

**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN
PARA LA PROTECCIÓN COSTERA DE UNOS SECTORES DE LA
COSTA CARIBE COLOMBIANA FASE II**



EPROCA

**- ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN -
(PROYECTO BÁSICO)**



Bogotá, Diciembre de 2005

ÍNDICE



ÍNDICE

1.	INFORMACIÓN DE BASE Y ESTUDIOS PREVIOS	1-2
1.1.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1-2
1.2.	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO	1-3
1.3.	LEVANTAMIENTO Y GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN FALTANTE	1-4
1.3.1.	Fotografías aéreas	1-5
1.3.2.	Levantamientos batimétricos, perfiles de playa y granulometrías	1-5
1.3.3.	Clima marítimo e hidrología	1-6
1.3.4.	Información sedimentológica	1-7
2.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	2-2
2.1.	DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS MORFOLÓGICO REGIONAL	2-2
2.1.1.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	2-3
2.1.2.	DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA	2-4
2.2.	DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS SECTORIAL	2-6
2.2.1.	Zona 1 - Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla	2-7
2.2.2.	Zona 2 - Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan	2-7
2.2.3.	Zona 3 – Entre Punta San Juan y Punta Arboletes	2-8
2.2.4.	Zona 4 – Entre Punta Arboletes y Punta Brava	2-8
2.2.5.	Zona 5 – Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires	2-8
2.2.6.	Zona 6 - Entre punta Buenos Aires y Boca Mangle	2-9
2.2.7.	Zona 7 – Entre Boca Mangle y Punta Broqueles	2-10
2.2.8.	Zona 8 – Entre Punta Broqueles y Punta la Rada	2-10
2.2.9.	Zona 9 – Entre Punta la Rada y el delta del Sinú	2-11
3.	DIAGNOSIS	3-2
3.1.	EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	3-2
3.1.1.	Metodología	3-2
3.1.2.	Resultados	3-4
3.2.	ANÁLISIS DE INTERVENCIONES HISTÓRICAS	3-10
3.2.1.	Inventario de estructuras de protección costera	3-11

3.2.2	Extracción intensiva de materiales	3-28
3.3	IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS	3-30
4.	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	4-2
4.1	NIVEL DEL MAR	4-2
4.1.1	Base de datos	4-2
4.1.2	Régimen medio de nivel del mar	4-2
4.2	OLEAJE EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS	4-5
4.2.1	Fuentes de datos	4-5
4.2.2	Calibración de oleaje visual	4-8
4.2.3	Generación y validación de oleaje extremal	4-10
4.2.4	Regímenes de oleaje en profundidades indefinidas	4-19
4.3	OLEAJE EN LA ZONA DE ESTUDIO	4-26
4.3.1	Metodología	4-26
4.3.2	Regímenes de oleaje en inmediaciones de la costa	4-29
4.4	SISTEMAS CIRCULATORIOS DE CORRIENTES	4-68
4.4.1	Modelo numérico de simulación de corrientes de oleaje	4-68
4.4.2	Sistemas circulatorios en playas	4-69
4.5	HIDROLOGÍA	4-72
4.5.1	El río Sinú	4-72
4.5.2	Otras descargas fluviales	4-77
4.5.3	Aportes sedimentarios	4-79
5.	DINÁMICA LITORAL	5-2
5.1	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	5-2
5.1.1	Dimensionalidad de los procesos	5-2
5.1.2	Escala espacial y temporal de los procesos	5-3
5.1.3	Metodología de cálculo	5-5
5.2	ANÁLISIS DE LARGO PLAZO	5-6
5.2.1	Análisis en planta	5-7
5.2.2	Análisis en perfil	5-22
5.2.3	Delta del río Sinú	5-32
5.3	ANÁLISIS DE CORTO PLAZO	5-33
5.4	FUNCIONAMIENTO MORFODINÁMICO DEL SISTEMA	5-41
5.4.1	Introducción	5-41

5.4.2	Planteamiento conceptual del funcionamiento morfodinámico del sistema	5-45
6.	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	6.2
6.1	DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PLANTEADAS	6-2
6.1.1	Dique en Punta Rey	6-3
6.1.2	Tómbolos en Arboletes	6-4
6.1.3	Tómbolos en Volcán de Lodo	6-5
6.1.4	Espolones en Arboletes	6-6
6.1.5	Espolones en Volcán de Lodo	6-7
6.1.6	Paseo marítimo en Punta Rey	6-8
6.1.7	Paseo marítimo en Minuto de Dios	6-10
6.1.8	Tómbolos y paseo marítimo en Arboletes	6-10
6.2	DIMENSIONAMIENTO DE LAS OBRAS	6-11
6.2.1	Determinación del oleaje de diseño	6-12
6.2.2	Dimensionamiento de las obras	6-16
6.3	INFLUENCIA SOBRE LA DINÁMICA LITORAL	6-21
6.3.1	Situación actual	6-21
6.3.2	Dique en Punta Rey	6-24
6.3.3	Diques exentos (tómbolos) o perpendiculares a la línea de costa (espolones), en Arboletes y Volcán de Lodo	6-28
6.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS	6-32
7.	REFERENCIAS	7-2

ANEXO 1:	Planos
ANEXO 2:	Modelo de propagación de oleaje. Oluca-RD, Oluca-SP
ANEXO 3:	Resultados de las propagaciones de oleaje
ANEXO 4:	Modelo numérico de corrientes de rotura. COPLA-MC/SP
ANEXO 5:	Resultado de la simulación de corrientes
ANEXO 6:	Granulometrías
ANEXO 7:	Especificaciones técnicas de los levantamientos batimétricos

LISTA DE FIGURAS



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Distribución de aerofotografías tomadas en la zona para EPROCA	1-6
Figura 2.1	Localización de la zona de estudio	2-2
Figura 2.2	Rasgos generales de la zona de estudio	2-5
Figura 2.3	Zonificación del área de estudio	2-6
Figura 3.1	Fotografías aéreas para el estudio de evolución de línea de costa	3-4
Figura 3.2	Tasas de retroceso de la línea de costa entre Punta Caribana y el Delta de Tinajones. 1964-2005.	3-5
Figura 3.3	Erosión en Arboletes	3-7
Figura 3.4	Erosión en Los Córdoba	3-7
Figura 3.5	Erosión en Punta La Rada	3-9
Figura 3.6	Obras de protección costera en Damaquiel – Suroeste	3-12
Figura 3.7	Vestigios de obras de protección costera en Damaquiel	3-12
Figura 3.8	Obras de protección costera en Uveros – Espolón 1	3-13
Figura 3.9	Obras de protección costera en Uveros – Espolón 2	3-13
Figura 3.10	Obras de protección costera en Arboletes – Casco urbano	3-14
Figura 3.11	Obras de protección costera en Arboletes – Espolón principal	3-16
Figura 3.12	Obras de protección costera en Arboletes – Noreste	3-16
Figura 3.13	Obras de protección costera en Arboletes – Tómbolos	3-17
Figura 3.14	Obras de protección costera en Arboletes –Volcán de lodo	3-18
Figura 3.15	Obras de protección costera en Arboletes –Volcán de lodo	3-19
Figura 3.16	Obras de protección costera en Arboletes – Minuto de Dios	3-19
Figura 3.17	Obras de protección costera en Arboletes – Punta Rey	3-20
Figura 3.18	Obras de protección costera en Los Córdoba	3-21
Figura 3.19	Obras de protección costera en San Miguel – sector de Punta Brava	3-21
Figura 3.20	Obras de protección costera entre Punta Piedra y Punta Puerto Viejo	3-22
Figura 3.21	Obras de protección costera Punta Puerto Viejo - Punta Cangrejo	3-23
Figura 3.22	Obras de protección costera entre Punta Iguana y Punta Candela	3-23
Figura 3.23	Obras de protección costera en Puerto Escondido	3-24

Figura 3.24	Obras de protección costera en Puerto Escondido – Tómbolos	3-25
Figura 3.25	Obras de protección costera Punta Buenos Aires - Boca Mangle	3-25
Figura 3.26	Obras de protección costera entre Punta Broqueles y Punta El Medio	3-26
Figura 3.27	Obras de protección costera en Punta El Medio	3-26
Figura 3.28	Vestigios del intenso proceso de erosión en Punta La Rada	3-27
Figura 3.29	Obras de protección costera punta Manzanillo - punta de Piedra	3-28
Figura 3.30	Extracción intensiva de materiales de playa en la playa del río Jobo	3-29
Figura 3.31	Extracción intensiva de materiales de playa en el río Canaletes	3-30
Figura 3.32	Resultados del análisis de riesgo	3-32
Figura 4.1	Localización del mareógrafo de IDEAM en Cartagena de Indias	4.3
Figura 4.2	Régimen medio de nivel del mar en Cartagena de Indias	4.4
Figura 4.3	Variación temporal de la serie de máximos anuales de nivel del mar	4.4
Figura 4.4	Localización de los datos visuales de oleaje en aguas jurisdiccionales de Colombia	4.5
Figura 4.5	Localización de la boya NOAA 41018	4.7
Figura 4.6	Trayectoria de las tormentas tropicales del Atlántico durante 1998	4.8
Figura 4.7	Ajustes de calibración de Hs visual	4.9
Figura 4.8	Ajustes de calibración de Tp visual	4.10
Figura 4.9	Pa vs. Vmax para trayectoria del huracán Mitch (22/10/98 – 09/11/98)	4.12
Figura 4.10	Trayectoria de las tormentas tropicales del Atlántico durante 1994	4.13
Figura 4.11	Registros de Hs y Vmax entre agosto y diciembre de 1994 en la boya NOAA 41018	4.14
Figura 4.12	Histograma de α de tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018	4.15
Figura 4.13	Velocidad del viento durante el huracán Gordon (nov-dic/94).	4.17
Figura 4.14	Histograma de β de tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018	4.17
Figura 4.15	Hs vs. Tp durante las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018	4.18
Figura 4.16	Rosa de oleaje medio para la zona de estudio (Sea y Swell)	4.20
Figura 4.17	Régimen escalar de Hs en profundidades indefinidas	4.21
Figura 4.18	Régimen direccional de Hs en profundidades indefinidas	4.22
Figura 4.19	Régimen escalar de Tp en profundidades indefinidas	4.23
Figura 4.20	Régimen direccional de Tp en profundidades indefinidas	4.23
Figura 4.21	Régimen de temporal de Hs en profundidades indefinidas	4.25
Figura 4.22	Mallas de propagación, general y de detalle	4.28

Figura 4.23	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.32
Figura 4.24	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.33
Figura 4.25	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = NW$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.34
Figura 4.26	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = NW$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.35
Figura 4.27	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.36
Figura 4.28	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.38
Figura 4.29	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = NW$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.39
Figura 4.30	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = NW$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.40
Figura 4.31	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.41
Figura 4.32	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 3. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.42
Figura 4.33	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 3. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = NW$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.43
Figura 4.34	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 3. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = NW$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.44
Figura 4.35	Localización de los puntos objetivo seleccionados para la determinación de los regímenes medios y extremales de oleaje frente a Arboletes.	4.45
Figura 4.36	Régimen medio de oleaje en la zona 3 a una profundidad de 3 m	4.45
	Régimen extremal de Hs en el punto 1.	4.46
Figura 4.37	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Isoalturas de ola.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.47
Figura 4.38	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Vectores de oleaje.	
Caso:	$\theta = N$, Hs = 1 m, Tp = 7 s	4.48

Figura 4.39	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.49
Figura 4.40	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.50
Figura 4.41	Régimen medio de oleaje en la zona 4 a una profundidad de 3 m	4.51
Figura 4.42	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.52
Figura 4.43	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.53
Figura 4.44	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.54
Figura 4.45	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.55
Figura 4.46	Régimen medio de oleaje en zona 5 a una profundidad de 3 m.	4.56
Figura 4.47	Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.57
Figura 4.48	Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.58
Figura 4.49	Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.59
Figura 4.50	Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.60
Figura 4.51	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 8. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.61
Figura 4.52	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 8. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.62
Figura 4.53	Régimen medio de oleaje en zona 8 a una profundidad de 3 m.	4.63
Figura 4.54	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.64
Figura 4.55	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.65

Figura 4.56	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Isoalturas de ola. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.66
Figura 4.57	Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.67
Figura 4.58	Resultados de la simulación de corrientes de oleaje en la Zona 3. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.70
Figura 4.59	Resultados de la simulación de corrientes de oleaje en la Zona 3. Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s	4.71
Figura 4.60	Cuencas de los ríos Sinú y Mulatos	4.72
Figura 4.61	Localización de la estación limnigráfica Cotoca Abajo en río Sinú	4.74
Figura 4.62	Caudales medios mensuales río Sinú en estación Cotoca Abajo	4.75
Figura 4.63	Variación temporal de los caudales medios anuales del río Sinú en la estación Cotoca Abajo	4.75
Figura 4.64	Regímenes de caudales del río Sinú en la estación Cotoca Abajo	4.76
Figura 4.65	Principales descargas fluviales de la zona	4.78
Figura 4.66	Descarga de sedimentos media mensual del río Sinú en la estación Cotoca Abajo	4.79
Figura 4.67	Variación temporal de la descarga de sedimentos media anual del río Sinú en la estación Cotoca Abajo	4.80
Figura 4.68	Relación entre los caudales medios mensuales y la descarga de sedimentos media mensual del río Sinú en Cotoca Abajo	4.80
Figura 5.1	Escalas espaciales y temporales típicas de algunos cambios morfológicos de las playas	5.4
Figura 5.2	Esquema general de una playa encajada en equilibrio	5.9
Figura 5.3	Metodología de cálculo para la forma en planta de equilibrio estático en playas encajadas	5.10
Figura 5.4	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 1	5.12
Figura 5.5	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 2	5.13
Figura 5.6	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 3	5.14

Figura 5.7	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 4	5.15
Figura 5.8	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 5	5.17
Figura 5.9	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 6	5.18
Figura 5.10	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 7	5.19
Figura 5.11	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 8	5.20
Figura 5.12	Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 9	5.21
Figura 5.13	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 1. Perfil 2	5.26
Figura 5.14	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 1. Perfil 13	5.26
Figura 5.15	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 2. Perfil 23	5.27
Figura 5.16	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 3. Perfil 37	5.28
Figura 5.17	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 5. Perfil 43	5.29
Figura 5.18	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 6. Perfil 46	5.30
Figura 5.19	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 7. Perfil 53	5.31
Figura 5.20	Ajuste de la expresión de Dean (1991) a perfiles de Zona 9. Perfil 62	5.32
Figura 5.21	Delta del río Sinú en Cispatá en 1938	5.34
Figura 5.22	Evolución del Delta del río Sinú en Tinajones. 1938-1989	5.34
Figura 5.23	Evolución temporal del área del Delta de Tinajones	5.35
Figura 5.24	Variación del coeficiente K en función del diámetro del sedimento	5.39
Figura 5.25	Transporte potencial de sedimentos debido a las corrientes del oleaje	5.40
Figura 5.26	Esquema transporte litoral	5.42
Figura 6.1	Dique de Punta Rey	6.4
Figura 6.2	Tómbolos en Arboletes	6.5
Figura 6.3	Tómbolos en volcán de lodo	6.6
Figura 6.4	Espolones en Arboletes	6.7
Figura 6.5	Espolones en volcán de lodo	6.8
Figura 6.6	Paseo marítimo de Punta Rey	6.9
Figura 6.7	Paseo marítimo de Minuto de Dios	6.10

Figura 6.8	Tómbolos y paseo marítimo en Arboletes	6.11
Figura 6.9	Variación del peso en función del periodo medio T_p	6.20
Figura 6.10	Variación del peso en función de la altura significativa de ola H_s	6.20
Figura 6.11	Altura de ola significativa. Situación actual	6.22
Figura 6.12	Vectores de oleaje para los casos 1 y 2. Situación actual	6.23
Figura 6.13	Corrientes de oleaje para los casos 1 y 2. Situación actual	6.23
Figura 6.14	Altura de ola significativa para la alternativa del Dique	6.25
Figura 6.15	Vectores de oleaje para los casos 1 y 2. Alternativa Dique	6.25
Figura 6.16	Corrientes de oleaje para la alternativa del Dique en Punta Rey	6.26
Figura 6.17	Diferencia de H_s para el caso 1. Alternativa Dique	6.27
Figura 6.18	Altura de ola significativa para la alternativa de diques exentos	6.28
Figura 6.19	Zoom del diagrama de altura de ola significativa en diques exentos	6.29
Figura 6.20	Vectores de oleaje para casos 1 y 2. Alternativa diques exentos	6.30
Figura 6.21	Corrientes de oleaje para la alternativa de diques exentos	6.31
Figura 6.22	Diferencia de H_s para el caso 1. Alternativa diques exentos	6.32

LISTA DE TABLAS



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Información utilizada durante el proyecto EPROCA	1-5
Tabla 4.1	Cálculo de α para diferentes datos reportados por la NOAA	4.16
Tabla 4.2	Huracanes de mayor Hs en cada año de análisis	4.25
Tabla 4.3	Características de los casos propagados para el régimen medio	4.29
Tabla 4.4	Características de casos propagados para el régimen extremal	4.29
Tabla 4.5	Regímenes extremales de los puntos objetivo	4.46
Tabla 4.6	Caudales medios mensuales del río Sinú en Cotoca Abajo	4.76
Tabla 4.7	Caudales medios multianuales en los diferentes ríos de la zona	4.78
Tabla 4.8	Carga media multianual de sedimentos estimada de ríos de la zona	4.80
Tabla 6.1	Vida útil de las obras marítimas	6.13
Tabla 6.2	Riesgo en el diseño de obras marítimas	6.14
Tabla 6.3	Características del oleaje extremal a pie de obra	6.15
Tabla 6.4	Características de los mantos principales de cada una de las alternativas analizadas	6.19

CAPITULO 1
INFORMACIÓN DE BASE Y ESTUDIOS PREVIOS



1. INFORMACIÓN DE BASE Y ESTUDIOS PREVIOS

1.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La franja litoral comprendida entre el delta del río Sinú y el golfo de Urabá se encuentra sometida a un intenso proceso de erosión desde hace más de 40 años, alcanzando tasas de hasta 47 m/año en Punta Rey. Este proceso ha sido estudiado por diferentes autores y entidades (Invemar, 2004; Correa y Vernet, 2004; Eafit, Colciencias, Corpourabá, Dapard, 2001; Invemar-CVS-Carsucre, 2001; Palacio y Restrepo, 1999; Corpourabá-Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1998), buscando encontrar una respuesta a los diversos agentes que la causan y las posibles soluciones a los graves problemas que conlleva el retroceso de la línea de costa. Los esfuerzos realizados no han conseguido hasta el momento resolver el complicado problema, principalmente por dos motivos: 1) porque el problema es de una extensión y magnitud considerables y 2) porque no se ha podido caracterizar adecuadamente la hidrodinámica regional asociada a dichos procesos. Para afrontar el problema, los habitantes de la zona y sus responsables, han recurrido en muchas ocasiones a soluciones transitorias o carentes de un sustento técnico adecuado, de forma tal que en muchos lugares han terminado por intensificar el problema o simplemente han sido inversiones económicas “arrojadas al mar”, como lo documentan Correa y Vernet (2004), que calculan que se han realizado inversiones millonarias en obras de protección que no han conseguido detener los procesos erosivos.

Entre los diversos documentos consultados como antecedentes al presente estudio cabe destacar los siguientes, en orden cronológico:

- Inventario y diagnóstico minero ambiental del Departamento de Córdoba. 2005 - Ingeominas – CVS
- Posibilidades de reconstrucción de Punta Arboletes (Límites entre los departamentos de Antioquia y Córdoba). Invemar. Marzo de 2004.
- Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes – Turbo) costa Caribe colombiana 2004 – Bol. Invest.Mar. Cost. 33 – Correa y Vernet.

- Proyecto erosión marina en el litoral antioqueño – Sector Turbo – Arboletes. 2001 Eafit, Colciencias, Corpourabá, Dapard.
- Formulación del plan de manejo integrado de la unidad ambiental costera estuarina, Río Sinú, Golfo de Morrosquillo. 2001 (Invemar-CVS-Carsucre).
- Influencia de la evolución del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral caribe Antioqueño. Palacio, H.H. y Restrepo, A.F., 1999. Trabajo dirigido de grado – Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Informe Final sobre la “Evaluación de Zonas de Erosión Crítica en el Litoral Caribe Antioqueño”. Corpourabá – Universidad Nacional de Colombia. 1998. Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Medellín.

De igual manera, la Dirección General Marítima a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, adelantó por su parte un proyecto titulado “**ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PARA LA PROTECCIÓN COSTERA DE UNOS SECTORES DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA : VOLCÁN DE LODO (ARBOLETES), - EPROCA**”, que en su primera fase en el año 2004, efectuó un diagnóstico del área de estudio para conocer y entender la problemática, evaluando diferentes medidas de protección costera para Punta Rey y Punta de las Vacas.

Como resultado de esta fase se vio la necesidad de ampliar la información (batimetrías, perfiles, líneas de costa, etc..) para poder entender mejor los procesos y proponer diferentes medidas de protección, evaluando a su vez los impactos de las obras en otros sectores. Para ello, la Dirección General Marítima empleó, durante el 2005, sus capacidades científicas a través del CIOH y los buques de investigación (ARC-Malpelo y ARC-Quindío), con la asesoría técnica y capacitación de los especialistas en Ingeniería de Costas de AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A., para la realización del presente proyecto como segunda fase y continuación del ya mencionado **EPROCA**.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El objetivo principal del presente proyecto es “Estudiar y evaluar diferentes alternativas de solución para la protección costera de unos sectores de la costa Caribe colombiana (Tinajones – Punta Caribana)”.

El estudio de la estabilidad del tramo litoral comprendido entre el delta de Tinajones (río Sinú) y Punta Caribana no puede ni debe llevarse a cabo sin un análisis regional de la unidad fisiográfica. Es decir, no es posible entender los procesos que ocurren en cada uno de los sectores sin conocer los procesos que ocurren en las zonas litorales de su entorno.

Estos procesos se presentan en escalas espaciales que van desde los centímetros (turbulencia), hasta las decenas de kilómetros (marea) y en escalas temporales que van desde los segundos (olas) hasta las décadas (ascenso del nivel medio del mar). Como respuesta a dichas dinámicas la morfología de la playa cambia, a su vez, dentro de todas esas escalas: centímetros-kilómetros, segundos-décadas

Por lo tanto, para alcanzar el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Recopilar la información existente, generar la que haga falta para el estudio de la dinámica litoral y crear una base de datos para su análisis posterior.
2. Realizar una descripción morfológica a nivel regional y sectorial.
3. Analizar espacial y temporalmente, mediante técnicas estadísticas, las principales variables hidrodinámicas que influyen en el problema.
4. Adelantar un análisis de la evolución y las intervenciones históricas en el litoral.
5. Describir la dinámica litoral a nivel regional y sectorial.
6. Plantear alternativas de solución a los problemas de la zona de estudio.
7. Presentar el proyecto constructivo de la mejor alternativa de solución.

