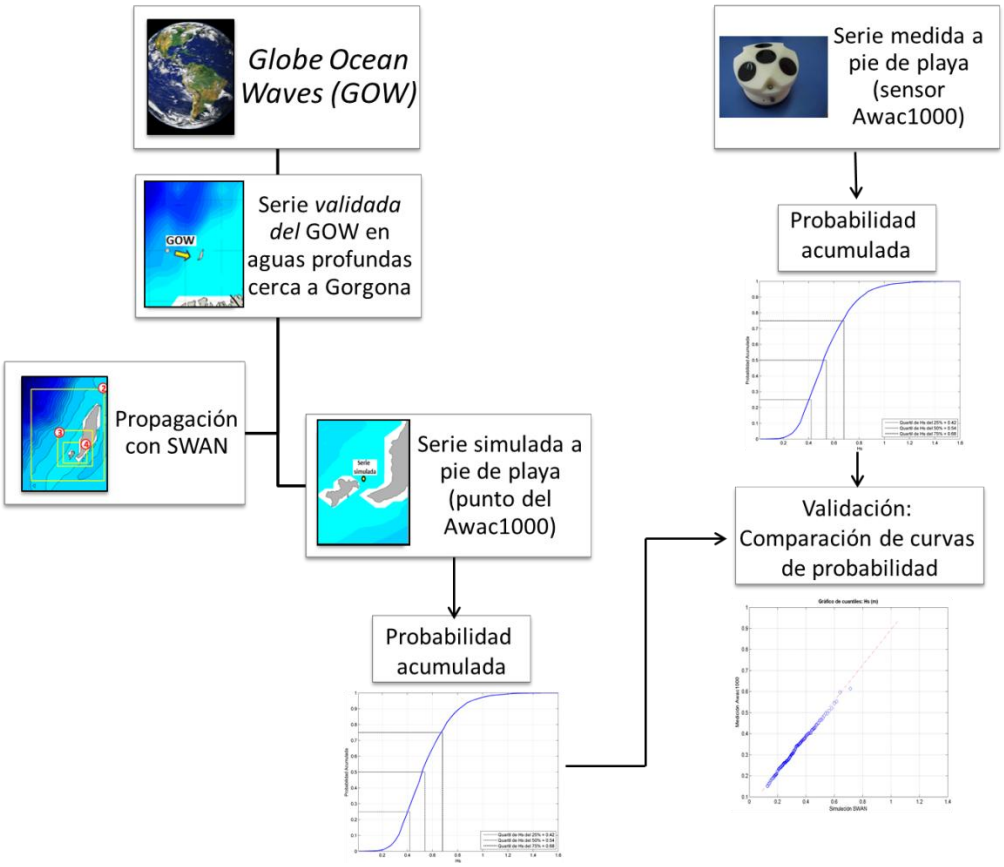


Figura 5-41 Esquema metodológico para la validación del oleaje local (serie simulada) a partir del oleaje en aguas profundas (serie GOW).

Para la validación se usó la distribución de probabilidad de la serie de 19 años de altura de ola significante (Hs) simulada. Esta serie fue comparada con la distribución de los datos medidos por el sensor Awac 1000 (círculo rojo en la Figura 5-40), en el periodo comprendido entre el 23 de febrero y el 4 de mayo de 2011, que corresponde al registro más largo obtenido en campo.

La Figura 5-42 muestra el gráfico de cuantiles asociados a ambas series. Se observa que existe un buen ajuste entre las alturas de ola simuladas y medidas, pues los valores registrados y simulados tienden al ajuste de la línea recta.

En general, los resultados de la validación muestran que el modelo reproduce de forma adecuada el comportamiento y el orden de magnitud del oleaje medido, aunque en algunos casos el modelo sobrestima o subestima la altura de ola.

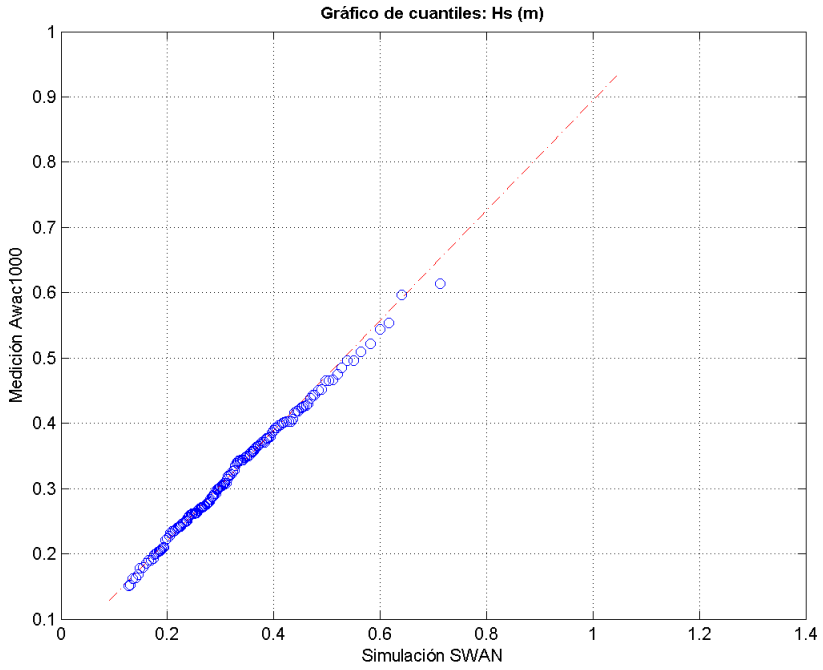


Figura 5-42. Comparación de las series simulada y medida en el punto Awac1000 por medio de una ajuste de cuantiles.

Variabilidad anual y estacional

La caracterización del régimen medio del oleaje se realizó a partir de la serie simulada a pie de playa de 19 años de longitud (1990-2008) (Figura 5-40), mediante un análisis de variabilidad anual y estacional para establecer las condiciones de este forzador en playa Palmeras.

En la Figura 5-43 se muestra la variación anual de las variables altura de ola significante (Hs), periodo pico (Tp) y dirección (Dir).Se observa un máximo en la altura de ola (0.47 m) y en el período pico (13 s) para el año 1998, el cual se caracterizó por ser afectado fuertemente por el ENSO (El Niño South Oscillation) que comenzó en 1997. Después de 1998 se observa una disminución en los valores de Hs y Tp, variables que vuelven a aumentara partir del año 2002. En el caso de las direcciones la tendencia media oscila entre el W y el N, gracias a la difracción que genera Gorgonilla al oleaje incidente.

En escala anual también se observan tendencias de crecimientos para las series de Hs y Tp. La altura de ola promedio anual aumenta a una tasa de 2.6 mm/año, mientras que el periodo pico a una tasa de 0.0115 s/año. La dirección del oleaje en este punto presenta variaciones de hasta 2.3° y parece tener relación con los periodos del oleaje, cuando

estos aumentan, el oleaje proviene más del norte, sin embargo, estas variaciones son muy pequeñas.