1.3 LEVANTAMIENTO Y GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN FALTANTE

Entre la información recopilada y analizada no ha sido posible encontrar algunos datos concretos indispensables para poder llevar a cabo el presente estudio. Dentro de este grupo de información se ha hecho necesario levantar, adquirir o generar una base de datos correspondiente a información batimétrica y topográfica, perfiles de playa, muestras de sedimento de playas, líneas de costa, aerofotografías de la zona de estudio, datos de

oleaje, datos visuales de barcos en ruta, trayectorias de huracanes, entre otros. A modo de resumen se presenta el siguiente cuadro con la información recopilada y generada durante el presente estudio:

Tabla 1. Información utilizada durante el proyecto EPROCA

DATOS	DESCRIPCIÓN
Línea de costa	Levantamiento Damaquiel-Tinajones. Mediante GPS y Fotografías aéreas.
Batimetrías	Base datos CIOH (Aguas profundas y someras) Levantamientos 2005 – Caribana, Caribana-Gigantón y Arboletes
Perfiles de playa	130 perfiles desde la anteplaya hasta la batimétrica -2 m
Granulometría	Se analizaron 180 muestras cubriendo toda el área
Salidas de campo de reconocimiento	Levantamiento durante el 2004 y el 2005 en cinco salidas de campo de acuerdo con los requerimientos del proyecto.
Oleaje	Información de barcos en ruta, boyas instrumentales y generación sintética de oleaje por huracanes.
Marea	Información de mareógrafos del IDEAM.

A continuación se presentan las características de algunos de los levantamientos realizados, al igual que la metodología utilizada para la generación de la información faltante.

1.3.1 Fotografías aéreas

Se han tomado 290 fotografías aéreas para hacer una restitución de la línea de costa. El tramo fotografiado ha sido entre el Delta de Tinajones y Punta San Juan, tal como se presenta en la figura siguiente.

1.3.2 Levantamientos batimétricos, perfiles de playa y

Entre los días 25 de abril y 06 de mayo de 2005 se realizó el levantamiento batimétrico en el área comprendida desde punta Arboletes a punta Caribana. Las especificaciones técnicas de estos levantamientos se presentan en el Anexo 7.



Figura 1.1. Distribución de aerofotografías tomadas en la zona para EPROCA

1.3.3 Clima marítimo e Hidrología

La información sobre las mareas se obtuvo del mareógrafo del Ideam localizado en Cartagena de Indias. Su proximidad con la zona de estudio, así como la longitud y calidad de la serie, y la poca magnitud de esta variable en el mar Caribe, hacen de este instrumento el más apropiado para caracterizar el régimen de mareas de la zona.

Los datos de oleaje se obtuvieron de dos bases: 1) Base de datos de barcos e ruta y 2) boyas de registro de oleaje. Los datos visuales de barcos en ruta que se han utilizados fueron facilitados por el British Meteorological Office y corresponden a la información que se tiene del mar Caribe entre 1963- 1997. La boya utilizada es de la “National Oceanographic and Atmospheric Agency” de Estados Unidos, NOAA; en particular, se contó con los datos de la boya 41018 que durante tres años (1994-1996) registró condiciones meteorológicas y de oleaje frente a la costa Caribe colombiana, en el punto con coordenadas 15°N, 75°W.

Los registros de caudales sobre el río Sinú han sido obtenidos de una estación limnigráfica que el Ideam tiene ubicada, con código 1307706, en el sitio Cotoca Abajo, justo en el punto con coordenadas (9°13N, 75°51W). El instrumento registra tanto los caudales como los niveles y la carga sedimentaria del río Sinú en ese punto desde febrero de 1970.

1.3.4 Información Sedimentológica

Según los mapas de repartición de las facies sedimentarias del litoral Caribe Colombiano, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y el CIOH, las características sedimentológicas de los fondos marinos de la plataforma continental se pueden describir de la siguiente manera:

En general los fondos de la zona del Golfo de Urabá se pueden clasificar sedimentariamente como Lodos Terrígenos (III A), con un porcentaje de carbonato de calcio entre 0 y 15 % y un porcentaje de arena entre 0 y 10 %. Esta situación se presenta para la zona comprendida entre Punta Coquito, en cercanías de la desembocadura del río León, hasta Punta Caribana.

Únicamente, en la desembocadura del río Atrato, concretamente en la zona de la boca el Roto se encuentra un depósito de arenas (terrígenas – I A), con un porcentaje de carbonato de calcio entre 0 y 15 % y un porcentaje de arena entre 90 y 100 %.

La zona comprendida entre punta Caribana y el delta del Sinú, presenta unas características sedimentarias muy heterogéneas, pero fundamentalmente lodosas. En general la franja más cercana a la línea de costa se clasifica como lodos arenosos (III A), con un porcentaje de carbonato de calcio entre 0 y 15 % y un porcentaje de arena entre 10 y 50 %, seguidos por una extensa franja de lodos (IV A), que en algunas zonas alcanza los 100 m de profundidad.

Entre punta Broqueles y punta Arboletes, en isla Tortuguilla existe un pequeño banco de arenas con alto contenido de carbonato de calcio (bioclastico) y calizas arrecifales, con un

porcentaje de carbonato de calcio entre 85 y 100 % y un porcentaje de arena entre 90 y 100 %.

Frente a punta Broqueles, entre las batimétricas 50 y 100 se localiza el bajo Bushnell, compuesto principalmente por formaciones coralinas y arenas lodosas (II B y II C), con un porcentaje de carbonato de calcio entre 15 y 85 % y un porcentaje de arena entre 50 y 90 %.

El área insular de isla Fuerte, esta conformada por calizas arrecifales, denominadas informalmente con el nombre de calizas arrecifales de isla Fuerte, con un porcentaje de carbonato de calcio entre 85 y 100 % y un porcentaje de arena entre 50 y 100 %.

Como se puede ver, la composición sedimentaria de los fondos marinos en las cercanías de la zona de estudio no es precisamente la más adecuada para ser utilizada como zona de préstamo de materiales (arenas) para una regeneración de las playas en proceso de erosión. Es por esto, que se deben analizar otras zonas, por lejanas que parezcan, con el fin de localizar posibles zonas de préstamo para las diferentes alternativas de solución.

En la zona del golfo de Morrosquillo la composición de los fondos es muy similar a la de la zona de interés, a diferencia de una pequeña franja de arenas entre punta de Piedras y punta San Bernardo, que conforma las playas del golfo y que no puede ser alterada.

El archipiélago de San Bernardo con una extensión de 50.000 ha (incluye la porción emergida de las Islas) con arrecifes del tipo franjeante y de parche (Díaz, et al., 1996a; Ramírez et al., 1994; López-Victoria, 1999), es una de las pocas zonas donde se encuentran abundantes depósitos de arenas, pero igualmente se hace evidente su no disponibilidad.

Más al norte, en el delta del Dique, se encuentra un depósito de arenas lodosas de aproximadamente 10 km² de extensión, con un porcentaje de arena entre 50 y 90%, que podría ser analizado como posible zona de préstamos. Igualmente en la bahía de Cartagena se ubican varias zonas que podrían llegar a ser zona de préstamo, tales como el Banco Santa Cruz, Bajo Manzanillo, el bajo ubicado entre Castillo Grande e Isla Manzanillo, ó la zona del canal de acceso a la bahía entre la isla de Tierra Bomba y Barú.

El dragado de algunas de estas zonas para la extracción de arenas como material de préstamo, podría ser a la vez, beneficioso para la actividad económica de la zona, cumpliéndose un doble objetivo.

Otras zonas susceptibles a ser zonas de préstamo, aunque mucho más alejadas de la zona de interés, son:

- La zona comprendida entre Cartagena y punta Canoas, con unos extensos depósitos de arenas finas a profundidades menores de 10 m.
- La ensenada de Galerazamba y punta Garita.
- La zona que se encuentra enfrente de la ciénaga Grande de Santa Marta
- Casi todo el litoral del departamento de la Guajira, desde el municipio de Dibulla hasta punta Cañón en bahía Honda.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO



2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS MORFOLÓGICO REGIONAL

La zona de estudio está comprendida entre el delta del Río Sinú y Punta Caribana, con una longitud aproximada de 170 km, pasando por los municipios de Necoclí, Arboletes, Los Córdoba, Puerto Escondido, Moñitos y San Bernardo del Viento (Figura 2.1). La plataforma continental, considerando el veril de los 100 m de profundidad como el límite de ésta, alcanza los 50 km en la zona del delta del Sinú, 40 km en Moñitos, 30 km en Puerto Escondido y 20 km frente a Arboletes hasta Punta Caribana, dando una idea de las bajas pendientes que se encuentran en los fondos.



Figura 2.1. Localización de la zona de estudio

2.1.1. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La zona de estudio se encuentra ubicada en una región que ha sido producto de la gran complejidad tectónica sedimentaria que posee la parte Noroccidental de Colombia. Esta característica, asociada a la interacción de las placas tectónicas del Caribe y Suramérica desde finales del Mesozoico, ha propiciado el desarrollo de una región conocida como “Cinturón del Sinú”. Esta zona corresponde a una secuencia sedimentaria de unos 8 km de espesor, conformada principalmente por rocas turbidíticas y hemipelágicas del Oligoceno-Plioceno (Duque-Caro, 1984).

Esta región se caracteriza por la presencia de estructuras diapíricas de lodo, con formas dómicas y cónicas que emergen a lo largo de las zonas mayores de falla, siguiendo el rumbo general del cinturón. Dichas estructuras se encuentran muy bien evidenciadas en Arboletes, San Juan y Damaquiel.

Las rocas consolidadas que afloran a lo largo de la línea de costa actual son principalmente arcillolitas y lodolitas, plegadas y fracturadas, eventualmente con lentes de areniscas y conglomerados. En los afloramientos de las unidades terciarias se observa una secuencia de estratos conformados por areniscas con intercalaciones de arcillositas. Ambas presentan diaclasamiento intenso, favoreciendo la acción erosiva del oleaje. Estos estratos se encuentran sometidos en algunos puntos a fenómenos de subsidencia y hundimiento a causa de la actividad tectónica.

Según el mapa de repartición de las facies sedimentarias de la plataforma continental del Golfo del Darién a Punta Canoa, los fondos marinos de la zona de estudio están compuestos esencialmente por lodos que se extienden hasta la batimétrica -100 a lo largo de toda la región. En la zona más cercana a la costa se observa una franja de 2 km de ancho, que se clasifica como lodos arenosos, principalmente asociados a los aportes de sedimentos provenientes de las fuentes aluviales y erosión de acantilados. Estas características, como se vera más adelante, representan un problema al momento de plantear la utilización de estos materiales como una alternativa para una posible regeneración de playas.

Localmente, entre la desembocadura del río San Juan y Punta Caribana, se observa una pequeña franja de arenas lodosas de aproximadamente 1 km de ancho, hasta la batimétrica -5, originada por los aportes sedimentarios del río San Juan.

2.1.2. DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA

Desde el punto de vista geomorfológico, la zona de estudio presenta unos rasgos muy característicos. Se observan dos orientaciones en la batimetría que se reflejan en términos generales en la línea de costa. Una de ellas, NNE-SSW, va desde Punta La Rada hasta Arboletes, mientras que la otra, NE-SW, va desde este punto hasta Punta Caribana. En la figura siguiente se aprecian muy bien.

Por otra parte, algunos elementos particulares modifican las condiciones en una escala mucho menor. Así, el Delta del río Sinú marca la tendencia de la playa Los Venados. Isla Fuerte, Isla Tortuguilla y algunos bajos coralinos hacen lo mismo entre Punta La Rada y Arboletes, tal como se muestra en la misma figura.

Más localmente, la morfología litoral de la zona se puede caracterizar como una sucesión de bahías y puntos duros o resistentes a la erosión, caracterizadas por formas en planta parabólicas.

A lo largo de toda la zona de estudio partiendo desde punta Caribana, hasta el delta del Sinú, se encuentra una sucesión de terrazas marinas emergidas, pequeñas planicies aluviales, seguidas de cordones litorales y planicies aluviales, además de zonas acantiladas y manifestaciones de diapirismo de lodos. Igualmente se pueden observar formaciones coralinas que se encuentran localizadas en isla Fuerte, bajo Burbujas y bajo Bushnell.

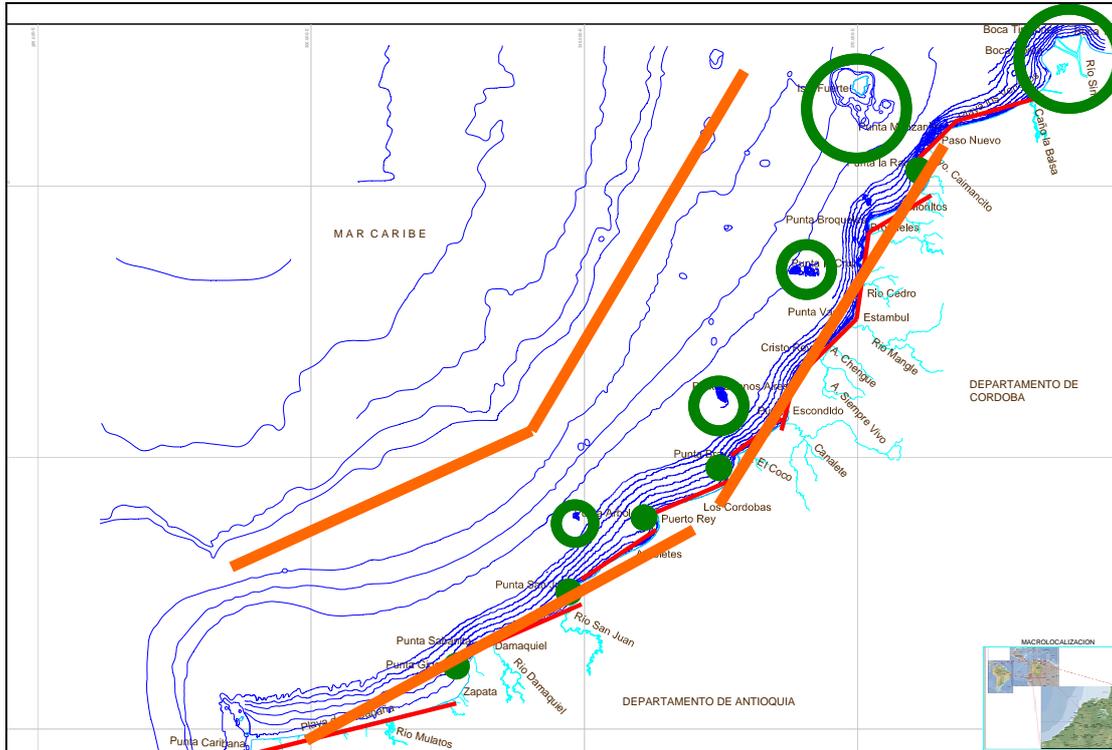


Figura 2.2. Rasgos generales de la zona de estudio

La geomorfología de la zona, caracterizada por estar conformada por una plataforma litoral levantada y cubierta de sedimentos marinos, es gradualmente variada de occidente a oriente, y se puede describir de la siguiente manera: Comienza con una llanura costera con presencia de cordones litorales que abarcan grandes áreas y se extienden hasta el noreste del río Mulatos, donde se encuentran afloramientos de rocas consolidadas que hacen parte de pequeñas terrazas y zonas de abrasión. La terraza marina presenta una elevación media de 36 m en San Juan de Urabá, disminuyendo gradualmente su altura hasta Punta Rey, donde alcanza una elevación de 0.5 m. Desde aquí se extienden hasta Santander de la Cruz, variando en altura entre 3 y 15 m, hasta punta el Coquito, donde encuentra nuevamente una llanura costera que se prolonga hasta la zona del delta del río Sinú y se mezcla con las llanuras de manglar en el delta y en los alrededores de la desembocadura del río Mangle.

En el siguiente apartado se realizara una descripción más detallada de las diferentes zonas en las que se ha dividido la zona de estudio, enumerando las diferentes unidades geomorfológicas de cada una.

2.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS MORFOLÓGICO SECTORIAL

Como ya se mencionó anteriormente, la morfología litoral de la zona se puede caracterizar como una sucesión de bahías y puntos duros o resistentes a la erosión. Siguiendo estos parámetros, se ha dividido la región en 9 zonas (plano 2.2 y Figura 2.3):

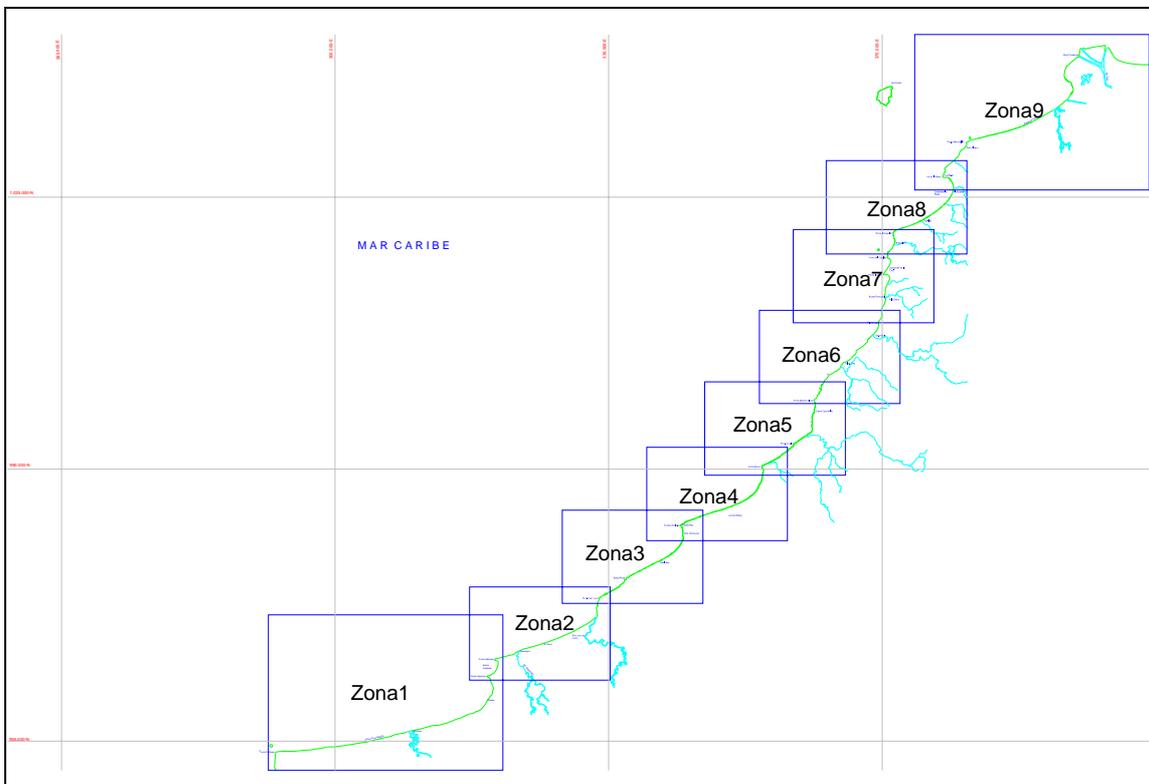


Figura 2.3. Zonificación del área de estudio

- Zona 1 – Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla
- Zona 2 – Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan
- Zona 3 – Entre Punta San Juan y Punta Arboletes
- Zona 4 – Entre Punta Arboletes y Punta Brava

- Zona 5 – Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires
- Zona 6 – Entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle
- Zona 7 – Entre Boca Mangle y Punta Broqueles
- Zona 8 – Entre Punta Broqueles y Punta la Rada
- Zona 9 – Entre Punta la Rada y el delta del río Sinú

2.2.1 Zona 1 – Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla

La franja litoral está caracterizada por una extensa planicie arenosa de cerca de 25 km de longitud, conformada por cordones litorales con alturas de 0.5 a 1.0 m, dunas, ciénagas y terrenos bajos inundables, conformada por material aluvial del río Mulatos. En esta zona se inicia el levantamiento de la terraza marina, alcanzando una altura máxima de 15 m.s.n.m.

La línea de costa entre el río Iguana y punta Gigantón se encuentran dominada por la difracción del oleaje en dicha punta, al igual que entre punta Gigantón y punta Sabanilla, presentando una forma en planta de tipo parabólico.

2.2.2 Zona 2 – Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan

Caracterizada fundamentalmente por una zona de playas de 15 km de longitud, esta zona está formada por los aportes sedimentarios de los ríos San Juan y Damaquiel. La terraza marina que se prolonga a todo lo largo de la zona, va perdiendo altura a medida que se aproxima a la desembocadura del río San Juan. En este punto, la falla de San Juan de Urabá, produce un nuevo levantamiento de la terraza marina, hasta alcanzar los 35 m.s.n.m, separándola del primer sector. Entre la desembocadura del río y la punta San Juan se encuentra una zona acantilada formada por la acción erosiva del oleaje y la falla anteriormente mencionada. Frente a la población de Damaquiel y Punta San Juan, se presentan estructuras diapíricas de lodo, que en algunas ocasiones emergen a la superficie.

2.2.3 Zona 3 – Entre Punta San Juan y Punta Arboletes

La terraza marina decrece progresivamente hacia el este, hasta la población de Los Córdoba a 7 km de Punta Arboletes, pasando de 35 m de altura, hasta 1.0 m. Las intrusiones de lodo son una característica dominante de esta zona, evidenciándose específicamente en el Volcán de lodo de Arboletes, que tiene un diámetro aproximado de 30 m y se eleva sobre el nivel medio del mar a 22 m. Del mismo modo, en vecindades del río Jobo, sobre la carretera entre Arboletes y San Juan de Urabá se presentan intrusiones de lodo, al igual que en las inmediaciones de punta Arboletes. Se aprecia también una basta zona de playas en forma de parábola en una longitud de 15 km aproximadamente.

Es esta una de las zonas más castigadas por la erosión, evidencia de ello ha sido la desaparición de punta Rey, que se encontraba a 1600 m de la actual punta Arboletes. Como consecuencia de la erosión de dicha punta, las playas de Arboletes han quedado desprotegidas frente a la acción del oleaje, acelerándose así el proceso erosivo del litoral. Reflejo de estos procesos es la acumulación de escombros rocosos en la base de los acantilados, producto de la desestabilización del escarpe por la acción marina.

2.2.4 Zona 4 – Entre Punta Arboletes y Punta Brava

La franja litoral está caracterizada por una terraza marina, que se alterna morfogénicamente entre arenosa y lodosa, al igual que una basta zona de colinas diapíricas que discurren a todo lo largo de la zona. El frente de costa está compuesto fundamentalmente por acantilados de baja altura y playas muy angostas, aunque muy largas (~12 km) formadas esencialmente por lodos arenosos en el último tramo de esta zona. Estas playas se encuentran protegidas ligeramente de la acción del oleaje, por la difracción producida por punta brava, generando una zona de sombra frente a la incidencia directa del oleaje.

2.2.5 Zona 5 – Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires

En esta zona la terraza marina es mucho más estrecha, con una altura media de 2 m, terminando en una zona acantilada y escarpes formados esencialmente por areniscas

muy meteorizadas intercaladas con arcillositas y limolitas, que recorren casi toda la extensión. Esto evidencia la presencia de salientes rocosos que apoyan pequeñas playas de menos de 1 km de longitud.

En cercanías del municipio de Puerto Escondido hay evidencias del diapirismo de lodos característico de toda la región. En la cabecera municipal, encajadas entre estructuras antropicas y algunas puntas naturales, se encuentran pequeñas playas de arena. De igual forma, en los alrededores de la boca Baldomero se localiza una playa producto de los sedimentos aportados por el caño. Aquí mismo se localiza una de las principales alturas, formada por colinas bajas, como el cerro El Tortugón de 175 m.s.n.m.

La llanura aluvial formada por el río Canalete presenta una pequeña zona caracterizada como llanura de manglar. Frente a su desembocadura, a 9.0 km de distancia, se localiza la isla Tortuguilla.

2.2.6 Zona 6 – Entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle

Morfogenéticamente es una zona muy completa, ya que reúne gran cantidad de unidades en la misma área. La franja litoral está caracterizada por un sistema de pequeñas playas (entre 1.5 y 2 km de longitud) alimentado por el río Mangle, la quebrada la Yuca y Arroyo Hondo, además de una gran cantidad de caños que desembocan a todo lo largo de la zona. Estas playas además de estar alimentadas por los sedimentos procedentes de estas fuentes, se encuentran apoyadas en una serie de puntas que garantizan su estabilidad en perfil (punta Buenos Aires, punta el Prieto, punta Cristo Rey, punta Santa Bárbara, punta de Mangle). En la desembocadura del río Mangle y su ribera, se localiza una amplia llanura de manglar muerto.

En general la terraza marina se prolonga a lo largo de toda la zona, mezclada con colinas diapíricas que se manifiestan desde punta el prieto hasta la desembocadura del río Mangle. Igualmente, en cercanías de Cristo Rey, se ubica una zona de cerros denudativos y conos de deyección asociados a los procesos aluviales de la quebrada la Yuca.

2.2.7 Zona 7 – Entre Boca Mangle y Punta Broqueles

La llanura aluvial del río Cedro divide la zona en dos partes: la primera, hacia el occidente, es conformada por la terraza marina lodosa, y la segunda, hacia oriente, hasta la desembocadura del río Broqueles compuesta por una llanura costera lodosa. En esta última zona se aprecia una pequeña llanura deltaica en la desembocadura de la quebrada de la Cruz, al igual que un diapiro en la punta del mismo nombre. Desde punta el Coquito hasta la desembocadura del río broqueles, la terraza marina es de origen calcáreo (arrecifal), mezclada con depósitos arenosos. A partir de la desembocadura del río, se levanta nuevamente la terraza marina arenosa hasta la punta Broqueles, donde vuelve a descender para convertirse en llanura costera. En general hay varias zonas de playas de arenas de ~1.0-1.5 km de longitud, principalmente al occidente de la desembocadura de los ríos Broqueles y Cedro.

2.2.8 Zona 8 – Entre Punta Broqueles y Punta la Rada

Esta zona es una gran parábola formada por la difracción del oleaje en Punta La Rada e Isla Fuerte. La franja litoral está conformada por playas anchas, de hasta 8 km de longitud,, limitadas por una llanura costera lodosa seguida de la terraza marina arenosa, la cual se extiende desde el occidente hasta cercanías de punta la Rada, donde se transforma en una terraza marina lodosa.

Igualmente se encuentran varias llanuras de manglar repartidas por toda la zona. En punta la Rada la terraza marina es arenosa y al este de esta se localiza una colina diapirica, con manifestación superficial en el volcán de lodo de Caimancito. En las playas cercanas a punta la Rada se observan espigas y cordones litorales, producto de la depositación sedimentaria. En proximidades a la población de Moñitos, se extiende una llanura aluvial a lo largo del cauce del arroyo de Coa. Los múltiples arroyos que desembocan en la zona al igual que los sedimentos provenientes del Sinú alimentan estas playas, la cual se encuentra protegida de la acción del oleaje por la punta la Rada, formando una playa parabólica muy marcada, constituyendo la ensenada la Rada.

2.2.9 Zona 9 – Entre Punta la Rada y el delta del río Sinú

Se puede dividir en dos subzonas, la primera entre punta la Rada y punta Manzanillo, sumamente erosionada, caracterizada como una llanura costera arenosa, que se eleva gradualmente hasta convertirse en terraza, y posteriormente desciende nuevamente en cercanías de punta Piedra, donde se localizan cerros y colinas denudativas. A partir de aquí comienza la segunda subzona, caracterizada por una extensa franja de playas hasta el delta del río Sinú, limitada por una llanura costera arenosa al sur. A lo largo de la playa de los Venados y la playa del Viento, se aprecian pequeñas unidades de manglares y cordones litorales paralelos a las playas.

La zona del delta del río Sinú esta caracterizada por una planicie deltaica, con llanuras de manglar las cuales son las más importantes de toda la zona de estudio, además de la llanura aluvial por donde discurre la desembocadura del río. Antes de verter al mar, el río se divide en tres bocas: Corea, del Medio y Mirella. Según su forma, el delta se puede clasificar como Lobulado.

Separada del continente, se localiza el área insular de isla Fuerte, que esta conformada por calizas arrecifales, denominadas informalmente con el nombre de calizas arrecifales de isla Fuerte. Se encuentra localizada a 12 km al noroeste de punta Manzanillo, que se encuentra denominada como una terraza marina arrecifal, compartiendo la misma unidad morfogénica. Esta formación contribuye en parte, a la disminución de la energía incidente sobre las playas ubicadas al sur oriente de la misma.

CAPITULO 3
DIAGNOSIS



3. DIAGNOSIS

3.1. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Como ya se ha mencionado, en los últimos años se ha producido un retroceso en la línea de costa entre el Delta de Tinajones (río Sinú) y Punta Caribana. La magnitud de ese retroceso ha estado marcado tanto por las características físicas del litoral como por la dinámica marina. En relación con lo primero, es claro que donde se observan puntos duros en la costa o donde el sedimento de las playas es más grueso, el retroceso ha sido menor. En cuanto a lo segundo, se ha establecido que donde mayor es la concentración de oleaje y el ángulo de incidencia presenta mayor oblicuidad, mayor ha sido la erosión costera. En algunas zonas, incluso, fenómenos geológicos como el diapirismo de lodo han podido influenciar directamente los procesos erosivos, tal como lo proponen Correa y Vernet (2004).

3.1.1. Metodología

Para la estimación de las tasas de erosión entre el Delta de Tinajones y Punta Caribana se siguió la metodología presentada por Morton (1977). Con base en información histórica de cartas náuticas (IGAC, 1964), de la restitución de fotografías aéreas llevada a cabo por el CIOH (Figura 3.1) y de levantamientos recientes de la línea de costa hechos para este proyecto (2004 y 2005), mediante un GPS diferencial, se han podido establecer las tasas de variación de la línea de costa por tramos de litoral. Dichas tasas se estimaron midiendo, en sentido perpendicular a las líneas de costa de las diferentes fuentes, las distancias entre líneas de costas sucesivas, y las velocidades promedio o tasas de erosión/acreción se calcularon dividiendo los desplazamientos por el tiempo entre contornos sucesivos.

El litoral estudiado presenta diferencias morfológicas sustanciales. Para una misma dinámica, el tamaño del sedimento y la longitud de las zonas geomorfológicamente homogéneas influyen, entre otras cosas, en la respuesta morfodinámica del litoral: erosión o acreción. Con el ánimo de facilitar el análisis de resultados en ese sentido, las tasas de retroceso se han agrupado de la siguiente manera:

- Erosión baja: 1 – 2 m/año
- Erosión media: 2 – 3 m/año
- Erosión alta: 3 – 5 m/año
- Erosión muy alta: > 5 m/año

Los resultados obtenidos se confrontaron con información publicada anteriormente, encontrando patrones muy similares:

Correa, I.D. y Vernet, G. (2004). "Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo). Costa Caribe colombiana". Bol. Invest. Mar. Cost., Vol. 33. pp. 7-28.

Palacio, H y Restrepo, A. (1999). "Influencia de la evolución del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral caribe Antioqueño". TDG Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Adicionalmente, los resultados también se corroboraron con información aportada por los habitantes de la zona.



Figura 3.1. Fotografías aéreas tomadas para el estudio de evolución de la línea de costa

3.1.2. Resultados

Cabe resaltar que con la información utilizada para el cálculo de las tasas de erosión, los resultados aquí presentados deben tomarse como orientativos o de carácter semicuantitativo, a la hora de evaluar dichas tasas. Por un lado, los efectos de escala pueden dar errores moderados. Por otra parte, la determinación de la línea de costa a partir de fotografías aéreas es una información valiosa, aunque presenta ciertos inconvenientes. Dado que los vuelos no son efectuados en las mismas épocas o estaciones, se puede esperar que la línea de costa esté más retranqueada en ciertas épocas del año respecto a otras épocas. Las restituciones fotogramétricas tampoco tienen en cuenta las correcciones por la marea meteorológica (meteorológicas, presión atmosférica). En cualquier caso, aún con los inconvenientes señalados anteriormente, ésta información nos permite definir en grandes escalas, cuál es el comportamiento y tendencias de la línea de costa. Lo que interesa es identificar los patrones de erosión y determinar las zonas de mayor variación.

La Figura 3.2 muestra los resultados obtenidos para los últimos 42 años, desde 1964 hasta 2005. Obsérvese que, en términos generales, todo el tramo de costa se encuentra en una situación de desequilibrio con erosión alta, siendo más o menos importante dependiendo de la dinámica marina local. La mayor erosión se observa entre Puerto Escondido y el río Jobo (2 km al sur de Arboletes). Si bien también hay zonas concentradas de erosión alta entre Punta Caribana y el río Jobo, y entre Puerto Escondido y el Delta de Tinajones, son de carácter local y no parecen responder a un comportamiento general. Es decir, en estas zonas parece predominar la erosión baja o media. Varios son los factores para que esto ocurra. En primera instancia, entre Puerto Escondido y Arboletes no se observa ningún elemento que sirva de abrigo al oleaje, ni gran cantidad de puntos duros en sus playas. Por otro lado, Isla Fuerte genera una protección importante frente al oleaje en la parte norte de la zona de estudio, principalmente al Delta de Tinajones, Moñitos, Broqueles y Río Cedro. Además, en esta zona se observan puntos duros más difíciles de erosionar que en las partes media y sur de la zona de estudio. La orientación general de la línea de costa al sur de Arboletes hace que el oleaje proveniente del Norte (el más frecuente y energético) incida casi

perpendicularmente y las corrientes de deriva que se generan sean mínimas como para transportar grandes cantidades de sedimento.

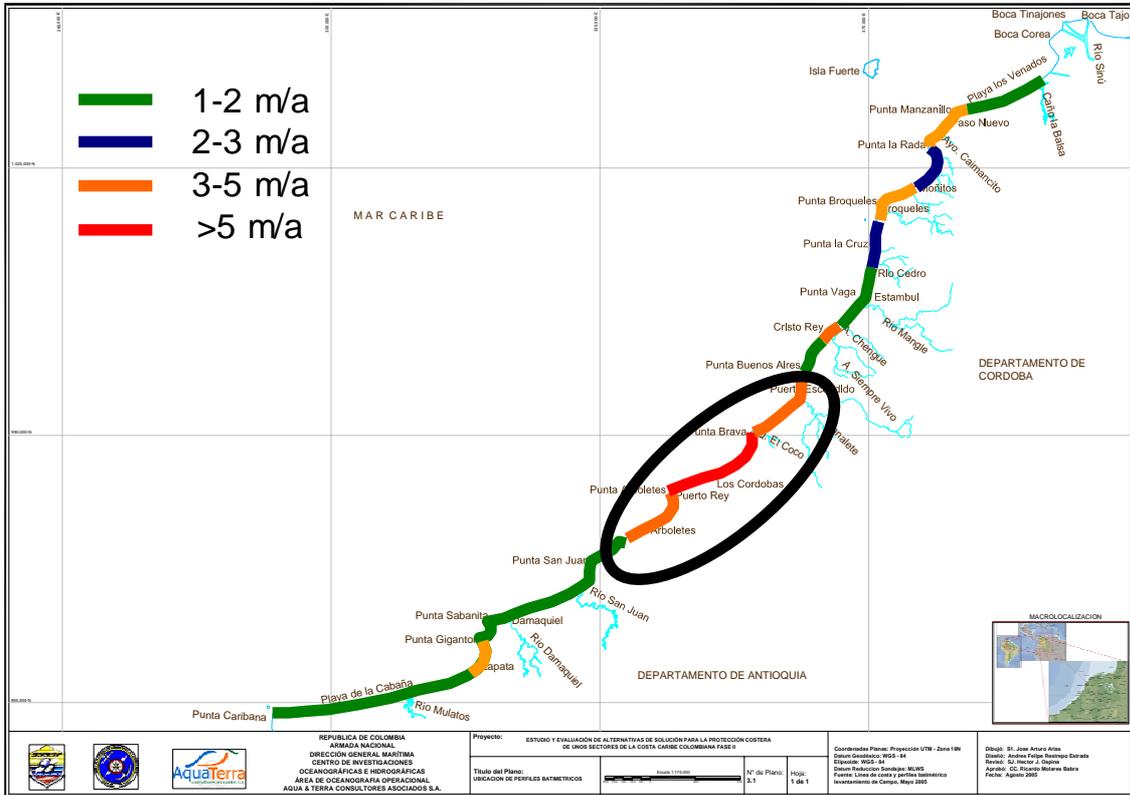


Figura 3.2. Tasas de retroceso de la línea de costa entre Punta Caribana y el Delta de Tinajones. 1964-2005.

A continuación se presenta un análisis sectorial de los diferentes tramos en los que se ha dividido la zona de estudio:

Zona 1: Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla:

En este tramo, el retroceso de la línea de costa no es muy intenso. La tasa de erosión no supera los 2 m/año, salvo un tramo de un par de kilómetros alrededor de la población de Zapata que presenta una erosión alta (entre 3 y 5 m/año). Este comportamiento se debe principalmente a dos factores: 1) La orientación general de la línea de costa hace que el oleaje proveniente del Norte (el más frecuente y energético como se verá posteriormente) incida casi perpendicularmente y las corrientes de deriva que se generan sean mínimas

como para transportar grandes cantidades de sedimento. 2) La presencia del río Mulatos, también como se verá más adelante, aporta una cantidad medianamente importante de sedimentos que intentan mantener el equilibrio de la zona.

Zona 2: Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan:

Al igual que el tramo litoral anteriormente descrito, esta zona tiene la menor tasa de erosión vista en la zona. La orientación de la línea de costa es muy importante para que esto ocurra. igualmente las descargas sedimentarias del río San Juan también influyen directamente para que la playa se encuentre en menor grado de desequilibrio. Es de destacar el tamaño medio de los sedimentos en esta zona ($D_{50} = 0.54$ mm), aproximadamente el doble del tamaño medio del resto de la zona de estudio, beneficiando así la estabilidad de las playas donde se encuentra.

Zona 3: Entre Punta San Juan y Punta Arboletes:

En esta zona se aprecia una diferencia notable entre dos tramos. Entre Punta San Juan y el río Jobo las tasas de erosión se han mantenido bajas (1-2 m/año) como consecuencia de la descarga de dicho río. Pero entre éste y Punta Arboletes, el retroceso ha sido muy intenso, con tasas que varían entre 3 y 5 m/año.



Figura 3.3. Erosión en Arboletes

Zona 4: Entre Punta Arboletes y Punta Brava:

De todo el litoral estudiado, esta es una de las zonas más afectadas por el desequilibrio sedimentario. La intensa erosión que ha sufrido Punta Arboletes (~45 m/año durante los últimos 40 años) y la muy alta erosión de la playa de Los Córdoba (hasta 8 m/año en algún tramo) hace de este litoral el más crítico desde el punto de vista del retroceso de la línea de costa. La falta de aportes sedimentarios, así como la desaparición del único punto duro han sido las causas principales de estas tasas de erosión tan altas.



Figura 3.4. Erosión en Los Córdoba

Zona 5: Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires:

Los alrededores de la población de Puerto Escondido ha sido otra zona muy afectada por los procesos erosivos. Tasas de entre 3 y 5 m/año así lo demuestran. Las causas pueden ser las mismas que las de las dos zonas anteriormente descritas.

Zona 6: Entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle:

En términos generales es una zona de erosión baja, aunque con un pequeño tramo alrededor de la población de Cristo Rey que presenta una erosión alta (entre 3 y 5 m/año). Como se muestra en la descripción morfológica, esta zona está alimentada por arenas del río Mangle y una gran cantidad de arroyos y caños que desembocan a todo lo largo de la

zona y que intentan mantener el equilibrio sedimentario. Además, la presencia de salientes rocosos aumenta la estabilidad del litoral.

Zona 7: Entre Boca Mangle y Punta Broqueles:

Es una de las zonas menos inestables de todo el tramo estudiado. Las máximas tasas de retroceso no superan los 3 m/año. Los ríos Cedro y Broqueles intentan mantener un par de playas alrededor de su desembocadura. Los puntos duros o salientes rocosos ayudan en esta función.

Zona 8: Entre Punta Broqueles y Punta La Rada:

Si bien alrededor de Punta Broqueles se observa unas tasas de erosión altas (entre 3 y 5 m/año), entre la población de Moñitos y Punta La Rada es más notoria la estabilidad de las playas. Los múltiples arroyos que desembocan en la zona al igual que los sedimentos provenientes del Sinú alimentan las alimentan permanentemente.

Zona 9: Entre Punta La Rada y Delta de Tinajones:

Este tramo se puede dividir en dos subzonas: Una localizada entre Punta La Rada y Punta Manzanillo, con tasas de erosión entre 3 y 5 m/año, y otra entre Punta Manzanillo y el Delta de Tinajones, básicamente formada por la playa Los Venados, con menores tasas de retroceso (1 m/año) debido a su proximidad con las descargas sedimentarias del río Sinú.



Figura 3.5. Erosión en Punta La Rada

3.2. ANÁLISIS DE INTERVENCIONES HISTÓRICAS

En los últimos años y con motivo del retroceso acelerado de la línea de costa, los habitantes de la región han intentado de múltiples maneras detener el proceso erosivo, o en su defecto controlarlo, aunque sin mucho éxito. A lo largo de toda la franja litoral se pueden observar gran cantidad de obras de protección, muchas de ellas artesanales, que han sido construidas sin haber caracterizado la zona de actuación, las dinámicas actuantes y los procesos asociados a éstas. Por tal razón y debido a la gran complejidad de los procesos sedimentarios asociados a la dinámica litoral de la zona, dichas actuaciones no han funcionado en su gran mayoría, y muchas de ellas han incrementado el problema de erosión local, al convertirse en una barrera para el transporte sedimentario asociado a la deriva litoral y las corrientes producidas por la rotura del oleaje. Igualmente, en su mayoría, estas estructuras no han sido dimensionadas teniendo en cuenta las características del oleaje incidente, con un periodo de retorno asociado a la vida útil de diseño, por lo que el oleaje asociado a un evento extremal las destruye con relativa facilidad, dispersando por la playa los elementos que las conforman.

En su afán, más que justificado, por proteger sus viviendas e intereses de la erosión de playas y acantilados, los habitantes y gobernantes de la región han construido

innumerables estructuras, entre las que se pueden encontrar espolones, enrocados, muros de protección, obras de defensa mediante la utilización de costales de arena y bolsacreto, entre otros. A continuación se presenta un inventario de las principales estructuras que se encuentran en la zona de estudio, basado en visitas de campo, fotografías aéreas, informes técnicos de Invermar, Corpourabá, Universidad Eafit y Universidad Nacional de Colombia, entre otros.

Este numeral se divide en dos apartados. En primera instancia, se hace un inventario exhaustivo de las estructuras de protección costera que se han construido a lo largo del litoral estudiado. En segundo término, se describe el problema de la extracción de arenas de carácter antrópico.

3.2.1 Inventario de estructuras de protección costera

Zona 1 – Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla

En esta zona se han localizado una serie de estructuras que pretenden aumentar el ancho de las playas y detener los procesos erosivos al pie de los acantilados. En cercanías de la quebrada Aguas Prietas, en vecindades del corregimiento de Mulatos se observan seis (6) espolones separados entre sí por una distancia aproximada de entre 80 y 100 m, y fabricados con pentápodos de hormigón. En general la recuperación local del ancho de playa se encuentra entre 15 y 25 m, a pesar de que algunas de estas estructuras están averiadas y en inicio de destrucción.

Más al norte, en cercanías de la población de Zapata, se localizan tres (3) espolones fabricados de pentápodos de hormigón, separados entre sí por una distancia de 100 m. En general se encuentran en buen estado, pero no cumplen ninguna función ya que la zona presenta una insuficiencia en cuanto a los aportes sedimentarios, necesarios para la estabilidad de las playas. Se podría llegar a plantear una pequeña regeneración, con el vertido de arenas de una zona aledaña de préstamo.

Zona 2 – Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan

En el corregimiento de Damaquiel se encuentran emplazados dos (2) espolones de entre 50 y 60 m de longitud aproximadamente cada uno. Están formados por escolleras y reforzados por bolsacretos. Este sistema constructivo puede resultar útil aunque no brinda ningún tipo de trabazón entre los elementos que conforman la estructura, disminuyendo así la estabilidad estructural del conjunto. Igualmente se observa que una de las estructuras está seriamente averiada y cerca de ésta se pueden encontrar vestigios de un espolón completamente destruido.

En la cabecera municipal de Uveros se encuentran dos espolones de aproximadamente 50 m de longitud. El primero de ellos compuesto por bolsacretos de 1.5 x 1.0 m, se encuentra semisumergido en su tramo final, debido posiblemente al desplazamiento de algunos de los elementos del morro por acción del oleaje. La segunda estructura está compuesta por pentápodos de hormigón en un primer tramo, y bolsacretos en el último tramo y morro.



Figura 3.6. Obras de protección costera en Damaquiel – Suroeste



Figura 3.7. Vestigios de obras de protección costera en Damaquiel

En el municipio de San Juan de Urabá se han señalado cuatro (4) espolones de aproximadamente 60 m de longitud y una barrera de protección de 37 m de longitud. En general la recuperación de la línea de costa asociada a estas obras es mínima.



Figura 3.8. Obras de protección costera en Uveros – Espolón 1



Figura 3.9. Obras de protección costera en Uveros – Espolón 2

Zona 3 – Entre Punta San Juan y Punta Arboletes

Según Correa y Vernet (2004), solamente entre las poblaciones de Arboletes y San Juan de Urabá se han construido cerca de 43 estructuras de protección, demandando inversiones públicas y privadas calculadas en alrededor de los \$COL 2.300.000.000.

A partir de la desembocadura del río Jobo, pasando por Arboletes y llegando hasta Punta Rey, se encuentra el sector más afectado por los procesos de erosión. En esta zona se han construido cerca de 34 espolones y 4 barreras de protección, intentando detener los procesos de erosión (o como dicen lo habitantes, para recuperar la playa).