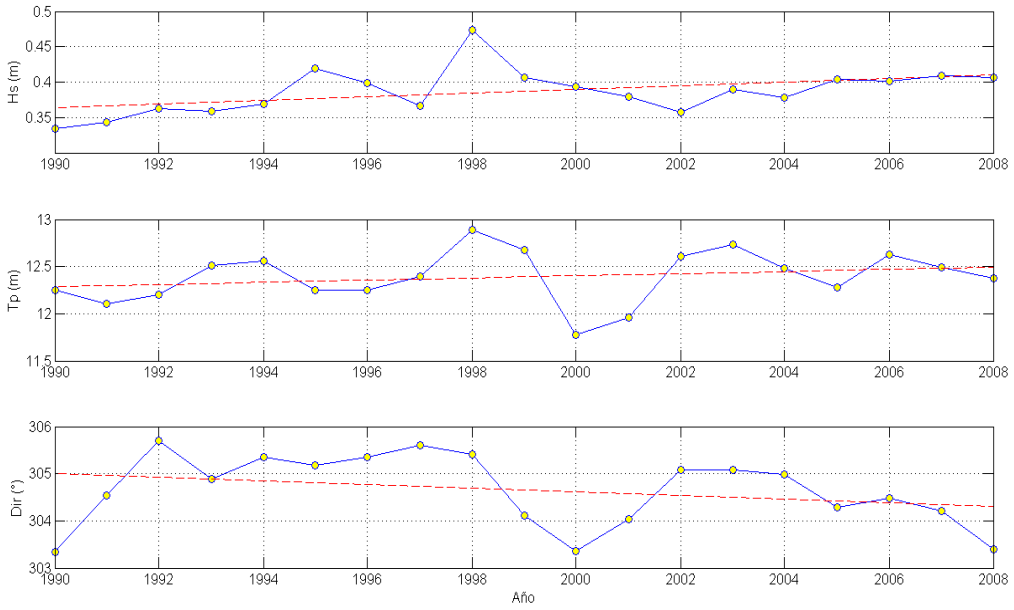


Figura 5-43. Variabilidad anual de altura de ola significante, período pico y dirección de oleaje de la serie simulada. En rojo punteado las líneas de tendencia.

La variación estacional del oleaje en la zona de estudio se representa en la Figura 5-44. En el primer semestre del año (época seca), de diciembre a mayo, se presentan las alturas de ola más pequeñas. En esta época la ZCIT se desplaza hacia el sur y permite la entrada de los vientos Alisios del Noreste por el istmo de Panamá. En la época húmeda (junio a noviembre), se presenta un oleaje más fuerte, que es generado por los vientos Alisios del Sureste (ZCIT hacia el norte). La altura de ola es mayor respecto a la época seca y los períodos son menores.

La dirección del oleaje también presenta variaciones en el ciclo mensual, siendo más del norte en los primeros dos meses del año, y varía gradualmente hacia el oeste hasta estabilizarse aproximadamente desde el mes de julio. Las máximas variaciones promedias de la dirección del oleaje en el ciclo mensual son de 6.9°, y a pesar de ser mayores que las variaciones interanuales, siguen siendo pequeñas, pero muy representativas para la forma en planta de playa Palmeras (ver Capítulo 7).

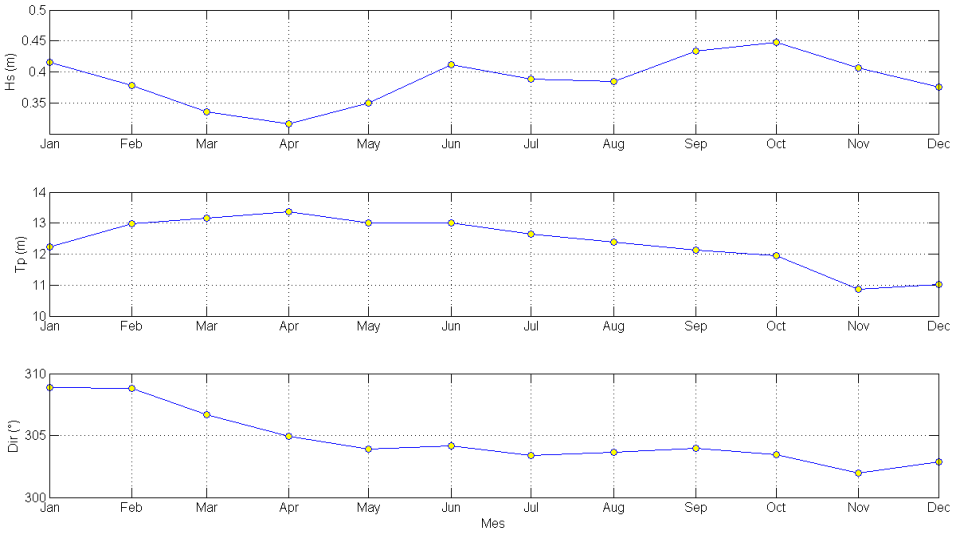


Figura 5-44 Variación media mensual de altura de ola significante, período pico y dirección de oleaje de la serie simulada.

Además de las tendencias interanuales y estacionales en Hs, Tp y Dir, se presentan variaciones espaciales y locales en el comportamiento del oleaje, debidas principalmente a la irregularidad de la batimetría y a la morfología del sistema.

En la Figura 5-45 se muestran los mapas de promedios trimestrales interanuales de altura de ola significante y dirección para la zona de estudio. Es importante resaltar que el oleaje más energético se presenta durante todo el año en el sur de la isla, pero se intensifica en el trimestre SON. Igualmente, en este trimestre del año playa Palmeras recibe el oleaje más alto del año, de 0.5 m en promedio. También se observa que el sector noreste de la playa recibe un oleaje más energético que el sector suroeste ya que este último es resguardado por Gorgonilla y en la difracción este va perdiendo energía.

En el Estrecho de Tasca se presenta el proceso de interacción no lineal de dos frentes de onda, uno que ingresa sin difractar por el sur y otro difractado que ingresa por el norte. Esta dinámica tiene variaciones diurnas, con el cambio transitorio del nivel del mar con la marea.