En la siguiente figura se puede observar la densidad de estructuras de protección construidas entorno al núcleo urbano de Arboletes, de las cuales sólo 15 presentan una influencia mínima en el proceso de recuperación de la línea de costa y el resto no funcionan o, por lo contrario, agravan más el problema.



Figura 3.10. Obras de protección costera en Arboletes – Casco urbano

El primer espolón ubicado a 200 m del río Jobo, tiene una longitud de 45 m aproximadamente y está compuesto principalmente por escollera. Presenta una recuperación de 20 m de frente de playa, encajada entre éste y el siguiente espolón al norte. Es de notar que aguas abajo de la estructura, la erosión se ha intensificado debido a la retención de sedimentos al otro lado de la misma. El morro de la estructura se encuentra averiado.

Seguidamente, a 80 m de éste, se localiza un espolón de 50 m de longitud y 4 m de ancho en coronación, formado por pentápodos de hormigón en el manto principal y un núcleo y filtros de escollera. Aguas arriba presenta una recuperación de 35 m en el frente de playa y 150 m de longitud aproximadamente, disminuyendo en ancho, en forma de cuña, hasta alcanzar nuevamente la base del acantilado.

La tercera estructura, de 20 m de longitud, se encuentra en muy malas condiciones y su aporte a la recuperación de la línea de costa es nulo. A 50 m de la misma se localiza un cuarto espolón de 50 m de longitud, compuesto por pentápodos de hormigón, el cual ha influido muy poco en el avance de la línea de costa. Posteriormente a 100 m del anterior se localiza el quinto espolón de 20 m de longitud compuesto por escolleras y colmatado por la arena.

El sexto espolón se ubica a 400 m de la anterior estructura. Tiene una longitud aproximada de 60 m y un ancho en coronación de 4 m. Está compuesto por escolleras y no ha funcionado de manera alguna en la recuperación de las playas. Seguidamente, a 185 m hacia el norte, se encuentra el séptimo espolón, de 60 m de longitud y al igual que el anterior, no ha cumplido su función.

Localizado a 140 m de la última estructura, se encuentra el octavo espolón. Posee una longitud de 95 m y 4 m en coronación, compuesto por un núcleo y filtros de escollera, recubierto por un manto principal de pentápodos. En su coronación se encuentra revestido de hormigón a manera de paseo marítimo o malecón. Ha propiciado la recuperación de la línea de costa a lo largo de toda la playa hasta la desembocadura del río Arboletes (400 m), el cual contribuye con aportes sedimentarios al sistema. El ancho de la playa en las cercanías del espolón es de 65 m. Es de anotar que esta estructura es igualmente responsable de la detención del transporte sedimentario en esta zona, actuando como barrera total al tránsito de los sedimentos que viajaban con dirección SW. Esto se evidencia por la escasa depositación entre las dos estructuras anteriormente descritas, a pesar de sus dimensiones (60 m cada una).



Figura 3.11. Obras de protección costera en Arboletes – Espolón principal

Pasando el río Arboletes, a 750 m de la última estructura, se ubica el noveno espolón, que tiene 40 m de longitud y una orientación aproximada S-N. Está construido con escolleras y su funcionalidad puede ser caracterizada como nula. A 90 m de éste se localiza el décimo espolón, con orientación muy similar y una longitud aproximada de 45 m, está

compuesto por escolleras, con un ancho de coronación de 4 m. Adosado a éste, hacia el lado sur, se hallan unas escaleras de hormigón muy deterioradas por la acción del oleaje, que bajan hacia lo que en algún momento debió ser la playa.



Figura 3.12. Obras de protección costera en Arboletes – Noreste

Más adelante, a 100 m de este último, se localiza el espolón número 11, de aproximadamente 30 m de longitud y compuesto por escolleras. Como muchos otros, no ha conseguido ningún avance en el frente de playa y, por lo contrario, se observa una intensa socavación de la base de la terraza en el lado sur.

A escasos 60 m se encuentra una serie de estructuras exentas, que buscan la formación de pequeñas playas en forma de tómbolo, debido a la difracción del oleaje. Este grupo de cinco estructuras paralelas a la línea de costa, a 20 m de la misma, no miden más de 120 m en todo su conjunto y están construidas con bloques de escolleras de diferentes tamaños. Conceptualmente esta es una buena medida, pero carece de un estudio serio que la sustente. La separación de las estructuras entre sí no es la más adecuada, además de que han sido construidas muy cercanas a la línea de costa. Igualmente se debe tener especial cuidado a la hora de dimensionar el tamaño de los elementos que la componen, ya que la heterogeneidad en los tamaños puede causar el deterioro de la misma.



Figura 3.13. Obras de protección costera en Arboletes – Tómbolos

Siguiendo en dirección norte, a 270 m de las estructuras exentas, al nivel del sector conocido como “Volcán de Lodo” se ha construido un doceavo espolón, de 75 m de longitud en escollera, con un ancho de 4 m en coronación. Esta estructura no ha conseguido el avance de la línea de costa a pesar de su longitud, por lo que se ha recurrido, como medida complementaria, a la construcción de enrrocados de protección longitudinales, utilizando escolleras y bolsacretos, que tampoco han logrado el resultado que se quería. Se debe resaltar que en la implementación de protecciones longitudinales deben tenerse en cuenta las condiciones de filtro de los diferentes elementos que la conforman, ya que a través de los “poros” del manto principal pueden filtrarse los finos de las capas inferiores, provocando el deterioro de la obra y perdiendo la funcionalidad para la que fue concebida.

Más al norte, a 150 m del espolón anterior, se ubica una pequeña estructura de 25 m de longitud, la cual se encuentra seriamente averiada y no cumple ninguna función de protección litoral.



Figura 3.14. Obras de protección costera en Arboletes –Volcán de lodo

Continuando hacia Punta Arboletes, a 360 m del espolón número 12, se localiza un gran espolón de aproximadamente 100 m de longitud y 5 m de ancho en coronación, que está compuesto por escolleras de diferentes tamaños. Esta obra no ha conseguido un aumento considerable en el frente de playa debido principalmente a la escasez de sedimentos del sector y además ha propiciado la erosión aguas abajo de la obra, debido a la retención de los pocos sedimentos que viajaban con las corrientes producidas por la rotura del oleaje. En general, se aprecia un grave déficit sedimentario en la zona que no puede ser solucionado con la construcción de obras de protección, sino que además debe ser compensado con aportes externos, para lograr así conseguir un avance en la línea de costa, alcanzando un equilibrio estático local favorecido por la acción de las estructuras de protección.



Figura 3.15. Obras de protección costera en Arboletes –Volcán de lodo

Continuando hacia el norte, en la población “Minuto de Dios” se encuentran serios problemas de erosión. Se observan deslizamientos de los acantilados donde se ubican las

casas e intentos fallidos de la población por evitar el proceso natural por medio de sacos de arena y estructuras artesanales.



Figura 3.16. Obras de protección costera en Arboletes – Minuto de Dios

En esta zona se pueden localizar hasta un total de 12 espolones, además de varios intentos fallidos por controlar la erosión mediante obras longitudinales de protección. La longitud media de cada espolón es de 30 m, con una separación media de 100 m entre las diferentes estructuras. En general, los resultados obtenidos con estas obras han sido escasos, logrando la formación de pequeñas playas de no más de 15 m de ancho.

Debido a la dirección de incidencia del oleaje, esta es una zona muy difícil de controlar, ya que las corrientes longitudinales producidas por la rotura del oleaje son muy intensas, dificultando la estabilización del material sedimentario que se deposita en esta zona. Igualmente, la degradación de muchas de estas estructuras pone nuevamente de manifiesto el intento desesperado y sin ningún criterio de tipo técnico para estabilizar y proteger la zona de los procesos erosivos, mediante la construcción indiscriminada y deficiente en cuanto a la estabilidad estructural de las mismas, generando falsas expectativas y costos económicos que finalmente no conducen a la solución adecuada. La zona de Punta Rey es otro claro ejemplo de lo que allí sucede, encontrándose intentos fallidos de protección del litoral por todas partes, y sin ningún resultado alentador.



Figura 3.17. Obras de protección costera en Arboletes – Punta Rey

Zona 4 – Entre Punta Arboletes y Punta Brava

En el sector de Los Córdoba existen 3 espolones intentando contener el proceso de erosión de los acantilados. El primero se encuentra localizado 2 km al sur del río Los Córdoba, con una longitud aproximada de 40 m y construido con escolleras. Este espolón ha acumulado un volumen no despreciable de sedimentos al norte del mismo. Más al norte, a unos 80 m, aparece un segundo espolón construido hace 7 años y de 30 m de longitud, actualmente deteriorado (semisumergido) por el efecto del oleaje, que ayuda a encajar la playa ubicada entre el primer espolón y éste.

Finalmente, 300 m al sur de la desembocadura del río Los Córdoba, se localiza el tercer espolón que fue construido hace 2 años con bloques de arenisca, presentando una longitud de 50 m. En el costado NE hay acumulación de arena de unos 20 m, mientras que en el SW de la estructura aparece erosión dejando un ancho de playa de 3 m y erosión en el acantilado.



Figura 3.18. Obras de protección costera en Los Córdoba

Zona 5 – Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires

Al norte de punta Brava, en el sector de San Miguel, se encuentran un par de estructuras transversales muy deterioradas. Estos espolones tienen una longitud media de 15 m y están compuestos por escolleras de diferentes tamaños, las cuales han sido desplazadas por la acción del oleaje, dejando las estructuras en un alto grado de destrucción.



Figura 3.19. Obras de protección costera en San Miguel – sector de Punta Brava

Siguiendo al norte, hacia la desembocadura del río Canalete, se localizan otros dos espolones de pequeña proporción, aunque mejor conservados que los anteriores, pero que igualmente no prestan ninguna función como obra de protección, debido a su carácter aislado y dimensiones.

La población de Puerto Escondido ha sido muy afectada por los procesos erosivos de la región, por lo que en el año 1995 se presentó un estudio elaborado por el Laboratorio Hidráulico de Las Flores titulado: “Obras de protección costera y muelle para embarcaciones menores – Puerto Escondido (Córdoba)”, con la finalidad de analizar y diseñar las obras requeridas para controlar los procesos de erosión costera y los prediseños correspondientes al muelle para embarcaciones menores. En este estudio se presentan diferentes alternativas de enfrentar el problema, pero finalmente se “recomienda utilizar rompeolas no sumergidos paralelos a la línea de costa como alternativa de protección contra la erosión. Como complemento a estas estructuras se recomienda reconformar y estabilizar los puntos duros”¹.

¹ Laboratorio de ensayos hidráulicos de las Flores, Obras de protección costera y muelle para embarcaciones menores, Puerto Escondido – Córdoba. Barranquilla, Diciembre de 1995.

Para la protección de los puntos duros, o salientes rocosos de la zona, se recomendó la utilización de un revestimiento del talud mediante una coraza en roca, con tamaños entre 0.5 m (400 kg) y 0.9 m (1900 kg), para los que finalmente se utilizaron escolleras de 1193 kg. Las puntas donde se realizaron estas obras son: Puerto Viejo (180 m), Punta Cangrejo (160 m), Punta Iguana (70 m) y Punta Candela (70 m).

Igualmente se construyeron siete (7) de los nueve (9) rompeolas proyectados, separados de la costa a una distancia de 75 m y a una profundidad de 1.5 m. La ubicación y características de estas estructuras se definen a continuación:

El primero de ellos entre Punta Piedra y Punta Puerto Viejo, con una longitud de 60 m y un ancho en coronación de 2.7 m.



Figura 3.20. Obras de protección costera entre Punta Piedra y Punta Puerto Viejo

Dos rompeolas ubicados entre Punta Puerto Viejo y Punta Cangrejo, con una longitud de 60 m y un ancho en coronación de 2.7 m cada uno.



Figura 3.21. Obras de protección costera entre Punta Puerto Viejo y Punta Cangrejo

Cuatro rompeolas ubicados entre Punta Iguana y Punta Candela, con una longitud de 45 m y un ancho en coronación de 2.7 m cada uno.



Figura 3.22. Obras de protección costera entre Punta Iguana y Punta Candela

Para la conformación del núcleo se utilizó ripio de cantera con un peso medio de $W_{50} = 2.5$ kg, y para el manto principal escolleras de 354 kg de peso medio. Cabe resaltar que el oleaje de diseño, según el estudio del Laboratorio de Las Flores, está caracterizado por una altura de ola significativa de 1.0 m, pero no se presentan los regímenes extremos de los que fue inferido tal oleaje, ni se hace referencia al periodo de retorno o a la vida útil con la que fue diseñada la estructura.



Figura 3.23. Obras de protección costera en Puerto Escondido

En la primera playa intervenida con estructuras, entre Punta Piedra y Punta Puerto Viejo, se ha propiciado la formación de un semitómbolo de 50 m frente a la estructura y 10 m en las zonas más expuestas. La segunda playa en la que se ha intervenido en Puerto Escondido tiene dos rompeolas donde justo detrás de las estructuras se ha recuperado la

playa formando un sistema de semitómbolos de unos 40 a 45 m de ancho aproximadamente. Igualmente entre Punta Iguana y Punta Candela, donde se han ubicado los restantes cuatro rompeolas exentos, se han formado los respectivos semitómbolos, algunos con más cantidad de material que otros.

Cabe anotar que la particularidad de todas las intervenciones duras en Puerto Escondido es que no se ha realizado ningún tipo de regeneración, por tanto el avance de la línea de costa ha sido mucho más lento, y con el inconveniente de la desestabilización del sistema, ya que hasta el momento en que no se terminen de formar los tómbolos asociados a estas estructuras y alcancen su equilibrio, el sistema retendrá todos los sedimentos que pasen por la zona para alimentar las playas, con el consecuente incremento de los procesos erosivos aguas abajo de las mismas.



Figura 3.24. Obras de protección costera en Puerto Escondido – Tómbolos

Zona 6 – Entre Punta Buenos Aires y Boca Manjle

En esta zona se localizan 6 estructuras de protección costera. Las primeras cuatro se encuentran distribuidas desde Punta Buenos Aires hasta Boca El Prieto, en donde la erosión de los acantilados es muy intensa y se pueden observar numerosos remanentes de dichos acantilados a pocos metros de la actual línea de costa. La funcionalidad de estas estructuras es muy reducida, ya que la intensidad de los procesos, unida al desequilibrio sedimentario del sistema, imposibilitan cualquier recuperación de la línea de costa mediante la implementación de este tipo de estructuras aisladas.

Más al norte, en las playas de la población de Cristo Rey, se han construido dos espolones, de aproximadamente 30 m de longitud, que no han conseguido resultados significativos en cuanto a la recuperación de la línea de costa.



Figura 3.25. Obras de protección costera entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle

Zona 7 – Entre Boca Mangle y Punta Broqueles

Se han construido un total de seis (6) estructuras de protección, ubicadas entre Punta Broqueles y Punta El Medio. Se trata de 5 espolones de 30 m de longitud media y uno de 60 m ubicado justo en la punta. Todos ellos han sido construidos en los últimos dos años, con escolleras de una cantera de la zona. En general el avance de la línea de costa conseguido por estas estructuras es nulo, a diferencia del último y más grande de todos, que ha logrado acumular una gran cantidad de material a NE de la estructura, formando una playa en forma de cuña de 40 m de ancho y 110 m de largo.



Figura 3.26. Obras de protección costera entre Punta Broqueles y Punta El Medio



Figura 3.27. Obras de protección costera en Punta El Medio

Zona 8 – Entre Punta Broqueles y Punta la Rada

Como ya se ha dicho, esta zona es una de las menos atacadas por la erosión, caracterizándose por playas largas y anchas. Únicamente en la población de La Rada, los procesos erosivos unidos a la construcción indiscriminada en zonas de dominio público marítimo-terrestre, han finalizado en la destrucción de algunas viviendas que se encontraban muy próximas al mar. Los habitantes del lugar intentaron detener sin ningún éxito el avance de la línea de costa, mediante la construcción de pequeñas obras de defensa, así como la implementación de bolsacretos y costales de arena.

Zona 9 – Entre Punta la Rada y el Delta del río Sinú

Como se describió en el apartado anterior, entre punta Manzanillo y Punta de Piedra se presenta una zona de erosión intensa, ocasionando la erosión de los acantilados. En esta zona se han construido 4 espolones de aproximadamente 40 m de longitud, pero no se ha logrado recuperación alguna de la línea de costa. Igualmente en cercanías del caño el Coco se han construido otras dos estructuras que, a diferencia de las anteriores, han contribuido al incremento del ancho de la playa en la zona, aunque muy localmente; en algunos puntos, el ancho de playa alcanza unos 50 m.



Figura 3.28. Vestigios del intenso proceso de erosión en Punta La Rada



Figura 3.29. Obras de protección costera entre punta Manzanillo y punta de Piedra

3.2.2 Extracción intensiva de materiales

Otro aspecto importante que se debe considerar dentro de las actuaciones antrópicas en la región, es la extracción intensiva de materiales de playa. Esta actividad según relatan los habitantes de la zona, se viene llevando a cabo durante las últimas cuatro décadas, siendo un factor muy importante al momento de evaluar las tasas de erosión en todo el litoral.

Las playas que se forman en las desembocaduras por los aportes de los ríos, se han convertido en lugares muy atractivos para la extracción de arenas a lo largo de toda la zona de estudio. Es el caso de la playa que se forma por los aportes del río Jobo, que al SW de la desembocadura tiene aproximadamente 40 m de ancho. Esta se ha convertido en un lugar atractivo para la extracción de arenas. Los habitantes afirman que trabajan de manera continua (la mayor parte del año si hay suficiente material para extraer) sacando todo tipo de material (arena, “china”, etc.), donde son llenadas entre 4 y 5 volquetas de 4 a 5 m³ diariamente. Haciendo un cálculo aproximado, y suponiendo que sólo trabajan 200 días al año, da un orden de magnitud de 5000 m³ anuales de material extraído en este punto, que si lo multiplicamos por todos los puntos donde se extraen arenas a lo largo de la zona de estudio, representa un volumen importante de pérdidas de material del sistema.



Figura 3.30. Extracción intensiva de materiales de playa en la playa del río Jobo

Por otra parte, en el río Canaletes se extraen grandes cantidades de arena de manera continua con el fin de cubrir la demanda generada por las edificaciones que se están construyendo en el sector. El orden de magnitud es similar a las extracciones comentadas anteriormente (entre Arboletes y Punta La Tina), 5000 m³. Lo mismo viene sucediendo y de manera continuada en Puerto Escondido y Punta Buenos Aires, donde se pudo

constatar de manera directa las labores de extracción de arena de las playas o de las áreas de desembocaduras fluviales adyacentes.



Figura 3.31. Extracción intensiva de materiales de playa en el río Canaletes

Igualmente se pudo constatar, en la visita de campo, la existencia de una pequeña fábrica para construir bloques con arenas aportadas por el río El Medio, en cercanías del río Broqueles, poniendo de manifiesto una vez más la problemática socioeconómica ligada al fenómeno de erosión de la zona, ya que los sedimentos que se extraen del río forman parte del balance sedimentario del sistema dinámico de la zona de estudio.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS

Hasta este apartado se ha mostrado un análisis exhaustivo de las causas de la amenaza natural y antrópica que ha sufrido la zona de estudio en cuanto al retroceso de la línea de costa. La conclusión general es que en todo el tramo costero entre Punta Caribana y el Delta de Tinajones hay un desequilibrio sedimentario cuya consecuencia es una erosión generalizada de toda la zona, exceptuando sitios muy puntuales.

Para intentar solucionar el problema, sería necesario plantear alternativas de solución a lo largo de toda esta franja litoral. Con el ánimo de determinar los sitios donde se plantearán las alternativas de solución de mayor prioridad, se ha hecho un análisis de riesgo que tiene en cuenta tanto la amenaza natural como la vulnerabilidad de la población. Este análisis se ha llevado a cabo en términos de la erosión de la línea de costa y la población en las cabeceras municipales.

En términos de la amenaza, ya se ha venido mencionando a lo largo del informe que las mayores tasas de erosión se observan entre Arboletes y Puerto Escondido. También se ha mencionado en el apartado sobre el análisis de las intervenciones históricas que esta última población ya cuenta con obras que han sido diseñadas y construidas desde hace un par de años.

Por otra parte, y tal como se muestra en la siguiente figura, hay poblaciones como San Juan de Urabá y Moñitos con una gran cantidad de población que podría verse afectada por la erosión de sus playas. No obstante, en estas poblaciones se aprecian tasas de retroceso bajas o medias. Otras poblaciones como Los Córdoba, por el contrario, muestran tasas de erosión muy altas pero la concentración de población es muy baja.

En ese sentido, se ha determinado que la zona entre Punta Rey y Arboletes es el tramo de costa que mayor riesgo tiene (considerando las amenazas naturales y la vulnerabilidad de la población) y, por ende, las soluciones que primero se planteen deberán estar enfocadas en las poblaciones que allí se encuentra.

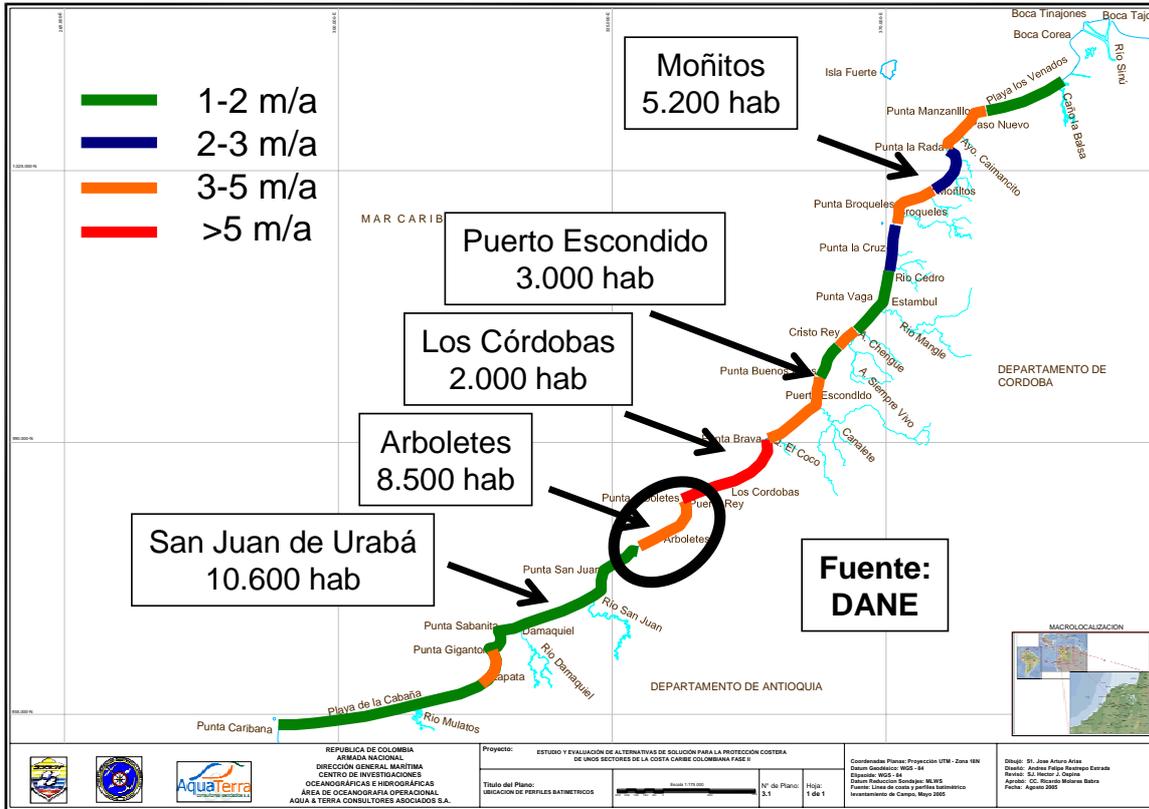


Figura 3.32. Resultados del análisis de riesgo

CAPITULO 4

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA



4. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

En este capítulo se efectúa un análisis del clima marítimo existente en las inmediaciones de la zona de estudio y la hidrodinámica asociada, desde el Delta de Tinajones (río Sinú) hasta Punta Caribana. Más específicamente, se estudian aquellos fenómenos que gobiernan la dinámica marina en este tramo de costa, tales como la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, los sistemas de corrientes circulatorias debidas a la rotura del oleaje y por último, las descargas fluviales en la zona de estudio.

4.1. NIVEL DEL MAR

La información del régimen de niveles del mar es muy importante en aquellas zonas costeras donde las alturas de ola máxima puedan quedar limitadas por la profundidad del agua (calado), tal como ocurre en el litoral estudiado. Entonces, es necesario estimar el régimen de nivel del mar para poder propagar la base de datos de oleaje teniendo en cuenta este aspecto. A continuación se hace un análisis de esta variable.

4.1.1 Base de datos

La información necesaria para la obtención del régimen del nivel de marea se ha obtenido de registros del IDEAM en Cartagena de Indias, de donde se tienen datos horarios desde 1951 hasta 1993, año en el que se cambió de instrumento. La localización de este punto se muestra en la figura Figura 4.1.

4.1.2 Régimen medio de nivel del mar

El régimen de nivel de marea se construye a partir de la base de datos de nivel del mar en Cartagena de Indias. Si bien este sitio no se encuentra dentro de la zona de estudio, la variación espacial de las ondas largas (marea astronómica y marea meteorológica) no es relevante en litorales abiertos como el que se está analizando. Por lo tanto, para este estudio se considera que el nivel del mar entre el Delta de Tinajones y Punta Caribana

puede suponerse similar en magnitud al que se observa y registra en Cartagena de Indias.



Figura 4.1 Localización del mareógrafo de IDEAM en Cartagena de Indias

Con base en esta información y la hipótesis anteriormente aceptada, se tiene la serie de nivel del mar, considerado esta como la suma entre la marea astronómica y la marea meteorológica en un punto determinado; ambas variables son registradas por el mareógrafo analizado. El régimen de nivel medio del mar, entonces, se puede construir ordenando la serie de nivel del mar de menor a mayor y asignando a cada dato una probabilidad $P = i/(n+1)$, donde P es la probabilidad de no-excedencia, i el número de orden del dato, y n el número total de datos analizados. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.2.

Como puede observarse, el nivel del mar no es una variable relevante en la zona de estudio. Los valores máximos, con respecto al nivel medio del mar, no superan los 0.4 m de amplitud.

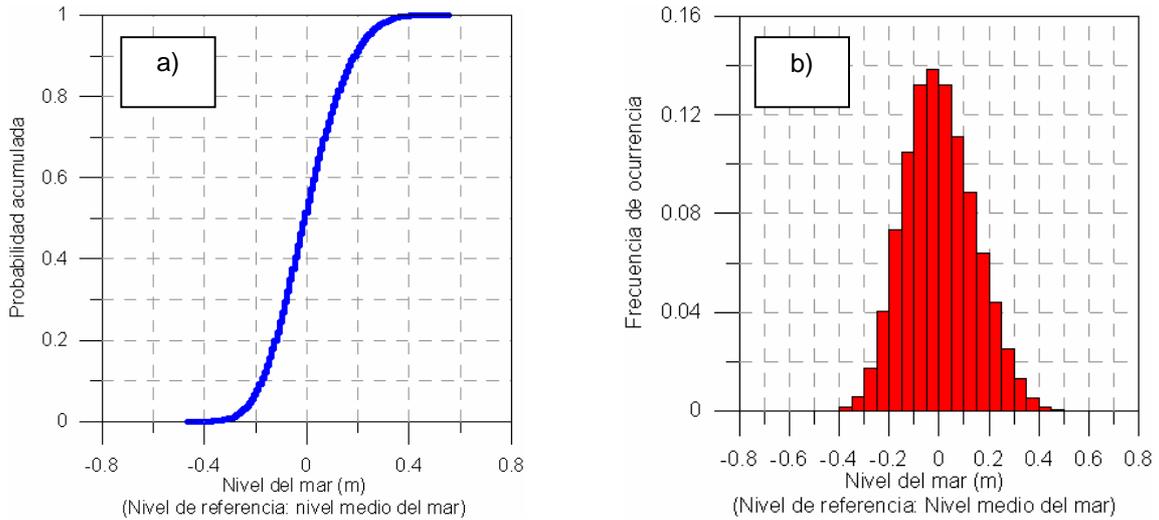


Figura 4.2 Régimen medio de nivel del mar en Cartagena de Indias
a) Función de distribución y b) función de densidad

Sí es de destacar, en cambio, los resultados que se presentan en la Figura 4.3. En esta gráfica se presenta la variación temporal de los máximos anuales de nivel del mar en Cartagena de Indias. Nótese cómo es de clara la tendencia positiva en el ascenso del nivel máximo del mar (0.005 m/año). Si bien no pueden sacarse conclusiones al respecto con la información que se tiene y con el alcance de este estudio, sí que debe dejarse constancia sobre el fenómeno, pues este comportamiento es tema de debate dentro de la comunidad científica internacional.

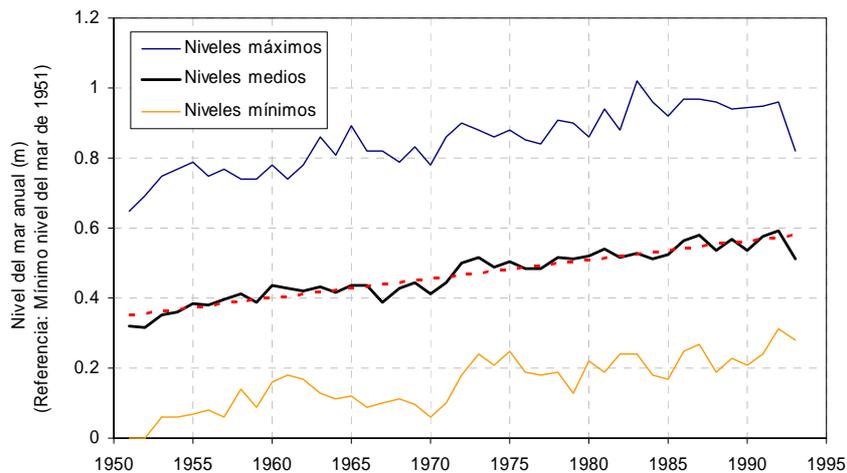


Figura 4.3 Variación temporal de la serie de máximos anuales de nivel del mar

4.2. OLEAJE EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

En el presente apartado se analizan con detalle las distintas funciones de distribución del oleaje, tanto extremal como medio anual. Partiendo de las diferentes fuentes de datos de oleaje en la zona de estudio, se presentan primero los regímenes de oleaje en profundidades indefinidas y luego los regímenes de oleaje propagados a las inmediaciones de la zona de estudio. Finalmente, se efectúa un análisis de los sistemas circulatorios de corrientes producidas por el oleaje. A lo largo del capítulo se incluye una descripción detallada del procedimiento seguido para la construcción de dichos regímenes y al final se describen los modelos numéricos empleados en la propagación del oleaje.

4.2.1 Fuentes de datos

Las fuentes de información directa sobre oleaje disponibles en el área de estudio proceden de dos fuentes distintas: Datos visuales aportados por barcos en ruta y datos registrados por boyas instrumentales en el mar Caribe. Debido a la poca fiabilidad de estos datos para el análisis de oleaje extremal, producido por el paso de tormentas tropicales sobre el mar Caribe, ha sido necesario también considerar fuentes indirectas para la generación sintética de dichos datos: registros de velocidad del viento y presión atmosférica en algunos puntos del mar Caribe. A continuación se describen brevemente las características de cada una de estas fuentes de datos.

Oleaje visual de barcos en ruta

Los datos de oleaje visual son tomados por observadores entrenados desde los barcos del tráfico marítimo comercial. Esta información es enviada por radio a centros internacionales que se encargan de su recopilación, almacenamiento y distribución. Parte de la información recogida por los observadores proviene de datos instrumentales: Velocidad del viento, presión atmosférica, posición del barco, fecha y hora. Sin embargo, la información recogida sobre el oleaje se realiza por estimación visual y depende del entrenamiento del observador. Por tal motivo, los datos visuales son utilizados en el caso de no disponer de otras fuentes.

Los datos visuales de barcos en ruta que se han utilizados fueron facilitados por el British Meteorological Office y corresponden a la información que se tiene del mar Caribe entre 1963- 1997 (Figura 4.4). Estos datos han sido corregidos y calibrados, ya que los datos visuales tienen una componente subjetiva asociada a la capacidad de discriminación y experiencia de los observadores. Diversos trabajos existentes en el estado del arte permiten corregir estos datos y traducir las visualizaciones subjetivas a datos asimilables a medidas instrumentales objetivas; sin embargo, dadas las características particulares de la zona de estudio, se procedió a calibrar esta información con datos instrumentales, tal como se describe en el apartado siguiente. Con este procedimiento se logra traducir la altura de ola visual a altura de ola significativa y el período visual a período de pico del estado de mar.

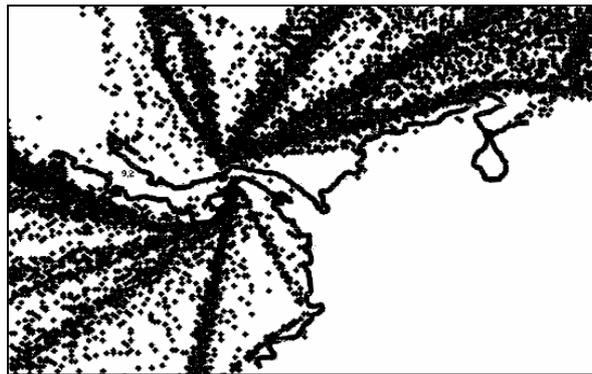


Figura 4.4 Localización de los datos visuales de oleaje en aguas jurisdiccionales de Colombia

Datos instrumentales

Los datos instrumentales se obtienen mediante boyas dotadas de acelerómetros. Las boyas utilizan una función de transferencia (que depende del calibrado de la boya) para transformar la lectura del acelerómetro en desplazamiento vertical de la superficie libre. Estos datos de superficie libre son transmitidos a una central de recolección de datos que los procesa y almacena. De esta manera se convierten en instrumentos que registran en tiempo real las variables necesarias para caracterizar cada estado de mar.

La información procesada corresponde ya a parámetros de cada estado de mar; normalmente se asume que un estado de mar tiene entre una y tres horas de duración.

Como resultado del análisis a corto plazo, se almacenan los momentos espectrales y varios parámetros estadísticos basados en los citados momentos (m_n , H_{m0} , H_{max} , $H_{1/n}$, T_z , T_p , etc). Si la boya es direccional, se suele indicar además la dirección de la frecuencia de pico, θ_p y la dirección media de propagación, θ_m .

En la actualidad, Colombia no cuenta con un programa de medición de datos de oleaje, por lo que cualquier análisis que se quiera hacer debe incluir datos de otras instituciones. En particular, la “National Oceanographic and Atmospheric Agency” de Estados Unidos, NOAA, cuenta con los datos de la boya 41018 que durante tres años (1994-1996) registró condiciones meteorológicas y de oleaje frente a la costa Caribe colombiana, en el punto con coordenadas $15^{\circ}N$, $75^{\circ}W$. La posición dicho instrumento puede verse en la Figura 4.5.



Figura 4.5 Localización de la boya NOAA 41018

La gran ventaja de los datos instrumentales es la calidad y fiabilidad de la información de oleaje que facilitan. Por esta razón y debido a que es una boya escalar, estos registros se utilizan para la calibración escalar de los datos de oleaje visual.

Velocidad del viento y presión atmosférica

Se ha consultado información correspondiente a cada una de las depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes que se han presentado en el Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México desde el año de 1921. Esta información se ha obtenido del National Hurricane Center de la NOAA. Los reportes que esta oficina hace de cada evento contienen la historia sinóptica, las estadísticas meteorológicas y un análisis de la mejor trayectoria. Los datos de la trayectoria, registrados cada 6 horas por imágenes de

satélite, incluyen la posición geográfica, la presión atmosférica y la velocidad del viento en el ojo de la tormenta. A manera de ejemplo, la Figura 4.6 muestra las trayectorias de las tormentas tropicales del Atlántico durante el año 1998.

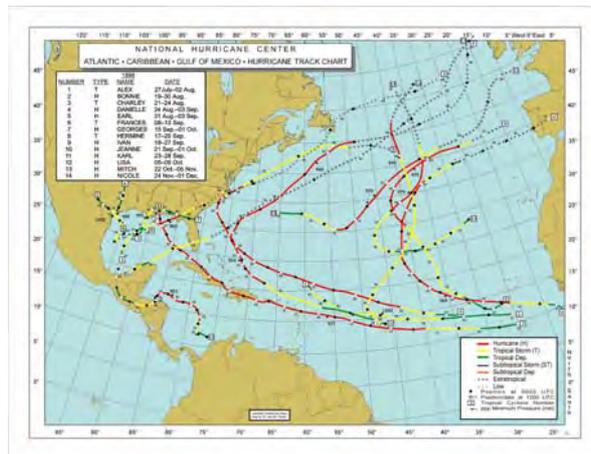


Figura 4.6 Trayectoria de las tormentas tropicales del Atlántico durante 1998

Fuente: NOAA

Los valores de velocidad del viento y presión atmosférica registrados por los satélites tienen asociado un error que depende de variables meteorológicas y astronómicas. Es por este motivo que se hace necesario corregirlos con datos medidos por instrumentos especializados, en este caso, boyas.

4.2.2 Calibración de oleaje visual

La ausencia de medidas específicas de oleaje en las inmediaciones de la zona de estudio obliga a la utilización de datos de oleaje visual, que como ya se comentó en el apartado anterior, tienen algunas carencias que deben ser corregidas mediante un proceso de calibración con datos instrumentales de una zona cercana.

Para ello se ha utilizado los datos registrados por la boya NOAA 41018 y los datos de oleaje visual de barcos en ruta tomados en un radio de 110 km a la redonda del punto de localización de dicho instrumento. La calibración consiste en la determinación, para el régimen escalar, de un polinomio de ajuste entre el conjunto de cuantiles $\{[1:1:99] U$

[99:0.1:99.9] U [99.9:0.01:99.99]} de cada una de dichas series de datos, lo que garantiza una comparación directa entre parejas de datos con la misma probabilidad de no-excedencia. Los parámetros de la calibración se suponen invariables espacial y temporalmente para poder aplicarlo a los datos de oleaje visual cercanos a la zona de estudio. Esta hipótesis es lo suficientemente válida dado que los puntos se encuentran en profundidades indefinidas.

Los datos de altura de ola significativa, H_s , y de período de pico, T_p , se ajustaron, ambos, a polinomios de orden 4. Los resultados se presentan, respectivamente H_s y T_p , en la Figura 4.7 y la Figura 4.8. Los valores medios de altura de ola significativa (entre 1.0 y 3.0 m), son aproximadamente bien estimados por los observadores visuales, mientras que los máximos (mayores que 3.0 m), parecen ser muy sobrevalorados (en algunos casos se ha estimado hasta el doble de la altura de ola real). En términos generales, los períodos visuales se ajustan bien para todo el rango de valores, aunque también muestran una ligera sobrevaloración que ya ha sido corregida con el polinomio de calibración.

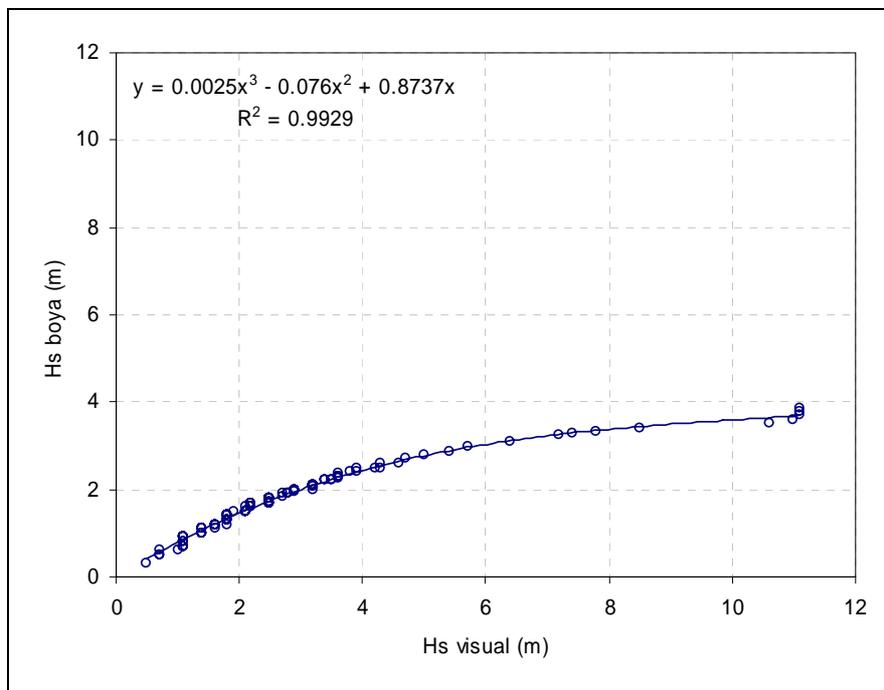


Figura 4.7 Ajustes de calibración de H_s visual

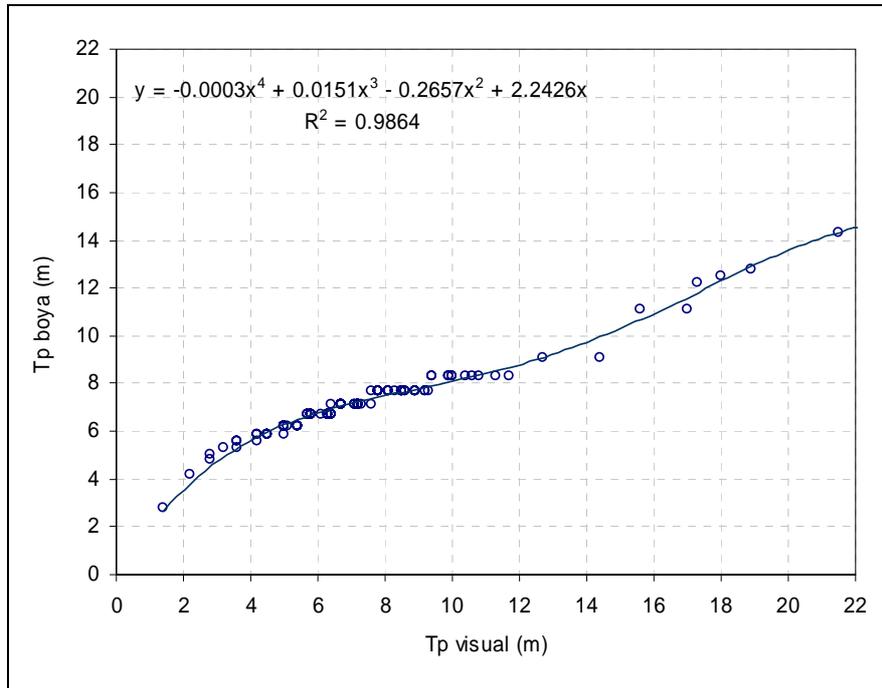


Figura 4.8 Ajustes de calibración de T_p visual

4.2.3 Generación y validación de oleaje extremal

Generación y validación de datos de Hs

Por definición, los datos de oleaje visual pueden considerarse fiables, después del proceso de calibración, para la construcción de los regímenes medios de oleaje. Debido a que generalmente los barcos no zarpan o suelen cambiar de ruta cuando hay temporales, el oleaje extremal no queda bien caracterizado con esta fuente de datos, por lo que es necesario utilizar métodos indirectos para la generación sintética de dichos oleajes.

Si bien durante el trimestre DEF el oleaje en la zona de estudio también puede considerarse de temporal, en términos generales, el oleaje extremal (entendido éste como el régimen construido a partir de la serie conformada por las máximas alturas de ola significativa de cada año) en el mar Caribe es producido por el paso de huracanes y tormentas tropicales. Estos fenómenos atmosféricos se suelen caracterizar por dos variables: velocidad del viento y presión atmosférica.

Por lo tanto, si se realiza un tratamiento estadístico de estas variables es posible estimar, a partir de modelos paramétricos presentados en la literatura científica, la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , producida por esas tormentas tropicales (Cooper, 1998; Young, 1988 y 1996). En el presente estudio se ha seguido el modelo de Young (1988) para obtener H_s y T_p y las aproximaciones realizadas por Komar et al. (2003).

Si seguimos el modelo paramétrico de USACE (1984) para una tormenta tropical moviéndose lentamente, las siguientes ecuaciones pueden ser usadas para obtener la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , en profundidades indefinidas:

$$H_s = 5.03 e^{\frac{R\Delta P}{4700}} \left(1 + \frac{0.29 \alpha V_{fm}}{\sqrt{U_R}} \right) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$T_p = 8.6 e^{\frac{R\Delta P}{9400}} \left(1 + \frac{0.145 \alpha V_{fm}}{\sqrt{U_R}} \right) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

donde $\Delta P = P_n - P_o$, diferencia de presión atmosférica entre el ojo y el límite exterior de la tormenta tropical, V_{fm} la velocidad de movimiento de la tormenta, R el radio de viento máximo de la tormenta, U_R la máxima velocidad del viento para una tormenta tropical en movimiento.

Como se aprecia en todas estas formulaciones, H_s y T_p están directamente relacionados con la velocidad del viento de la tormenta, V_{max} , y con la presión atmosférica, Pa . Por otra parte, estas dos variables también están relacionadas de manera inversa, tal como se muestra en la Figura 4.9 para los datos del huracán Mitch. Por tanto, si existe una relación entre V_{max} y Pa , α , es estadísticamente posible encontrar una formulación de H_s y T_p que dependa de una de las dos variables únicamente. A esta conclusión llegaron, por separado, Ochi (1998), Hsu et al. (2000) y Kumar et al. (2003). El primero encontró para las tormentas tropicales que llegaban a Estados Unidos una relación $H_s = 0.24 V_{max}$ (Ec. 4.3). Hsu et al. (2000) derivaron dos formulaciones a partir del modelo de Young (1988), una para cada variable de interés, que dependía de las características observadas en el Atlántico durante el huracán Georges de 1998. Los últimos encontraron, para ciclones de

la India, que $H_s = 0.25 V_{\max}$, muy parecida a la hallada por Ochi (1998), y $T_p = 4.5 H_s^{0.48}$ (Ec. 4.4 y 4.5) a partir de regresiones múltiples con datos de mayo de 1961 a noviembre de 1982.