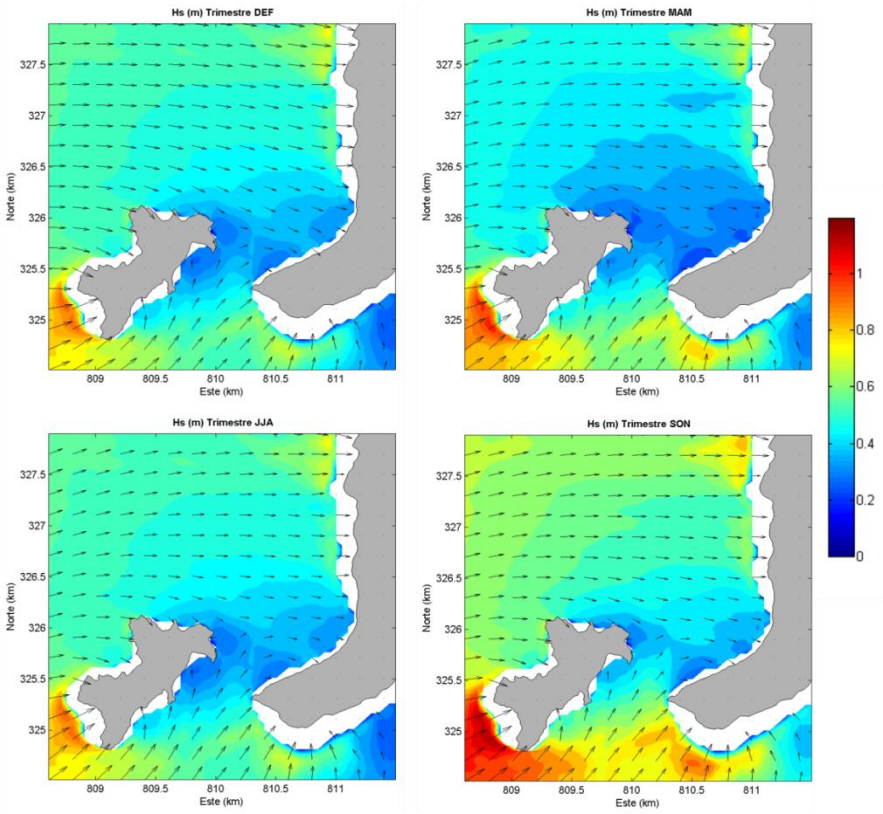


Figura 5-45.Mapas estacionales de altura de ola significante Hs (m) y dirección en la zona de estudio. Sistema de coordenadas UTM Zona 17N.

En la Figura 5-46 se muestra la rosa de oleaje para los datos simulados, en la cual se evidencia la dirección predominante de las olas que llegan a la playa. Las barras indican la dirección de donde provienen las olas y los colores muestran su magnitud en metros. La dirección promedio del oleaje difractado es WNW y las alturas de ola más probables están entre 0.2 m y 0.5 m.

En la Figura 5-47 se muestra el ajuste probabilístico realizado a los datos de altura de ola significante y periodo medio simulados, utilizando la función normal como la de mejor ajuste, con un R^2=0.9868 para la altura de ola y R^2=0.9794 para el periodo. Este ajuste a una función teórica se utiliza para determinar el comportamiento medio de las variables y específicamente sirve para predecir un valor de altura de ola, con un cierto nivel de probabilidad de ocurrencia. Se observa que los datos se aproximan muy bien a la función normal exceptuando algunos puntos de los extremos.

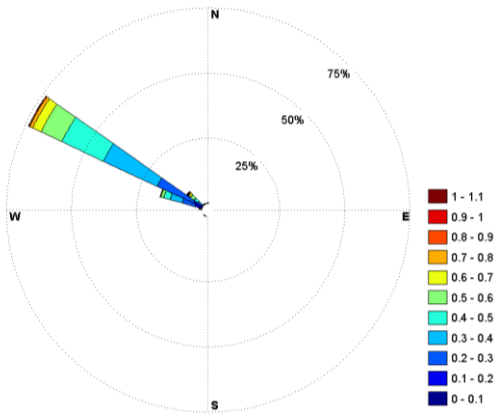


Figura 5-46. Distribución de las direcciones del oleaje en el punto Awac1000.

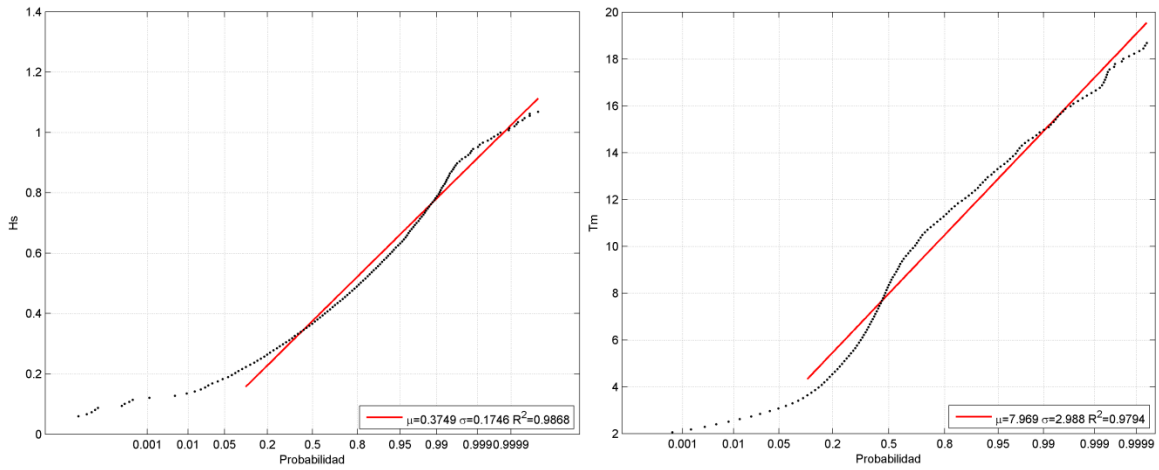


Figura 5-47. Ajuste probabilístico de la serie simulada. A) Ajuste de altura de ola significante (Hs) a la función normal. B) Ajuste de periodo medio (Tm) a la función normal.

5.1.2 Régimen extremal del oleaje

El análisis de régimen extremal fue realizado a la serie del GOW, que se encuentra en aguas profundas aledañas a la isla Gorgona (Figura 5-35). En este caso, se utilizó el ajuste a la Función Generalizada de Extremos (GEV) con el ajuste a la Función de Distribución de Pareto (DGP).

Esta metodología fue aplicada a la serie para el primer y segundo semestre del año, y da como resultado las alturas de ola asociadas a cierto periodo de retorno. En la Figura 5-48 se presenta el ajuste para la serie de la época seca (primer semestre) y en la Figura 5-49 para la época húmeda (segundo semestre).

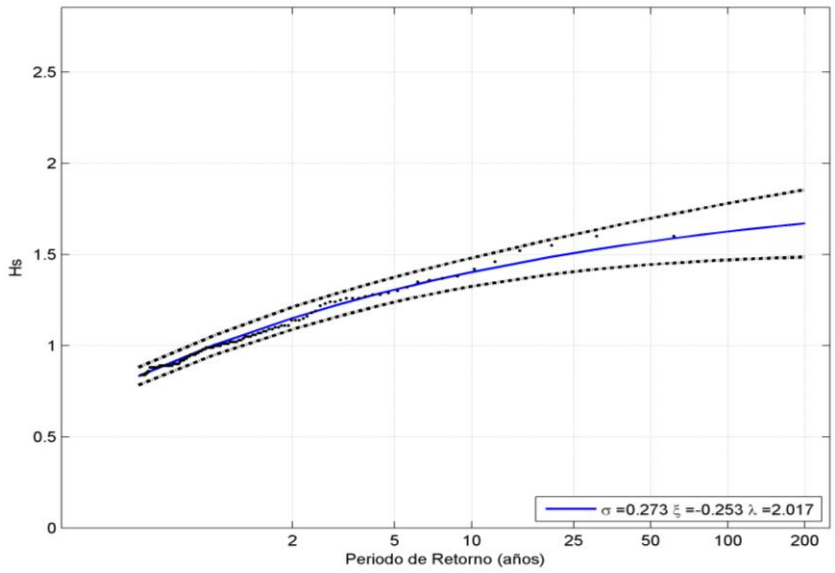


Figura 5-48. Régimen extremal de Hs (m) por medio del ajuste de la serie de oleaje del GOW a la función GEV para el primer semestre del año.