Debido a que la información con la que se cuenta para este estudio se compone de V_{\max} y Pa para cada tormenta, es posible, entonces, encontrar una relación similar a la de Kumar et al. (2003) para las condiciones de El Caribe colombiano, apoyándonos en los datos de agosto a diciembre de 1994 registrados por la boya NOAA 41018.

Las trayectorias de las tormentas de 1994 se muestran en la Figura 4.10. La Figura 4.11 presenta las series de tiempo de H_s y V_{\max} en el sitio de localización de dicho instrumento. Se han resaltado los períodos de tiempo de interés en este apartado. Obsérvese que entre el 12 y 14 de agosto se aprecia una H_s máxima de 3.4 m y V_{\max} de 11.7 m/s, coincidentes con el paso de la tormenta tropical Beryl por el Golfo de México en su trayectoria hacia el sur de Estados Unidos. El huracán Chris, aún siguiendo un recorrido por el atlántico, generó entre el 26 y 27 de agosto vientos de 12.6 m/s de velocidad y un oleaje de 3.5 m en El Caribe; su influencia en el oleaje de la boya se aprecia hasta el último día de agosto.

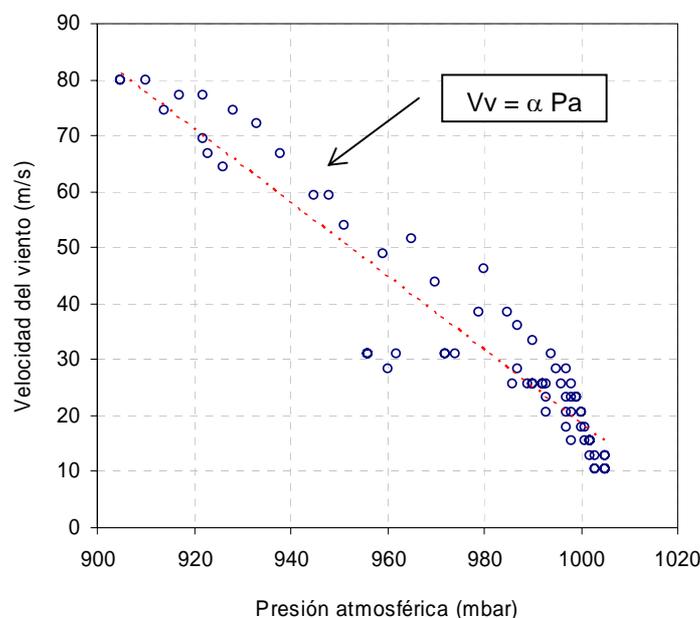


Figura 4.9 Pa vs. V_{\max} para la trayectoria del huracán Mitch (22/10/98 – 09/11/98)

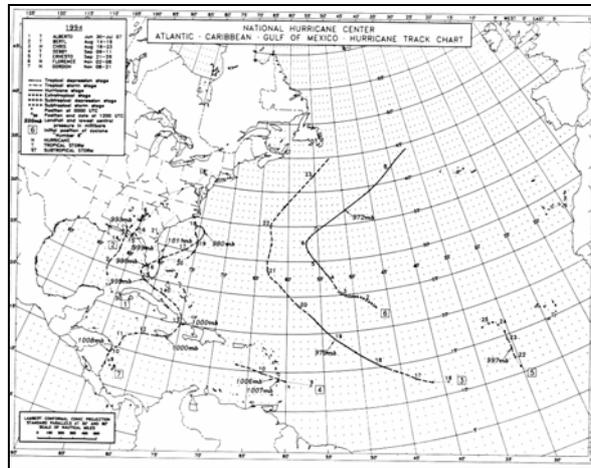


Figura 4.10 Trayectoria de las tormentas tropicales del Atlántico durante 1994

Fuente: NOAA

Aún cuando la tormenta tropical Debby no llegó sino hasta las costas de Venezuela, el instrumento analizado registró alturas de ola significativa de 3.7 m y velocidades del viento similares a las registradas por Chris. La causa de que este evento haya generado H_s mayores con vientos de menor intensidad que los demás episodios se explica por la mayor longitud del fetch que hay entre las Antillas Menores y Jamaica. La tormenta tropical Ernesto y el huracán Gordon registraron, respectivamente, alturas de ola significativa de 3.1 m y 3.4 m con vientos de 11.3 m/s y 12.2 m/s de velocidad.

Con los datos de H_s y V_{max} de estos eventos es posible plantear, entonces, la relación $H_s = \alpha V_{max}$ para los datos de El Caribe colombiano. Utilizando todos los valores de altura de ola significativa mayores que 2.5 m y la velocidad del viento asociada en la boya NOAA 41018, se puede obtener el histograma de frecuencias de α que se presenta en la Figura 4.12. Esta figura permite concluir que los valores más probables de se encuentran entre 0.20 y 0.35, siendo más probable encontrar valores entre 0.25 y 0.30.

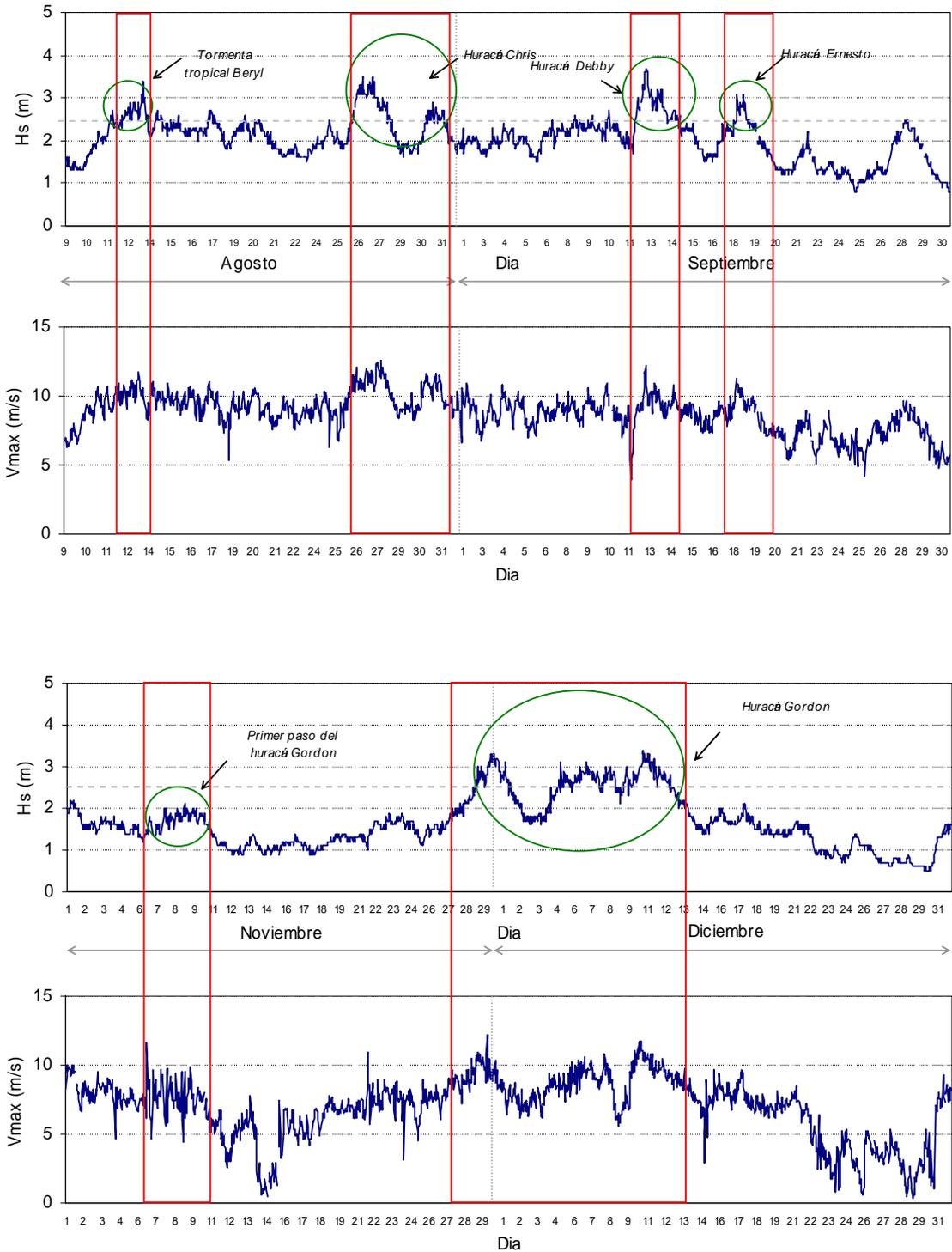


Figura 4.11 Registros de H_s y V_{max} entre agosto y diciembre de 1994 en la boya NOAA 41018

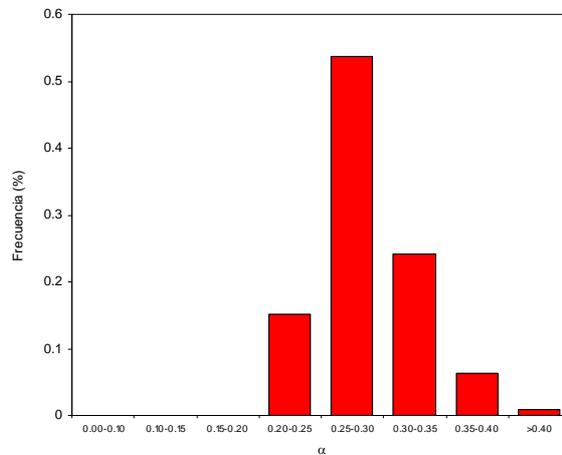


Figura 4.12 Histograma de α de las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018

Con el objeto de dar más confiabilidad a las expresiones encontradas, se han analizado los reportes escritos de diferentes tormentas tropicales en el mar Caribe y en el Golfo de México. Dichos reportes contienen datos de H_s y V_{max} en boyas de la NOAA y registros de barcos que en un momento determinado se encontraban cerca de la trayectoria. Se han descartado aquellos datos de barcos en ruta que se encontraban lejos de la tormenta. En la tabla 4.1 se presentan los datos utilizados y un cálculo de α para cada uno de ellos. Obsérvese que α es, en todos los casos, del orden de 0.20-0.40, en clara concordancia con los datos de la boya NOAA 41018; el valor medio es de 0.28.

Por otra parte, sabemos que estas relaciones han sido planteadas considerando datos registrados por instrumentos que se localizan en la superficie del mar. No obstante, los datos con los que contamos para construir los regímenes de oleaje de temporal son observaciones hechas desde satélite, a partir de las cuales se extrae y procesa la información de velocidad del viento y presión atmosférica. Esta extracción y procesamiento de datos tiene asociado un error, tal como puede concluirse de los reportes de la NOAA sobre cada evento, en los que muestran la evolución de la velocidad del viento en el ojo de la tormenta, V_v . Nótese, por ejemplo, la variabilidad de datos registrados durante la trayectoria del huracán Gordon, observado entre noviembre y diciembre de 1994 (Figura 4.13). Esto quiere decir que puede haber una diferencia entre la velocidad del viento estimada a partir de las observaciones de satélite, V_v , y la velocidad del viento registrada en una boya, V_{max} . Con los datos de esta última se han

obtenido las relaciones entre H_s y V_{max} . Es necesario, entonces, hacer una corrección adicional a las expresiones encontradas asociada a las diferencias entre los valores de ambos sistemas de medición, satélite y boya. Con los datos de 1994 registrados en la boya NOAA 41018 se ha obtenido dicho coeficiente de corrección, β . La Figura 4.14 presenta los resultados. Nótese que β se encuentra entre 3 y 5, siendo el valor más probable 3.5.

Tabla 4.1 Cálculo de α para diferentes datos reportados por la NOAA

Año	Evento	Fecha del evento	Hs (m)	Vmax (m/s)	Tipo de observación	Fecha de las observaciones	Sitio de estimación o registro	α
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	7.83	26.24	Registro de la boya NOAA 42003	26/06/1998	25.9N, 89.9W (Golfo de México)	0.30
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	7.50	22.12	Registro de la boya NOAA 42039	27/06/1998	28.8N, 86.0W (Golfo de México)	0.34
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	5.80	17.49	Registro de la boya NOAA 42036	27/06/1998	28.5N, 84.5W (Golfo de México)	0.33
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	11.90	27.78	Registro de la boya NOAA 42040	27/06/1998	29.2N, 88.3W (Golfo de México)	0.43
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	5.33	22.64	Registro de la boya NOAA 42007	28/06/1998	30.1N, 88.8W (Golfo de México)	0.24
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	4.37	19.55	Estimaciones del barco WFLG	22/09/1998	19.5N, 66.4W	0.22
1998	Georges	15/09/1998-01/10/1998	3.27	18.01	Estimaciones del barco DHPK	23/09/1998	23.3N, 71.9W	0.18
1998	Mitch	22/10/1998-05/11/1998	4.87	19.03	Registro de la boya NOAA 42003	05/11/1998	25.9N, 85.9W (Golfo de México)	0.26
1998	Mitch	22/10/1998-05/11/1998	4.57	19.03	Registro de la boya NOAA 41010	05/11/1998	28.9N, 78.5W (Golfo de México)	0.24
1999	Cindy	19/08/1999-31/08/1999	4.33	19.03	Estimaciones del barco ZCBB9	26/08/1999	26.5N, 47.0W	0.23
1999	Cindy	19/08/1999-31/08/1999	5.33	18.52	Estimaciones del barco ELUU6	26/08/1999	26.5N, 51.8W	0.29
1999	Cindy	19/08/1999-31/08/1999	5.33	19.55	Estimaciones del barco ELUU6	26/08/1999	26.8N, 51.7W	0.27
1999	Cindy	19/08/1999-31/08/1999	7.67	30.87	Estimaciones del barco ELUU6	26/08/1999	26.9N, 51.4W	0.25
1999	Cindy	19/08/1999-31/08/1999	10.00	31.90	Estimaciones del barco ELUU6	27/08/1999	27.1N, 51.1W	0.31
1999	Cindy	19/08/1999-31/08/1999	5.33	20.58	Estimaciones del barco ELUU6	27/08/1999	27.4N, 49.8W	0.26
1999	Floyd	07/09/1999-17/09/1999	16.67	37.04	Registro de la boya NOAA 41010	15/09/1999	105 mi náuticas al ENE de Cabo Cañaveral	0.45
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	7.67	20.58	Estimaciones del barco WCPU	19/09/1999	25.6N, 86.7W	0.37
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	5.33	20.58	Estimaciones del barco PFFV	20/09/1999	25.3N, 85.8W	0.26
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	5.00	20.58	Estimaciones del barco WCHF	20/09/1999	25.0N, 84.8W	0.24
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	6.00	24.18	Estimaciones del barco WCOB	20/09/1999	25.7N, 85.2W	0.25
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	4.00	20.58	Estimaciones del barco Carnival Cruise Line	20/09/1999	26.2N, 83.6W	0.19
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	3.33	18.01	Estimaciones del barco Carnival Cruise Line	21/09/1999	26.0N, 83.3W	0.19
1999	Harvey	19/09/1999-22/09/1999	5.47	23.15	Estimaciones del barco WCOB	21/09/1999	25.5N, 79.7W	0.24

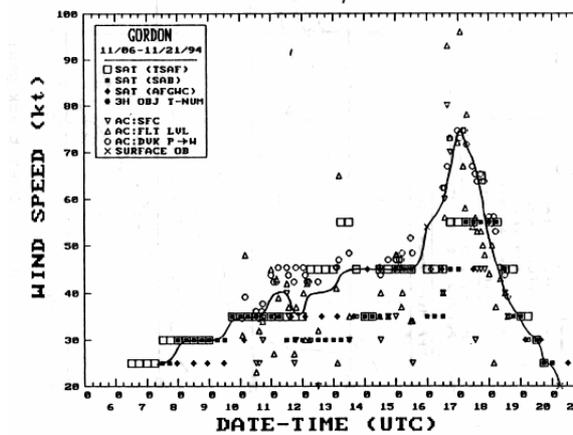


Figura 4.13 Velocidad del viento, V_v , durante el huracán Gordon (nov-dic/94).

Fuente: NOAA. Nota: Los datos de V_v están en nudos

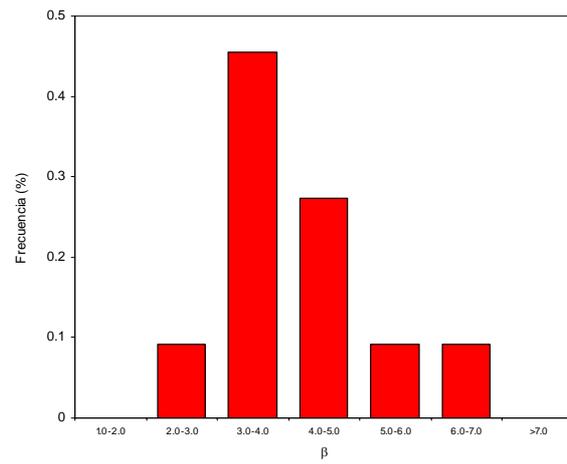


Figura 4.14 Histograma de β de las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018

Generación de datos de T_p

Teóricamente no existe ninguna relación entre la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , de una ola, por cuanto las zonas de generación de cada estado de mar y sus condiciones pueden ser diferentes. Es comúnmente aceptado que cuanto más grande es la ola, más alto es el período, pero siendo estrictos, para relacionar las dos variables, es necesario determinar una función de distribución conjunta H_s-T_p . Sin embargo, dada la génesis del oleaje en el mar Caribe, generados en la misma cuenca que forma con las Antillas, Centro y Suramérica, es posible inferir que los períodos de pico de los oleajes

provocados por tormentas tropicales son del mismo orden de magnitud. Esta hipótesis puede corroborarse mirando los datos de la boya NOAA 41018 entre agosto y diciembre de 1994, época de huracanes de dicho año. Así las cosas, plantear una relación entre H_s y T_p es perfectamente factible. Esta relación puede verse en la Figura 4.15. Como se observa, es una expresión potencial con coeficiente 5.7 y exponente 0.36, muy parecida a la presentada por Kumar et al. (2003).

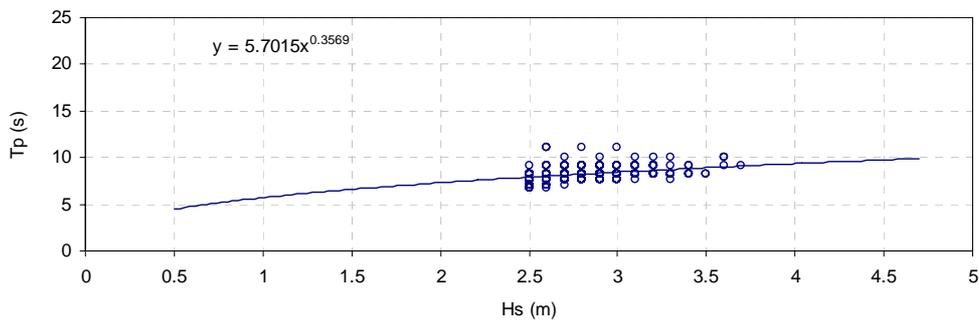


Figura 4.15 H_s vs. T_p durante las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018

Zona de influencia de las tormentas tropicales en el régimen de oleaje extremal

Por último, si bien la influencia de un evento de este tipo en el Caribe colombiano depende de la trayectoria que siga y de R , diferente para cada uno y para cada instante del mismo, se pueden identificar familias de tormentas en función de la trayectoria seguida. Así, por ejemplo, en la Figura 4.6 se pueden diferenciar cuatro familias:

- 1.) Atlántico lejano, generadas en la zona con coordenadas [(10°N, 20°W), (25°N, 40°W)] y cuya trayectoria no supera los 50°W (lo que limita su influencia sobre el oleaje del mar Caribe); son tormentas que rápidamente se convierten en tormentas extratropicales.
- 2.) Atlántico cercano, generadas en la misma zona que las anteriores, pero con una trayectoria que se aproxima mucho al mar Caribe. Muchas de ellas se encuentran con la barrera de islas caribeñas y continúan su trayectoria sobre tierra hasta convertirse en tormentas extratropicales. Algunas alcanzan a llegar a la costa este de Estados Unidos.
- 3.) Golfo de México, generadas en la zona marítima del mismo nombre, su trayectoria corta las lleva hasta la costa sur de Estados Unidos.

4.) Caribe. Se generan en el mar Caribe y se disipan cuando llegan a cualquier zona costera que se encuentran, ya sea Centroamérica, islas caribeñas o el sur de Estados Unidos.

En resumen, el estudio de las tormentas tropicales observadas durante 1994 permite realizar las siguientes conclusiones:

1. La altura de ola significativa es proporcional a la velocidad del viento registrada por satélite durante un huracán. Debe aplicarse una doble corrección. La primera de ellas, α , se debe a la transferencia de energía de la atmósfera (por medio del viento y la presión atmosférica) al océano. La segunda, $1/\beta$, está asociada a los errores en el registro de la velocidad del viento por el satélite.

$$H_s = \frac{\alpha}{\beta} V_{\max} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

donde $\alpha = 0.30$ y $\beta = 4.0$.

2. El período de pico está potencialmente relacionado con la altura de ola significativa. La expresión es:

$$T_p = \delta H_s^\eta \quad (\text{Ec. 4.7})$$

donde $\delta = 5.7$ y $\eta = 0.36$.

3. El régimen de oleaje extremal en el mar Caribe está fuertemente influenciado por las tormentas tropicales desarrolladas en las zonas del Atlántico cercano, Golfo de México y Caribe.

4.2.4 Regímenes de oleaje en profundidades indefinidas

Regímenes medios

a) Metodología

En este apartado se describe la metodología seguida para la obtención de los regímenes medios anuales de oleaje en aguas profundas, definidos como la distribución en el año medio de un parámetro de estado de mar.

Los regímenes medios que se presentan son los escalares de los parámetros del estado de mar altura de ola significativa, H_s , y del período de pico, T_p . Para la obtención de éstos se ha utilizado la base de datos de barcos en ruta (COADS) corregida mediante los mismos polinomios de ajuste encontrados para la boya NOAA 41018. Los datos analizados, en total 60855 datos, corresponden al cuadrante de coordenadas $\{(8N, 74W), (11N, 80W)\}$, una superficie aproximada de 350 x 700 km. Esta base de datos ha sido cribada con el objeto de eliminar datos erróneos y “outliers”. De esta manera, la cantidad de datos con los que se ha trabajado es de 25949, siendo la base de datos de oleaje calibrada más completa que se tiene de la zona de estudio.

A partir de esta misma base de datos se analizó la distribución según las direcciones del oleaje, considerando sectores de $22,5^\circ$. Se puede ver en la rosa de oleaje obtenida, para los datos corregidos de COADS en la zona de estudio (Figura 4.16), que el oleaje reinante en la zona de estudio es el que proviene del NE, con una probabilidad de ocurrencia del 32%. También tienen cierta relevancia los oleajes del ENE, NNE y N, representando cada uno entre un 10% y un 15%. Los demás oleajes, casi todos ellos debidos al viento local, representan el 20% restante.

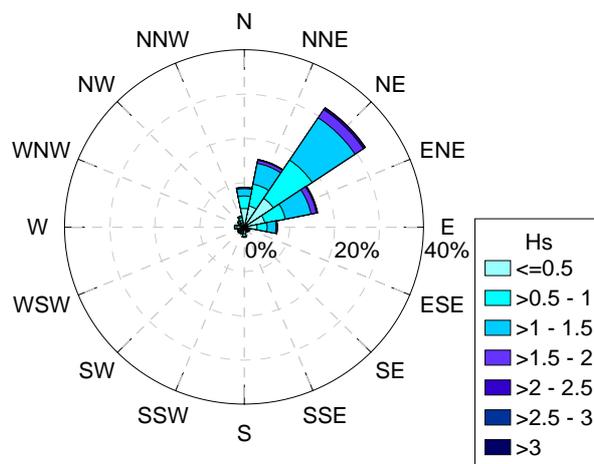


Figura 4.16 Rosa de oleaje medio para la zona de estudio (Sea y Swell)

Los regímenes medios y extremales, escalares y direccionales, de altura de ola significativa y período de pico se ajustaron a una función de distribución Gumbel de máximos, que se expresa mediante la función:

$$F(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right) \quad (\text{Ec. 4.8})$$

b) Régimen medio escalar y direccional de altura de ola significativa

La Figura 4.17 muestra el régimen medio escalar de H_s en la plataforma exterior. Obsérvese que la altura de ola significativa superada el 50% del tiempo es de 1.5 m; los diferentes regímenes se separan más en la parte alta de los ajustes y para una probabilidad de no-excedencia del 99.5%, la altura de ola significativa es de 3.6 m.

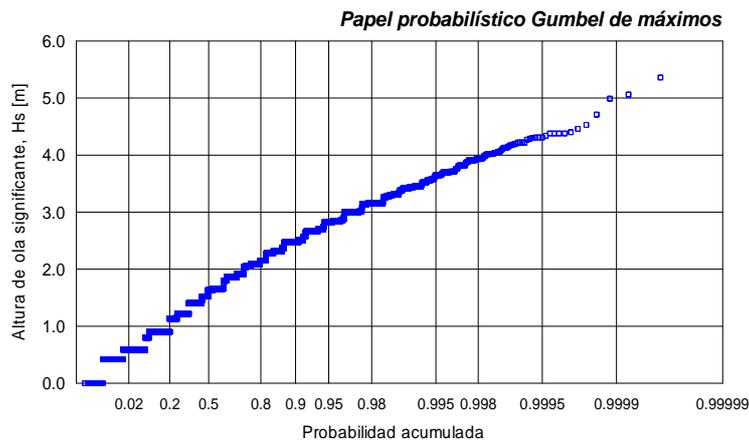


Figura 4.17 Régimen escalar de H_s en profundidades indefinidas

Por otro lado, la Figura 4.18 muestra el régimen direccional de la misma variable. Si bien se ha hecho el análisis cada 22.5° , aquí se presentan los resultados cada 45° dada la similitud entre los regímenes de los diferentes cuadrantes. Nótese, como ya se podía apreciar en la rosa de oleaje, que en profundidades indefinidas los oleajes del NE son más energéticos que los demás. Los regímenes de las direcciones del N, NW, W y SW son muy similares entre ellos. Es claramente visible que hay una diferencia de casi medio metro (0.50 m) entre la altura de ola significativa de esta dirección y las demás. Por

ejemplo, la H_s asociada a una probabilidad de no-excedencia del 99.5% en el régimen del NE es de 3.8 m, mientras que para las demás direcciones, ésta es de 3.2 m.

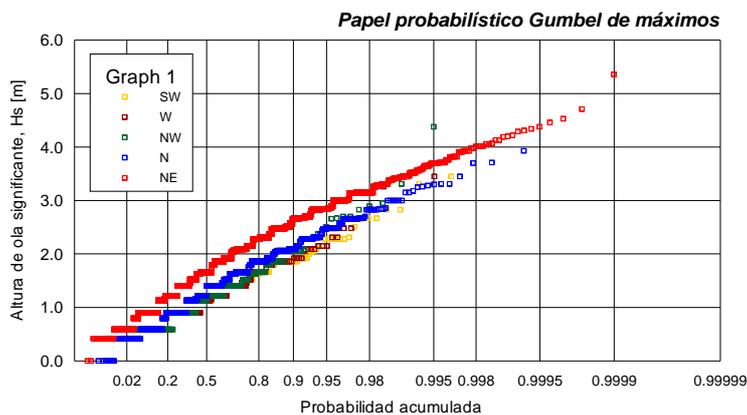


Figura 4.18 Régimen direccional de H_s en profundidades indefinidas

c) Régimen medio escalar de período de pico

En la Figura 4.19 se presenta el régimen medio escalar de período de pico en profundidades indefinidas. Se aprecian claramente dos alineaciones en este régimen, asociadas a las dos familias de oleaje, oleaje de viento local o “sea” y oleaje de fondo o “swell”. El primero genera oleajes de período más corto, mientras con el segundo ocurre lo contrario.

El régimen direccional se muestra en la Figura 4.20. Nótese que el régimen de período de pico es muy similar entre las direcciones principales, siendo mayores los oleajes “sea” (rama baja del régimen medio) en la dirección NE, pero mayores los oleajes “swell” (rama alta del régimen medio) en la dirección NW, precisamente por la mayor longitud de “fetch” en ese sentido.

En términos generales, se observan períodos del 50% de probabilidad de no-excedencia de 8 s, mientras que los asociados al nivel del 99.5% son del orden de 11 s.

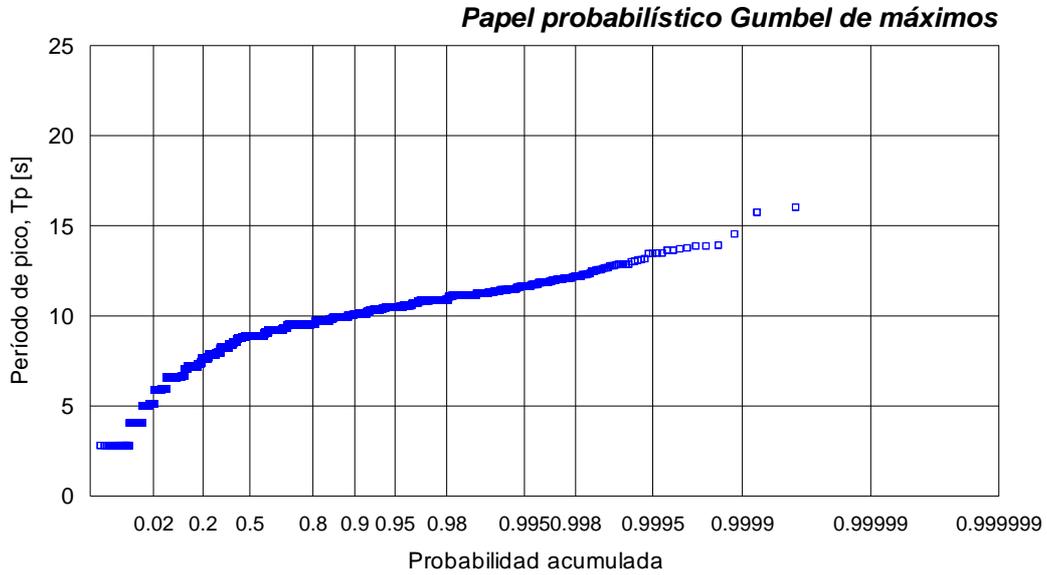


Figura 4.19 Régimen escalar de T_p en profundidades indefinidas

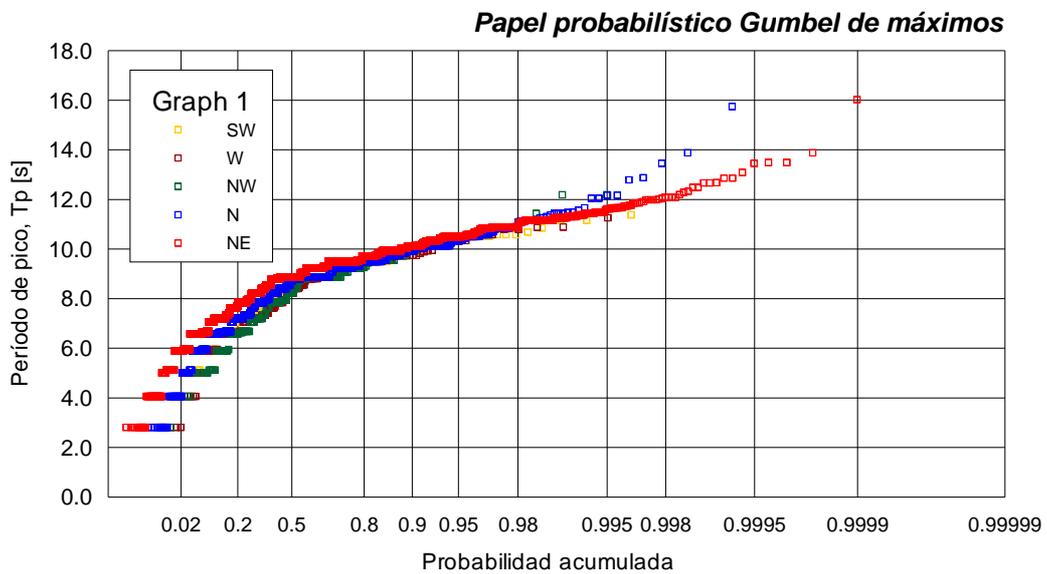


Figura 4.20 Régimen direccional de T_p en profundidades indefinidas

Régimen extremal

a) Metodología

Después del exhaustivo análisis realizado para los huracanes de 1994, con el cual se establecieron algunas expresiones que permiten obtener la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , es posible entonces obtener el régimen de estas variables para condiciones de tormenta.

Se han analizado todos los registros sobre tormentas tropicales en el Atlántico, el mar Caribe y el Golfo de México de los últimos 20 años, desde 1985 hasta 2004. En total han sido 220 eventos estudiados, de los cuales se han analizado con detalle aproximadamente 60 eventos en la zona de estudio.

La tabla 4.2 presenta un listado de los eventos de huracanes que han generado las mayores alturas de ola significativa en profundidades indefinidas que influyen sobre el área de estudio.

b) Régimen extremal de altura de ola significativa

Siguiendo esta metodología, el régimen extremal de H_s en profundidades indefinidas de la zona de estudio es el que se presenta en la figura 4.14. Las líneas punteadas en rojo corresponden a las bandas de confianza asociadas a la variabilidad de los parámetros α y β . Los resultados obtenidos son altamente coincidentes a los encontrados, mediante modelación numérica dentro del proyecto CARIMOS (CARibbean sea Metocean Statistics), por Calverley et al. (2002) para otros puntos del mar Caribe, lo que valida no sólo estos datos sino la metodología empleada para obtenerlos.

Tabla 4.2 Huracanes de mayor H_s en cada año de análisis

AÑO	Evento	$V_{v_huracán}$ (m/s) estimada con datos de satélite
1985	Kate	51.4
1986	Danielle	20.6
1987	Emily	56.6
1988	Gilbert/Joan	82.3
1989	Hugo	66.9
1990	Arthur	30.9
1991	Fabian	20.6
1992	Andrew	69.4
1993	Bret	20.6
1994	Gordon	25.7
1995	Luis	59.2
1996	Edouard	61.7
1997	Grace	20.6
1998	Mitch	66.9
1999	Floyd	69.4
2000	Debby	33.4
2001	Iris	64.3
2002	Isidore	43.7
2003	Isabel	72.0
2004	Ivan	74.6

Obsérvese que la altura de ola significativa con un período de retorno de 36.57 años, cuya importancia se expone más adelante, es de 6.63 m, mientras que para 50 años es de 6.85 m.

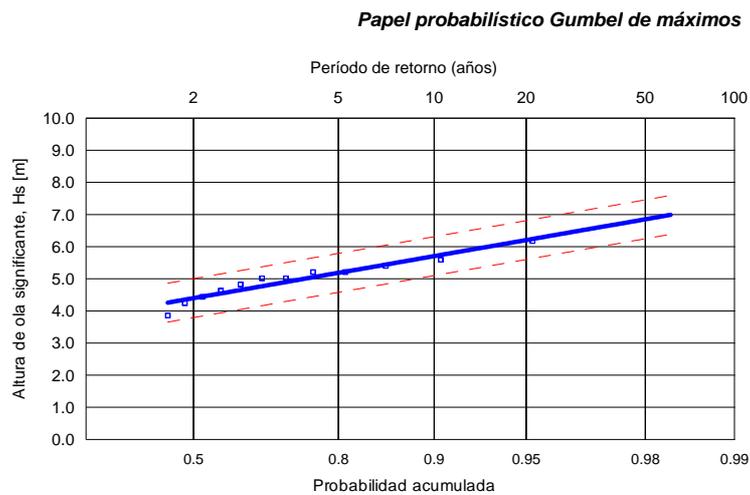


Figura 4.21 Régimen de temporal de H_s en profundidades indefinidas

4.3. OLEAJE EN LA ZONA DE ESTUDIO

4.3.1 Metodología

La propagación del oleaje tiene dos objetivos en este trabajo. En primer lugar, los pases de propagación permiten obtener una imagen cualitativa y cuantitativa del proceso de propagación desde profundidades indefinidas hasta la zona de estudio, permitiendo detectar zonas de concentración o dispersión del oleaje, conocer el ángulo de incidencia del oleaje y su altura (magnitud) una vez ha pasado por los diferentes procesos que sufre el oleaje al acercarse hacia la costa. En segundo lugar, los resultados de las propagaciones permiten crear ficheros de propagación en puntos seleccionados, con los coeficientes de propagación y los ángulos de incidencia en la profundidad objetivo, de manera que sea posible propagar posteriormente los regímenes desde profundidades indefinidas hasta dichos puntos.

Batimetrías

La batimetría general empleada para la representación de los fondos ha sido obtenida de las cartas náuticas 029 y 411 de la Dirección General Marítima, y se ha hecho uso de la batimetría de detalle levantada para este proyecto. Dicha batimetría ha sido ya descrita en el capítulo 1.

Modelo numérico de propagación

Para la propagación de oleaje hasta la costa se ha utilizado un modelo espectral que resuelve la ecuación de la pendiente suave en su aproximación parabólica por medio un modelo en diferencias finitas denominado OLUCA-SP. Este modelo numérico empleado para la propagación, cuya descripción detallada puede encontrarse en el Anexo 2, incorpora todos los procesos fundamentales asociados a la propagación del oleaje (refracción, difracción, asomeramiento y rotura), además de términos no lineales, simulación de la capa límite turbulenta o laminar y rugosidad por fondo, entre otros.

El modelo fue desarrollado inicialmente en la Universidad de Delaware, E.U., y mejorado posteriormente por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) de la Universidad de Cantabria. Entre estas mejoras se encuentra su capacidad para la propagación de oleaje irregular, definido mediante la expresión de un espectro bidimensional (frecuencial y direccional), en el borde exterior de la malla de propagación.

Mallas de propagación

El amplio arco de direcciones propagadas exige la construcción de diferentes mallas de propagación, según la dirección de incidencia en profundidades indefinidas.

Se ha generado una malla orientada al NW para cada una de las zonas geomorfológicamente homogéneas, descritas en el Capítulo 2. La gran extensión de las mallas, cuyo objetivo es captar todas las irregularidades del fondo y los contornos para caracterizar adecuadamente los diferentes procesos, ha obligado a anidar dos mallas, una general (o en aguas intermedias) y una de detalle. Estas mallas anidadas garantizan la continuidad de la propagación.

Todas las mallas exteriores tienen una resolución de 90 m, desde indefinidas hasta una profundidad de 10 m. En las zonas de interés, las mallas tienen una resolución de 30 m (la resolución de cálculo es de 2 a 9 veces superior, según el período) y se prolongan desde las mallas generales hasta la línea de costa. A manera de ejemplo, se presentan en la Figura 4.22 las parejas de mallas de propagación para dos zonas analizadas.

Resultados de las propagaciones

Como se mencionó anteriormente, la propagación del oleaje desde profundidades indefinidas hasta el puerto se ha realizado mediante el uso del modelo numérico de propagación de oleaje OLUCA-SP. Dicho modelo permite propagar un espectro direccional de oleaje cualquiera, definido por la forma espectral, altura de ola significativa, período de pico y función de dispersión direccional.

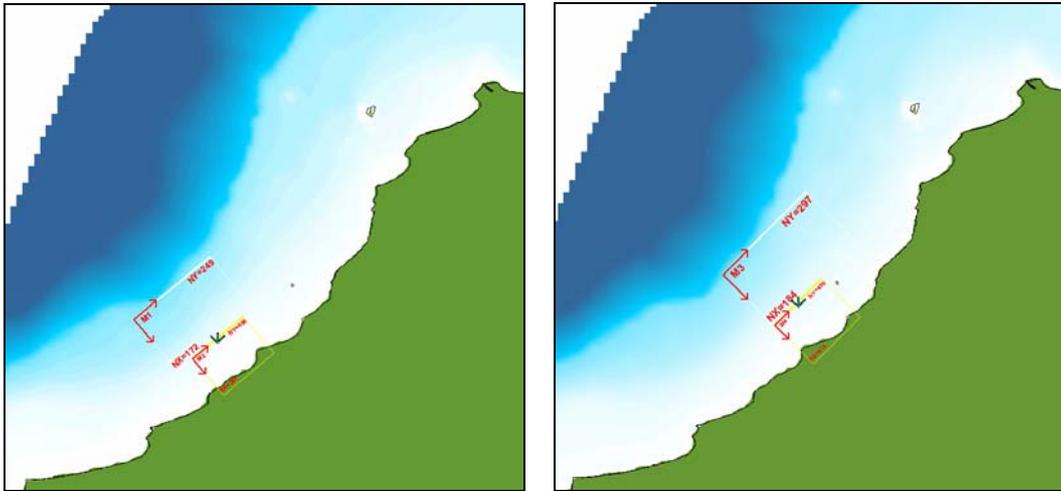


Figura 4.22 Mallas de propagación, general y de detalle en: a) Zona 3, b) Zona 4

Para este caso, se han propagado espectros tipo TMA (Bows et al., 1985) al que se le aplica la función de dispersión angular propuesta por Borgman (1984). Cada espectro propagado queda definido por cinco parámetros:

- H_s : Altura de ola significativa, asociada con la altura del momento cero del espectro
- T_p : Período de pico
- θ_m : Dirección media
- γ : Factor de ensanchamiento del pico
- σ_θ : Parámetro de dispersión angular

En total se han propagado 24 casos del régimen medio de oleaje por cada zona y 16 más del oleaje extremal para la zona identificada como crítica (ver Capítulo 3), con el fin de obtener, para cada uno de ellos, el coeficiente de propagación y el ángulo de incidencia del oleaje en varios puntos alrededor del litoral.

Los parámetros γ y σ_θ de caracterización de la forma del espectro bidimensional sólo dependen del período de pico, para los que se han utilizado valores de 4 y 15° , respectivamente. Todos los casos se han simulado para el nivel medio del mar. Las tablas 4.3 y 4.4 muestran los casos ejecutados tanto para la caracterización del régimen medio como para el régimen extremal.

Tabla 4.3 Características de los casos propagados para el régimen medio

DIR.	Hs (m)	Tp (s)	NM (m)	MALLAS	TOTAL
N	1, 3	5, 7, 10	0.15	9	54
NNW	1, 3	5, 7, 10	0.15	9	54
NW	1, 3	5, 7, 10	0.15	9	54
WNW	1, 3	5, 7, 10	0.15	9	54

Tabla 4.4 Características de los casos propagados para el régimen extremal

DIR.	Hs (m)	Tp (s)	NM (m)	MALLAS	TOTAL
N	5, 7	9, 11	0.15	1	4
NNW	5, 7	9, 11	0.15	1	4
NW	5, 7	9, 11	0.15	1	4
WNW	5, 7	9, 11	0.15	1	4

Los resultados obtenidos en cada propagación se almacenan en ficheros de datos, a partir de los cuales pueden obtenerse las gráficas siguientes:

- Gráfica de isoalturas de ola significativa.
- Gráfica de vectores altura de ola significativa - dirección media de propagación.
- Gráfica de isofases.
- Gráfica de superficie libre.

4.3.2 Regímenes de oleaje en inmediaciones de la costa

Metodología

Una vez efectuadas todas las propagaciones de oleaje, es posible realizar la propagación de la base de datos a los puntos objetivos en las inmediaciones de la zona de estudio. Dicha propagación se realiza asignando a cada dato (H_{si} , T_{pi} , θ_i) de profundidades indefinidas, un dato H_{sp} , T_{sp} , θ_p , en el punto objetivo.

Para asignar los valores en el punto objetivo se construye, para cada uno de dichos puntos, una tabla con la siguiente información:

- H_{sp} en profundidades indefinidas.
- T_{pp} en profundidades indefinidas.
- θ_p en profundidades indefinidas.
- Nivel del mar respecto al cero del puerto.
- Coeficiente de propagación en el punto objetivo.
- Ángulo de incidencia de la frecuencia de pico en el punto objetivo.

Conocido un dato H_{si} , T_{pi} , θ_i en profundidades indefinidas, el valor de la altura de ola significativa y de la dirección en el punto objetivo, H_{sp} , θ_{ip} , se determina mediante un procedimiento de interpolaciones lineales en cuatro dimensiones en la tabla de propagación. Se asume que el período de pico no sufre ninguna variación.

Una vez propagada la base de datos hasta el punto objetivo, la determinación de los regímenes medios de altura de ola significativa se realiza siguiendo la misma metodología empleada en profundidades indefinidas. Debido a que el oleaje que incide sobre la zona de estudio, en este caso Arboletes, está muy agrupado en las direcciones del NW, no se ha considerado necesario construir los regímenes direccionales de oleaje en dichos puntos, siendo suficientemente ilustrativo cualitativa y cuantitativamente los regímenes escalares que a continuación se describen. Basándose en el principio de conservación de acción de onda, el régimen escalar de período de pico puede suponerse igual en profundidades indefinidas y en las inmediaciones de la zona de estudio, por lo que no es necesario volver a calcularlo.