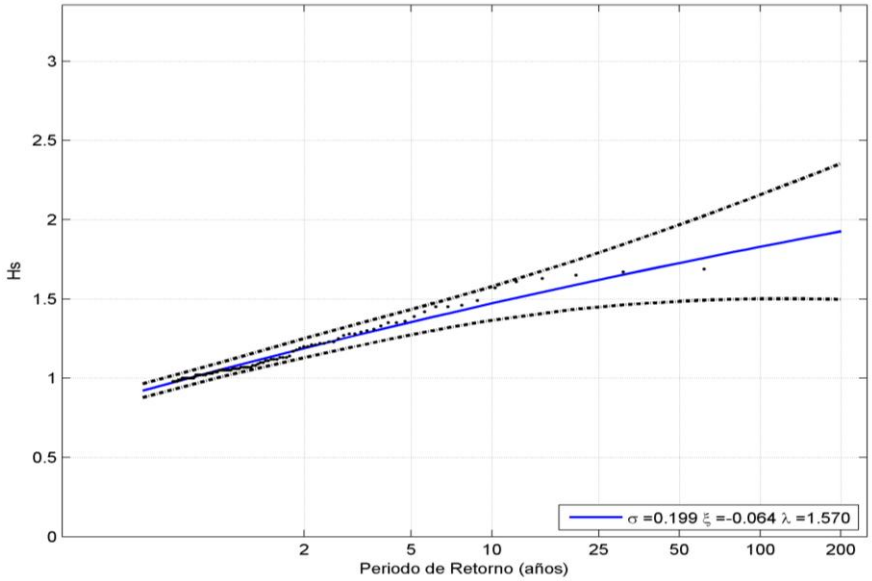


Figura 5-49. Régimen extremal de Hs (m) por medio del ajuste de la serie de oleaje del GOW a la función GEV para el segundo semestre del año.

El umbral de altura de ola para la época húmeda es mayor que para la seca, alcanzando en la primera hasta 2 m de Hs. En general, existe la tendencia a mayores alturas de ola asociadas a la época húmeda, por ejemplo, para un periodo de retorno de 25 años, en la época húmeda se esperan olas de 1.65 m, mientras en la seca de 1.5 m.

En la Figura 5-50 se muestra la serie de altura de ola máxima mensual para la serie de GOW. La tendencia muestra un aumento en las alturas de ola, que desde enero de 1948

hasta diciembre de 2008 fue de 15.35 cm. Igualmente, se tiene que el límite asociado a la probabilidad del 90% es 1.35 m de altura de ola máxima.

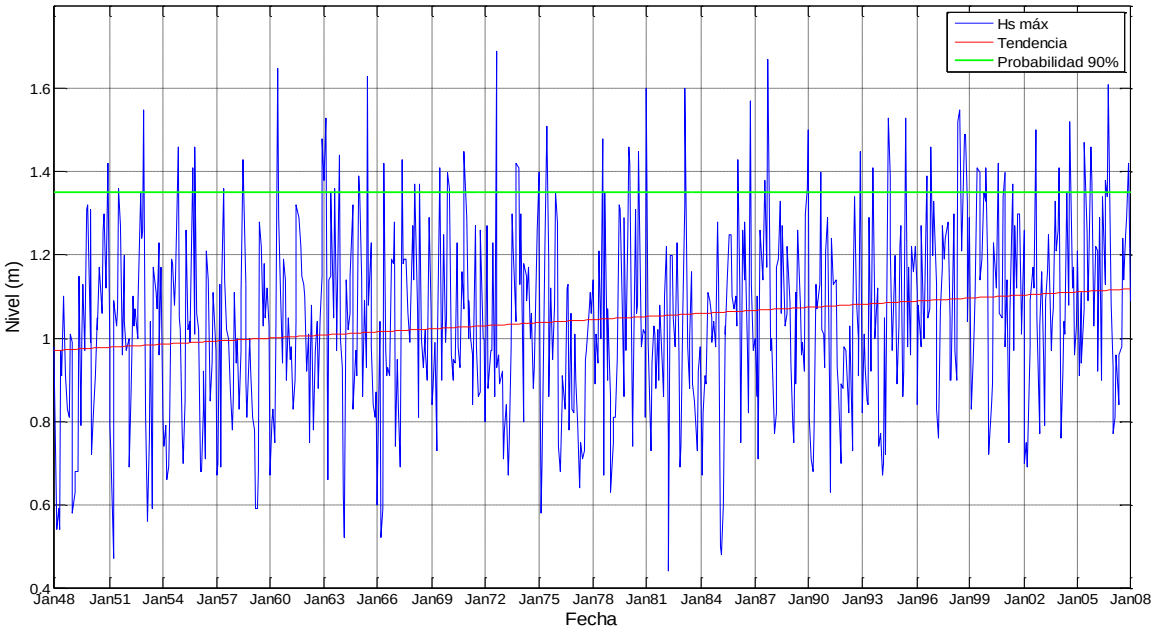


Figura 5-50. Serie de máximos mensuales de Hs para la serie GOW. En rojo la tendencia de la serie. En verde el límite para una probabilidad del 90%.

5.1.3 Corrientes por rotura del oleaje

Para establecer los sistemas de corrientes por rotura del oleaje se plantearon 14 escenarios, a partir del régimen medio, utilizando el análisis de probabilidad conjunta Hs, Tp y Dir a la serie en aguas profundas del proyecto GOW, con el fin de propagarla hasta la playa y calcular las corrientes por rotura con el modulo COPLA del SMC.

Inicialmente se plantearon escenarios discriminando la época seca y la húmeda. En la Tabla 5-3 se muestran las probabilidades direccionales para la altura de ola significante durante el primer semestre. Es importante resaltar que sólo las direcciones SW, WSW, W y WNW tienen probabilidades significativas que suman 98.91%, siendo la dirección más probable la SW, con una probabilidad de ocurrencia del 40.13%.

Tabla 5-3. Probabilidades direccionales para la altura de ola significante (Hs) del primer semestre en diferentes cuantiles. Datos de la serie GOW en aguas profundas.

Variable medida:Hs

direcciones(º)	prob.direccion	$Hs_{50\%}$	$Hs_{90\%}$	$Hs_{99\%}$	Hs_{12}
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.4013	0.5300	0.8200	1.1200	1.3000
WSW	0.3035	0.4900	0.7700	1.0400	1.2200
W	0.1911	0.5400	0.8100	1.0900	1.2800
WNW	0.0932	0.6500	1.0000	1.3400	1.5700
NW	0.0105	0.6200	0.8400	1.0654	1.1900
NNW	0.0004	0.7600	0.9100	1.0366	1.0500

El segundo semestre (Tabla 5-4) muestra variaciones significativas en las probabilidades direccionales del oleaje incidente, así como en las alturas de ola de los diferentes cuantiles analizados. Para este periodo del año las direcciones dominantes son SW, WSW y W que aportan el 99.58% de la variabilidad de los datos. Dichas variaciones estacionales en las direcciones y magnitudes de altura de ola se aprecian mejor en las rosas de oleaje de la Figura 5-51.

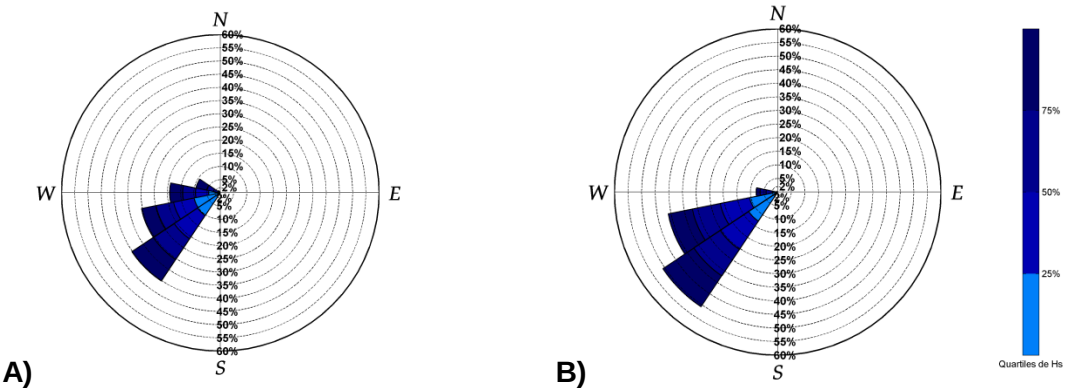


Figura 5-51. Rosas de oleaje A) para el primer semestre del año y B) para el segundo semestre. Datos de la serie GOW en aguas profundas.

Tabla 5-4. Probabilidades direccionales para la altura de ola significante (Hs) del segundo semestre en diferentes cuantiles. Datos de la serie GOW en aguas profundas.

Variable medida:Hs

direcciones(º)	prob.direccion	$Hs_{50\%}$	$Hs_{90\%}$	$Hs_{99\%}$	Hs_{12}
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ESE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SE	0.0000	0.8000	1.4240	1.5200	1.5200
SSE	0.0000	0.4950	0.5200	0.5200	0.5200
S	0.0000	0.4300	0.4600	0.4600	0.4600
SSW	0.0000	0.2700	0.4110	0.4200	0.4200
SW	0.5068	0.6700	1.0100	1.3200	1.5100
WSW	0.4099	0.6500	0.9400	1.2300	1.4600
W	0.0791	0.6500	0.9000	1.1400	1.3900
WNW	0.0042	0.7100	0.9300	1.1300	1.1600
NW	0.0001	0.5600	0.6780	0.7000	0.7000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

A partir de estas probabilidades direccionales, se realizó el análisis de probabilidad conjunta para cada semestre, con el fin de seleccionar los casos (H, T y Dir) más probables, para las simulaciones de las corrientes por rotura del oleaje.

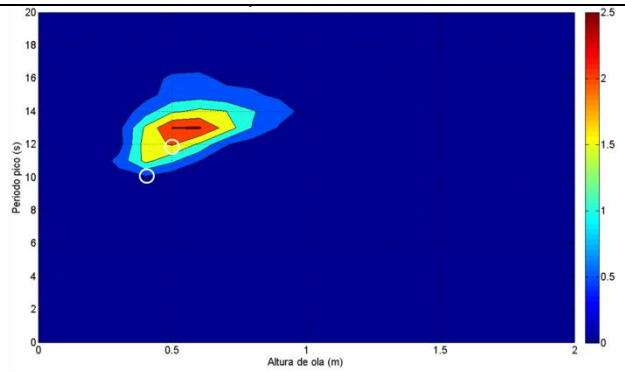
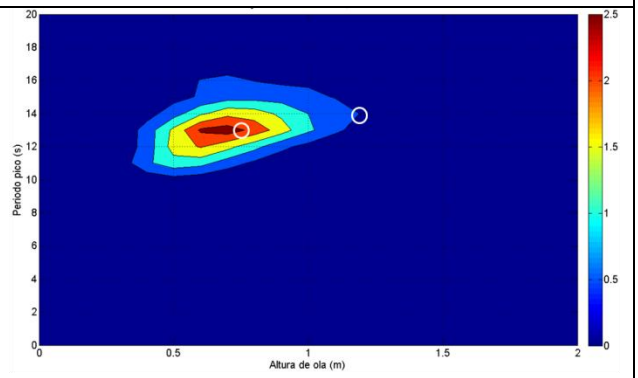
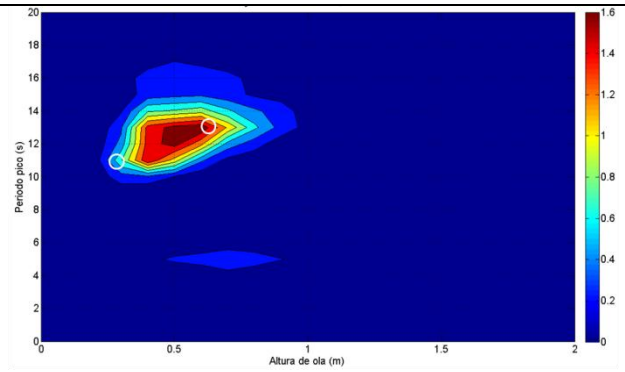
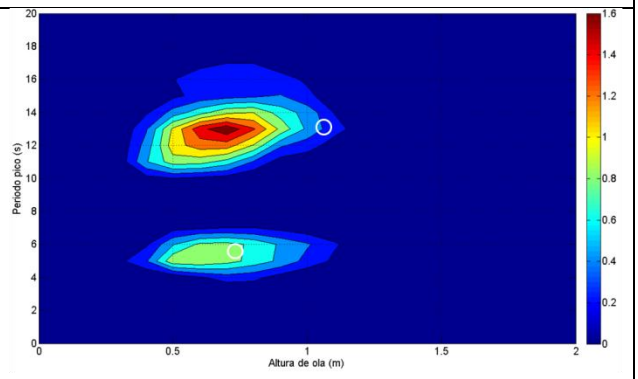
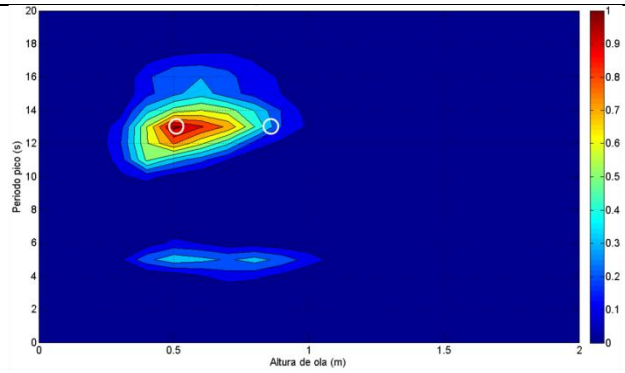
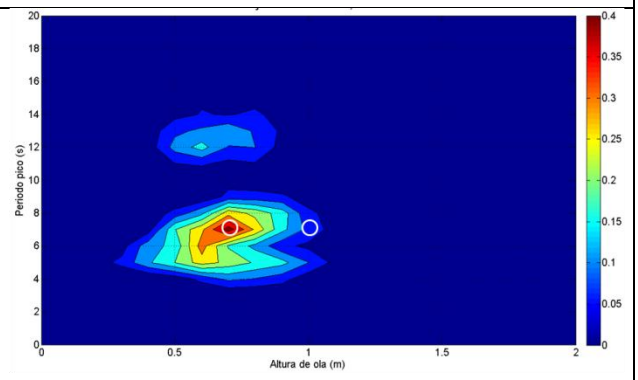
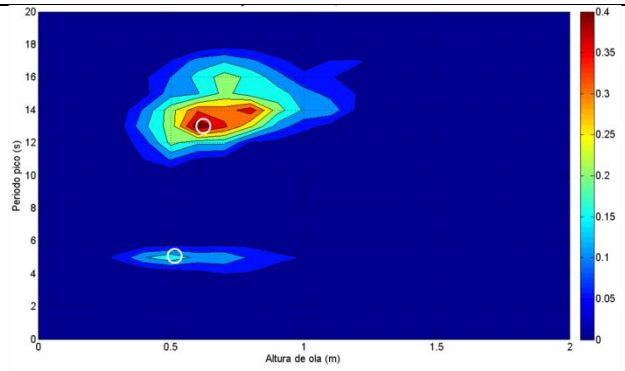
En la Tabla 5-6 se muestran las direcciones más probables y los gráficos de probabilidad conjunta para cada semestre. En círculos blancos se señalan las condiciones seleccionadas para el planteamiento de cada caso en el COPLA. El objetivo es abarcar al máximo la campana de distribución, por esa razón los casos del segundo semestre complementan los del primero, además porque se evidencia la homogeneidad del oleaje incidente, con Hs y Tp muy definidos para cada dirección.

En la Tabla 5-5 se muestra el resumen de los casos para las simulaciones de corrientes por rotura del oleaje, planteados a partir del régimen medio del oleaje en aguas profundas.

Tabla 5-5. Resumen de casos asociados a las probabilidades conjuntas direccionales, para cálculo de corrientes por rotura del oleaje. Casos a partir de probabilidad conjunta de la serie GOW en aguas profundas.

	DIRECCIÓN	PROB. SEMESTRAL DIR.	CASO	Hs (m)	Tp (s)
SEMESTRE 1	SW	40.13 %	1	0.5	12
			2	0.4	10
	WSW	30.35 %	3	0.6	13
			4	0.3	11
	W	19.11 %	5	0.5	13
			6	0.9	13
	WNW	9.32 %	7	0.6	13
			8	0.5	5
SEMESTRE 2	SW	50.68 %	9	0.8	13
			10	1.2	14
	WSW	40.99 %	11	1.1	13
			12	0.8	5
	W	7.91 %	13	0.7	7
			14	1	7

Tabla 5-6. Probabilidad conjunta para el régimen medio del oleaje en aguas profundas.

DIR	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2
SW		
WSW		
W		
WNW		

En general, los patrones de corrientes sobre playa Palmeras se intensifican durante la marea baja, como se muestra en la Figura 5-52, y se pueden caracterizar a partir de cuatro sistemas circulatorios (Figura 5-53) que se presentan para diferentes condiciones de altura de ola, periodo y dirección.

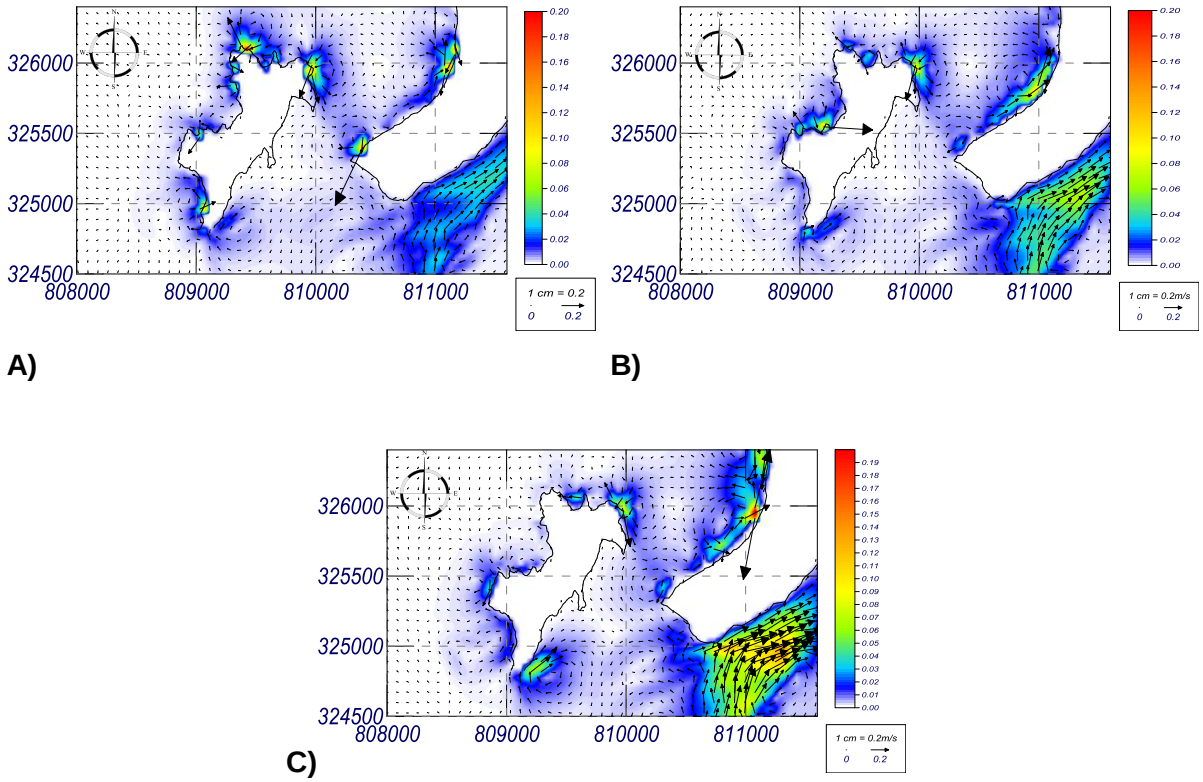


Figura 5-52. Magnitud y dirección de las corrientes en playa. A) En marea alta. B) En marea media y C) En marea baja. Caso 7 SW Hs=0.6 m.

La Figura 5-53 A) muestra el sistema circulatorio más probable (40.13%) a lo largo del año, e indica una posible pérdida de sedimento por la dirección de las corrientes hacia el estrecho de Tasca desde el sector sur, pero unas rutas de transporte hacia la playa desde el mismo estrecho que sugieren un posible equilibrio, pues las magnitudes son similares. También son evidentes las corrientes longitudinales a lo largo de la playa en sentido suroeste-noreste y viceversa que se encuentran casi en el centro del sistema (ver delimitación en línea punteada).

En la Figura 5-53 B) se observan las celdas de circulación divergentes en el centro de la playa, y un núcleo de transporte en el centro del sistema noreste, que lleva los sedimentos hacia el sector suroccidente. Nuevamente se presentan rutas de transporte desde el sector suroccidente hacia el norte de la playa y hacia el estrecho de Tasca.

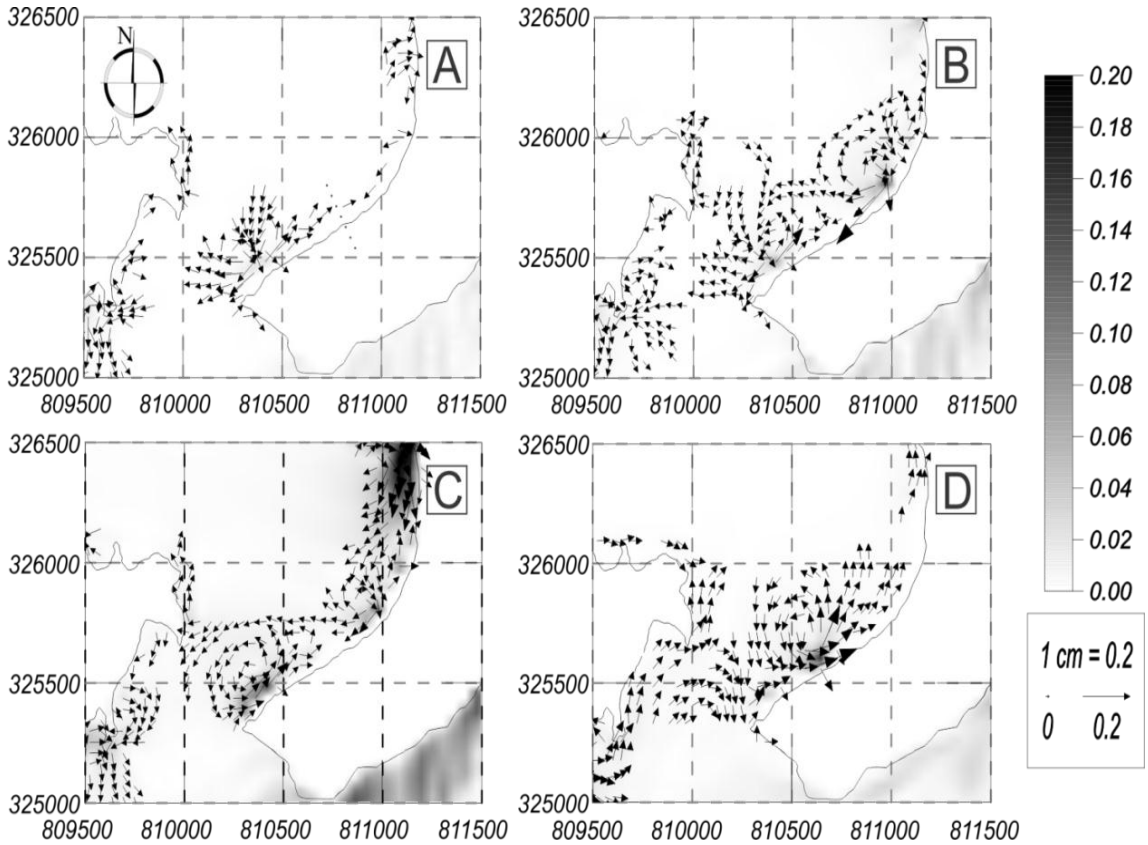


Figura 5-53. Patrones generales de circulación de corrientes por rotura de oleaje cerca de playa Palmeras en marea baja. A) Caso 1. Las líneas punteadas indican el centro de la playa. B) Caso 3. C) Caso 10. D) Caso 11.

Por otro lado, en el sistema circulatorio de la Figura 5-53 C) se observa la intensificación de corrientes hacia el islote Gorgonilla, donde se acumula gran cantidad de sedimento del sistema. Además de una corriente longitudinal en sentido norte-sur, que llega desde playa Verde con mucha intensidad, hasta el noreste de playa Palmeras. Finalmente, se presenta el mismo punto de transporte potencial en el sector suroccidente de la playa, donde las corrientes pueden mover sedimentos hacia el centro de Palmeras.

Por último en la Figura 5-53 D) se observan las corrientes longitudinales en dirección suroccidente-noreste, que hacen parte de un gran sistema circulatorio en el centro de la playa que la recorre completamente. También se observan posibles rutas de transporte desde el estrecho de Tasca hacia el extremo suroccidental de Palmeras, que pueden dar aportes a esta parte del sistema.

5.2 Hidrodinámica de la marea

Los patrones de circulación de la zona de estudio se definieron a partir de los escenarios de calibración y validación. Para las corrientes de la primera época, corresponden los resultados de las simulaciones finales de la fase de calibración (entre el 1 y el 23 de febrero de 2011), y para la segunda época, se asume que las corrientes superficiales se ajustan a las simulaciones definitivas de la etapa de validación (entre el 1 y el 11 de agosto de 2011).

En la Figura 5-54 se muestran los resultados promedios para el primer semestre del año. En este caso, se establece un sistema circulatorio donde predominan las corrientes oceánicas hacia el este, además de un efecto muy marcado de la interferencia de la batimetría y topografía local, que se evidencia con la refracción y difracción de las corrientes en aguas someras. Este fenómeno es muy importante en el Estrecho de Tasca (Figura 5-54 B)), donde se intensifican las corrientes hasta alcanzar 0.5 m/s y van en sentido norte-sur.

La marea en este caso modula las magnitudes de las corrientes en escala diurna y mensual, sin embargo, las direcciones asociadas permanecen muy constantes a lo largo del ciclo mareal estudiado, así como el efecto “sombra” de las corrientes superficiales que se hacen casi cero en el costado oriental de la isla.

En la Figura 5-55 se muestran las corrientes superficiales promedio asociadas al segundo semestre del año 2011. Para este periodo, las direcciones son predominantes hacia el norte, presentando una intensificación en las velocidades promedias sobre el Estrecho de Tasca de hasta 0.35 m/s aproximadamente, siendo menores a las corrientes superficiales simuladas para el primer semestre del año.

Nuevamente se evidencia la difracción de las corrientes afectadas por los contornos de la isla, y esta vez el efecto “sombra” se da hacia el norte de Gorgona y Gorgonilla. Además, durante este semestre disminuyen las velocidades en toda la zona de estudio con relación al primer semestre del año 2011.

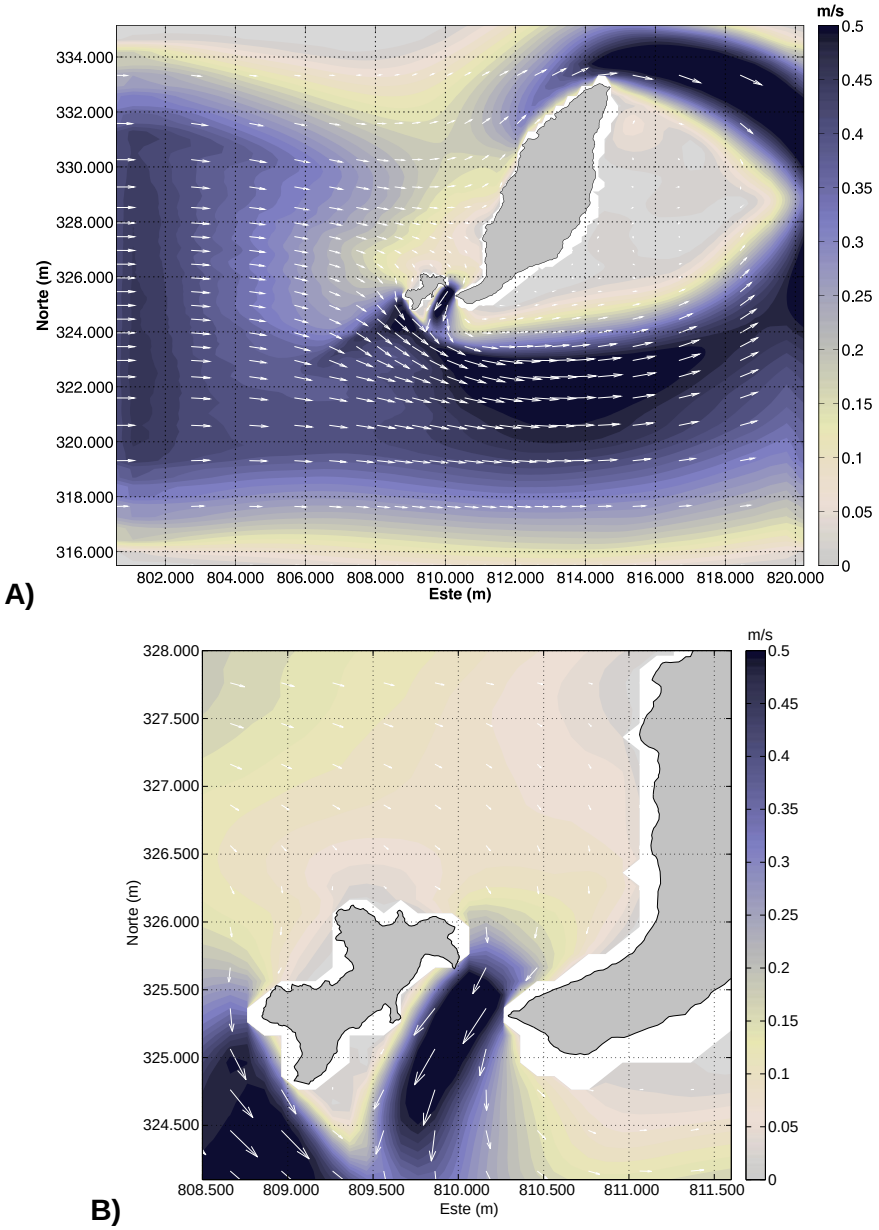
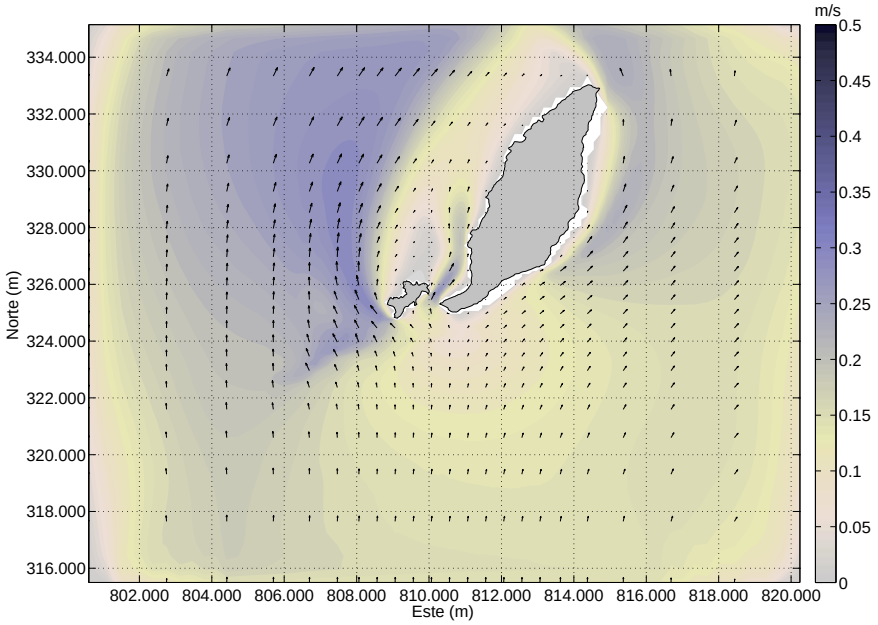
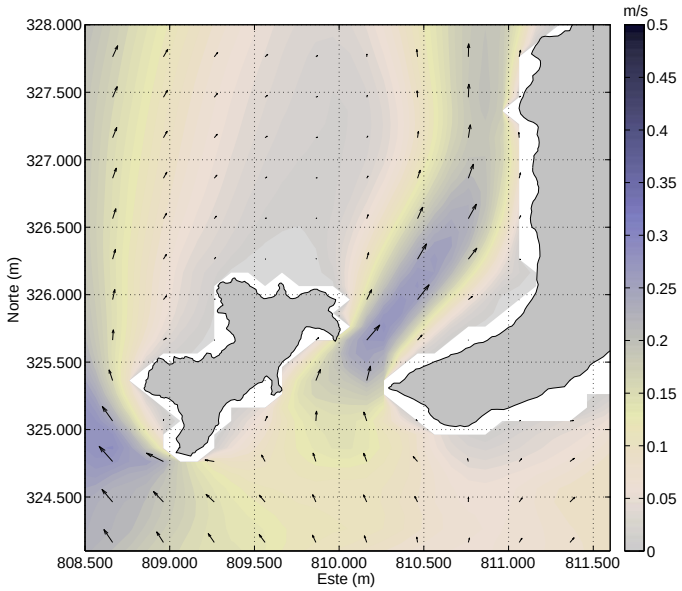


Figura 5-54 Patrones generales de circulación oceánica (corrientes geostróficas, marea y viento) para el primer semestre del 2011 de la zona de estudio. A) Todo el dominio de cálculo. B) Detalle en el Estrecho de Tasca y playa Palmeras.



A)



B)

Figura 5-55 Patrones generales de circulación oceánica (corrientes geostróficas, marea y viento) para el segundo semestre del 2011 de la zona de estudio. A) Todo el dominio de cálculo. B) Detalle en el Estrecho de Tasca y playa Palmeras.