El análisis se ha llevado a cabo para cada una de las zonas geomorfológicamente homogéneas, considerando el régimen medio de oleajes. La zona más crítica desde el punto de vista del riesgo (amenaza y vulnerabilidad ante la erosión), la zona 3, tal como se describe en el Capítulo 3, ha sido analizada con más detalle. A continuación se presentan estos resultados para dos casos de ejemplo:

- Caso 1: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s
- Caso 2: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Dado el elevado volumen de figuras que supondría la presentación de todas las gráficas de propagación, se ha optado por presentar en el Anexo 3 las gráficas de isoalturas y vectores de los oleajes de los casos ejecutados más representativos, considerando aquellos que representan los oleajes medios tipo “sea” y “swell” y los oleajes típicos de tormenta (régimen extremal).

Zona 1: Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

Con un oleaje incidiendo del Norte, se forma en esta zona un patrón característico de este tipo de playas. Punta Sabanilla ejerce de punto de difracción muy local, haciendo disminuir la altura de ola justo alrededor de la población de Zapata. Una modulación longitudinal de H_s entre máximos de 1 m y mínimos de 0.80 m es fácilmente apreciable como consecuencia de la formación de bajos de arena en Punta Caribana. Entre el seno y la cresta de esta modulación se observa una distancia que varía entre 400 y 600 m.

Como era de esperarse, los vectores de oleaje muestran una tendencia a ponerse perpendiculares con la línea de costa, como consecuencia de los fenómenos de refracción con el fondo y difracción en Punta Sabanilla. En la zona recta de la playa, justo por fuera de la zona de influencia de la difracción en dicha punta, el oleaje incide con un pequeño ángulo que generará corrientes longitudinales hacia el SW, en sentido paralelo a la línea de costa.

La modulación observada en los oleajes del Norte también se aprecia en los del Noroeste, aunque en este caso más acentuada, debido, precisamente, a que ésta es consecuencia de los bajos de arena que forman Punta Caribana. Las menores alturas de ola significativa en este caso, se observan en la zona media de la playa. Si bien los vectores de oleaje inciden casi perpendicularmente al litoral, se nota un pequeño ángulo que generará corrientes longitudinales en dirección Noreste.

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: N5J4
N5: Zona 1
J4: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θ: -25° (N) σ: 15° - N° Comp.: 5		

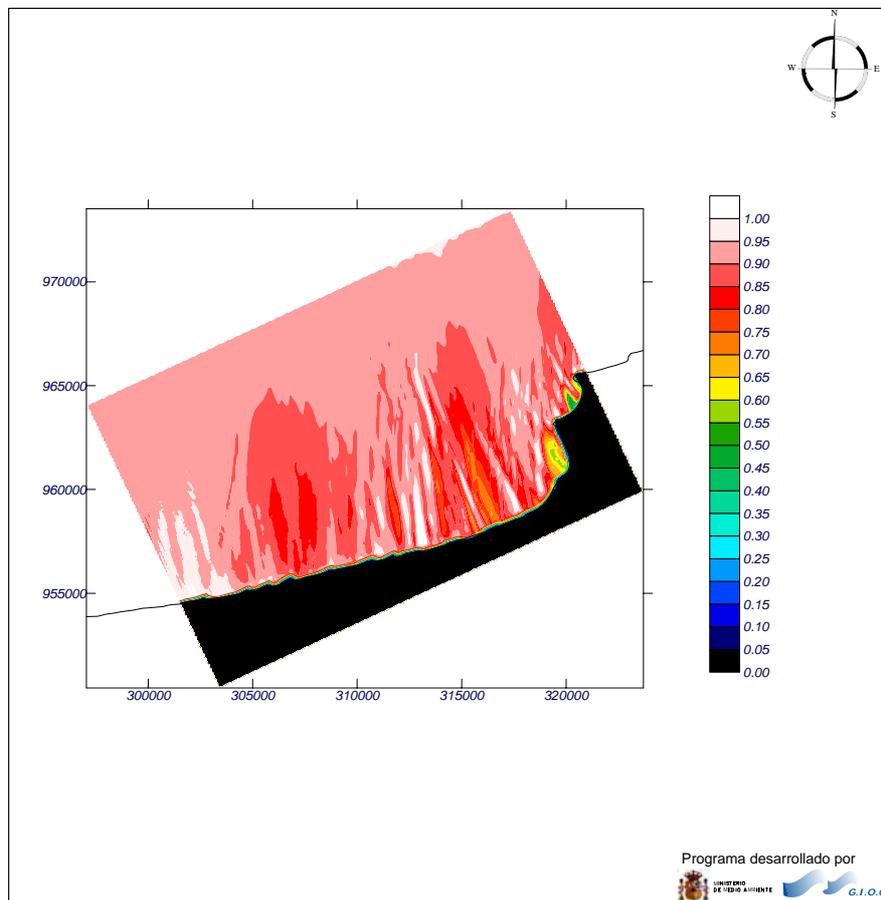


Figura 4.23 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: N5J4
N5: Zona 1
J4: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θs: -25° (N) σ: 15° - N° Comp.: 5		

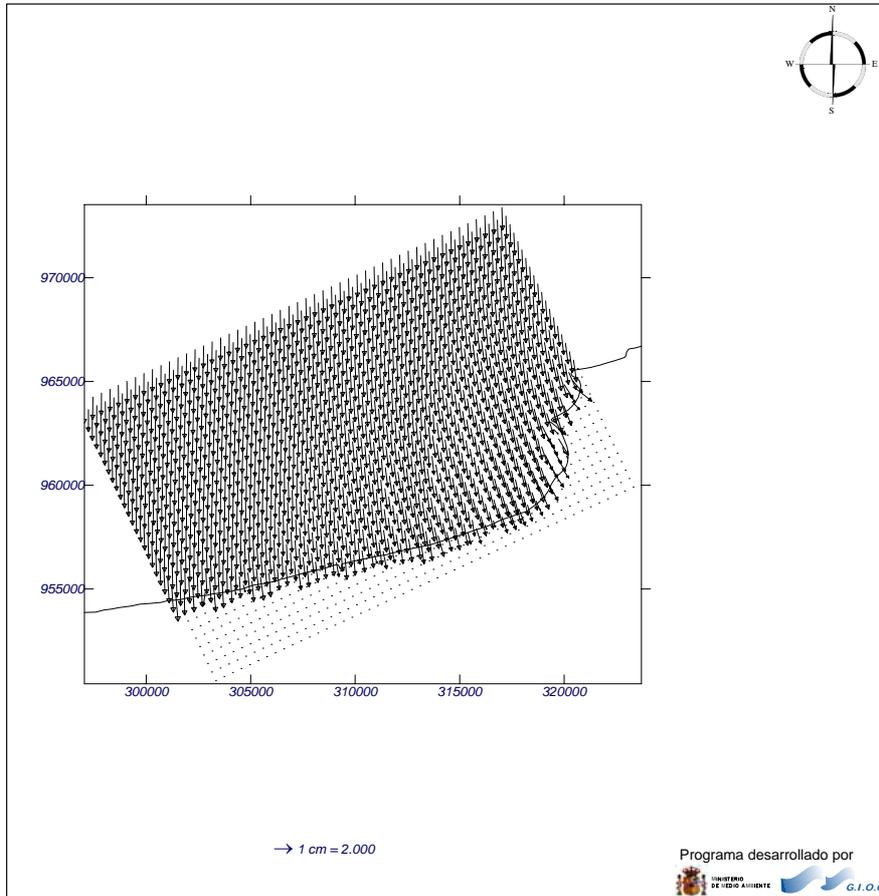


Figura 4.24 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Vectores de oleaje.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: N5K6
N5: Zona 1
K6: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θs: 20° (N45.0W) σ: 15° - Nº Comp.: 5		

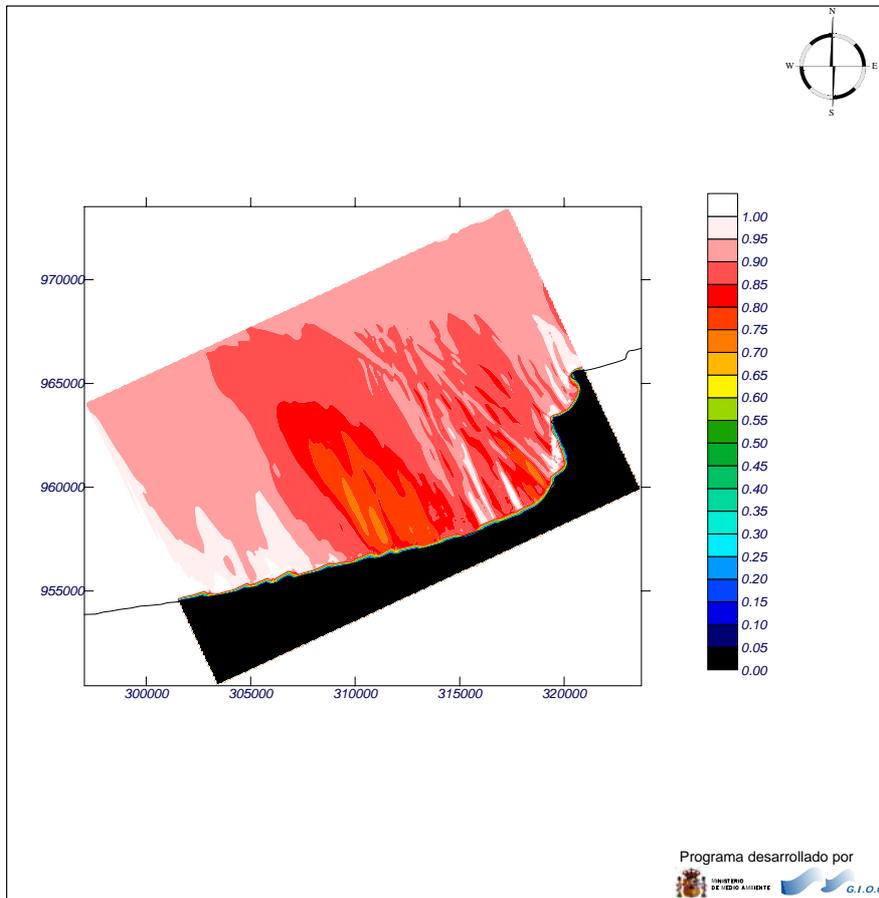


Figura 4.25 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: N5K6 N5: Zona 1 K6: NW_H1_T7	Características de la simulación		
	OLUCA-SP Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) y: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θs: 20° (N45.0W) σ: 15° - N° Comp.: 5	COPLA-SP	MOPLA-SP

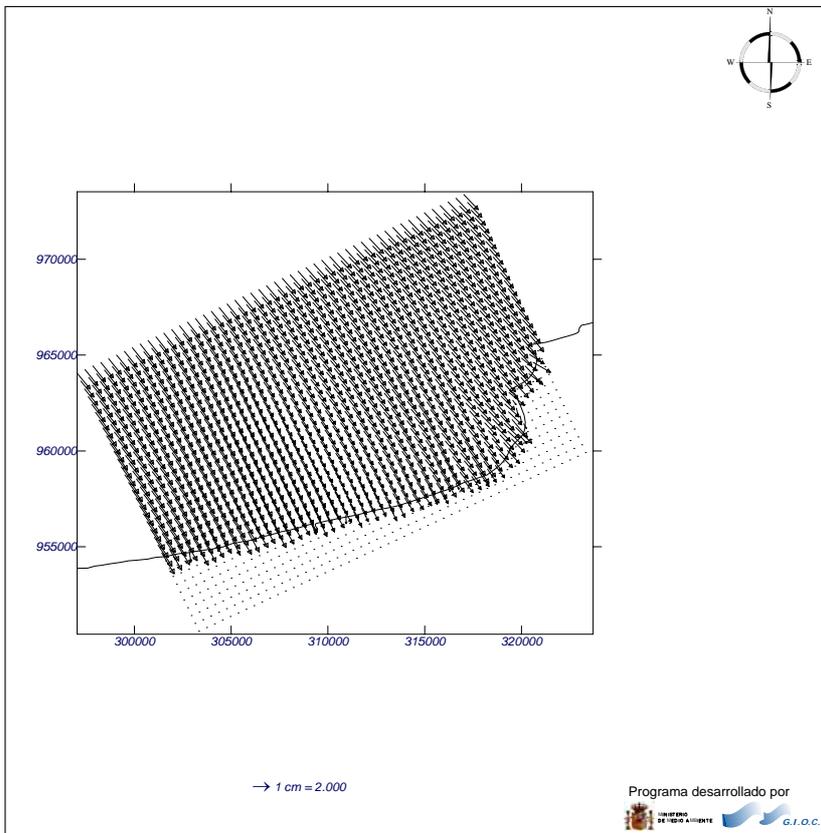


Figura 4.26 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 1. Vectores de oleaje.
 Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Zona 2: Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan:

a) Resultados de las propagaciones

La metodología utilizada para el cálculo de los regímenes medios de H_s es la misma que se utilizó para el análisis de datos en profundidades indefinidas. En la siguiente figura se

presenta el régimen medio de altura de ola significativa en el tramo medio de esta zona. Los cálculos se han hecho a una profundidad de 3 m, buscando representar más ampliamente el oleaje en profundidades someras.

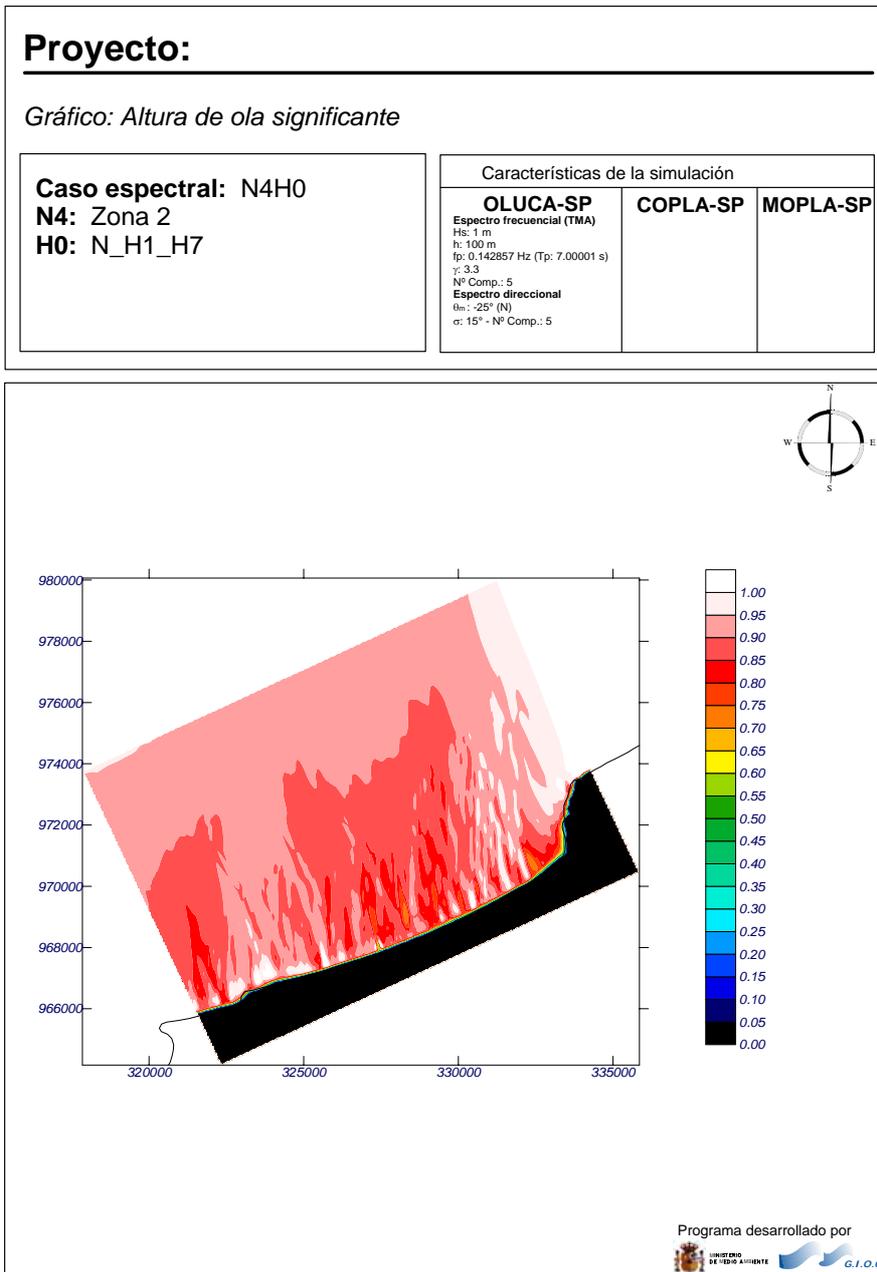


Figura 4.27 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Isoalturas de ola.
 Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Punta San Juan no es un saliente muy pronunciado. El cambio en la alineación de la línea de costa en San Juan de Urabá no parece tener un comportamiento debido a la dinámica costera; más bien parece influencia de la desembocadura del río San Juan o de algún fenómeno geológico.

Por este motivo, dicha punta no genera una difracción importante a los oleajes provenientes del Norte. El mismo patrón modular observado en la Zona 1 se aprecia en ésta. El mínimo ángulo de incidencia del oleaje con la línea de costa no tiene por qué generar corrientes longitudinales fuertes, lo que se traduce en una mayor estabilidad del litoral, tal como se mencionó en el Capítulo 3.

La batimetría de la Zona 2 es prácticamente recta y paralela, motivo por el cual los patrones de oleaje son muy simples. Al igual que ocurre con los oleajes del Norte, en los que inciden del NW y W, los vectores muestran una fuerte tendencia a ponerse perpendiculares a la línea de costa, lográndolo en casi toda la zona.

De esta manera, las corrientes longitudinales de unos y otros son mínimas. Esto garantiza que en esta zona haya un menor desequilibrio dinámico que el señalado en el Capítulo 3 para las demás zonas.

Es decir, justo en la costa, los frentes de oleaje, independientemente de su dirección en profundidades indefinidas, se agrupan en una sola dirección de incidencia: NW.

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: N4H0
N4: Zona 2
H0: N_H1_H7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θs: -25° (N) σ: 15° - N° Comp.: 5		

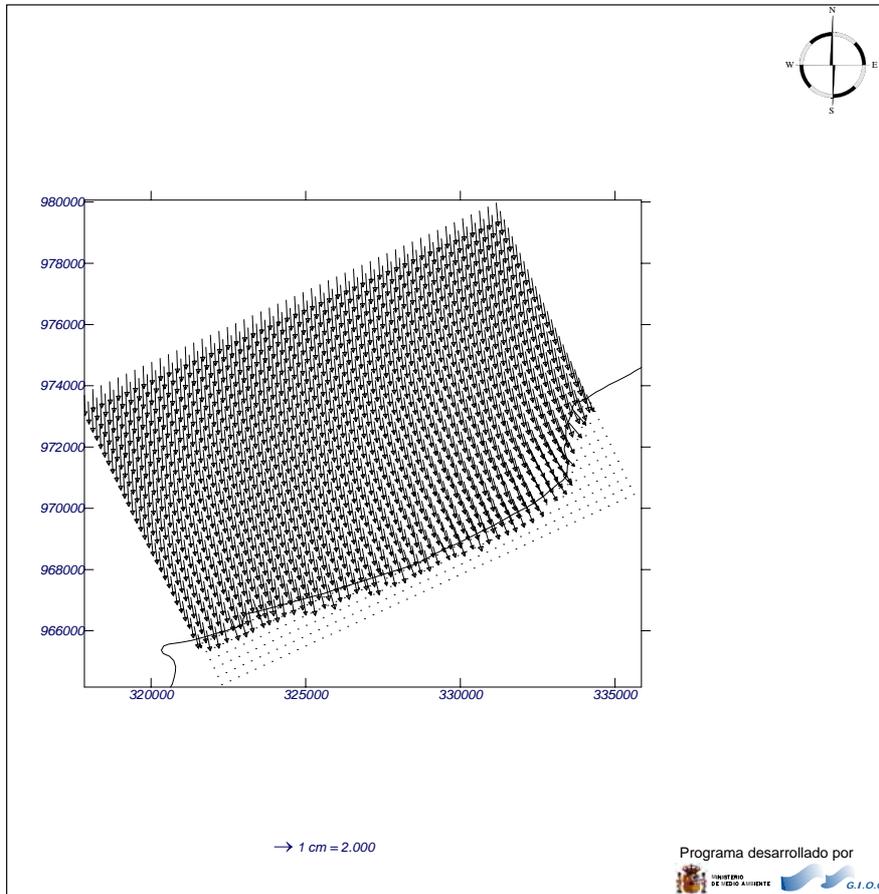


Figura 4.28 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Vectores de oleaje.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: N4I2
N4: Zona 2
I2: NW_H1_H7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θs: 20° (N45.0W) σ: 15° - Nº Comp.: 5		

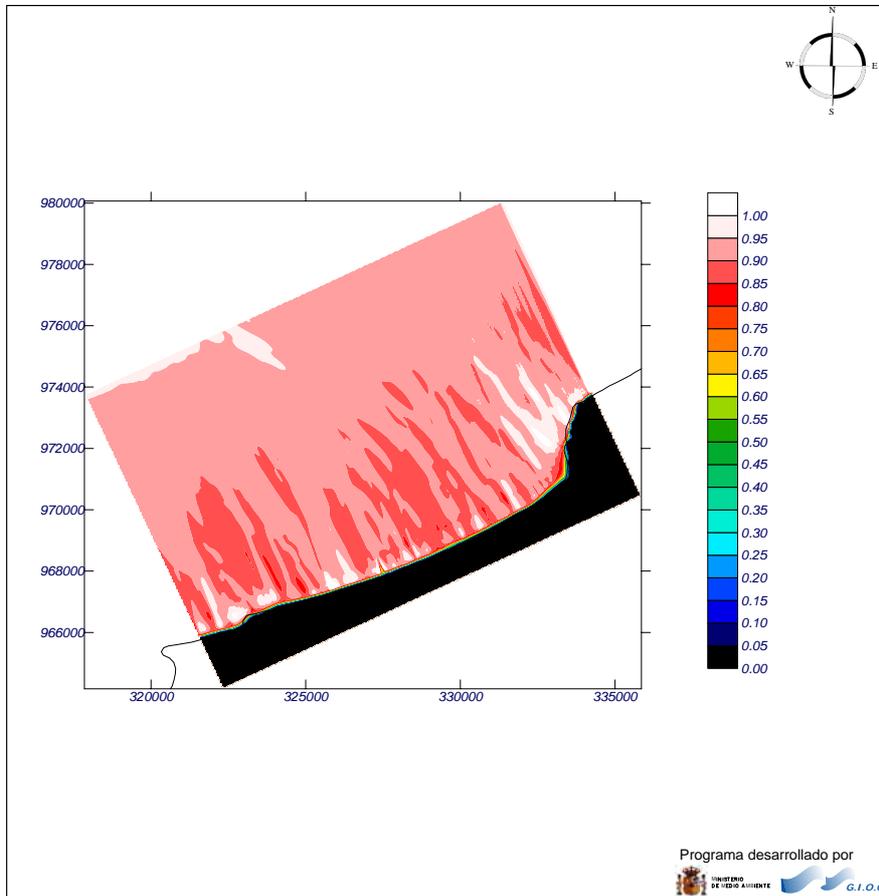


Figura 4.29 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

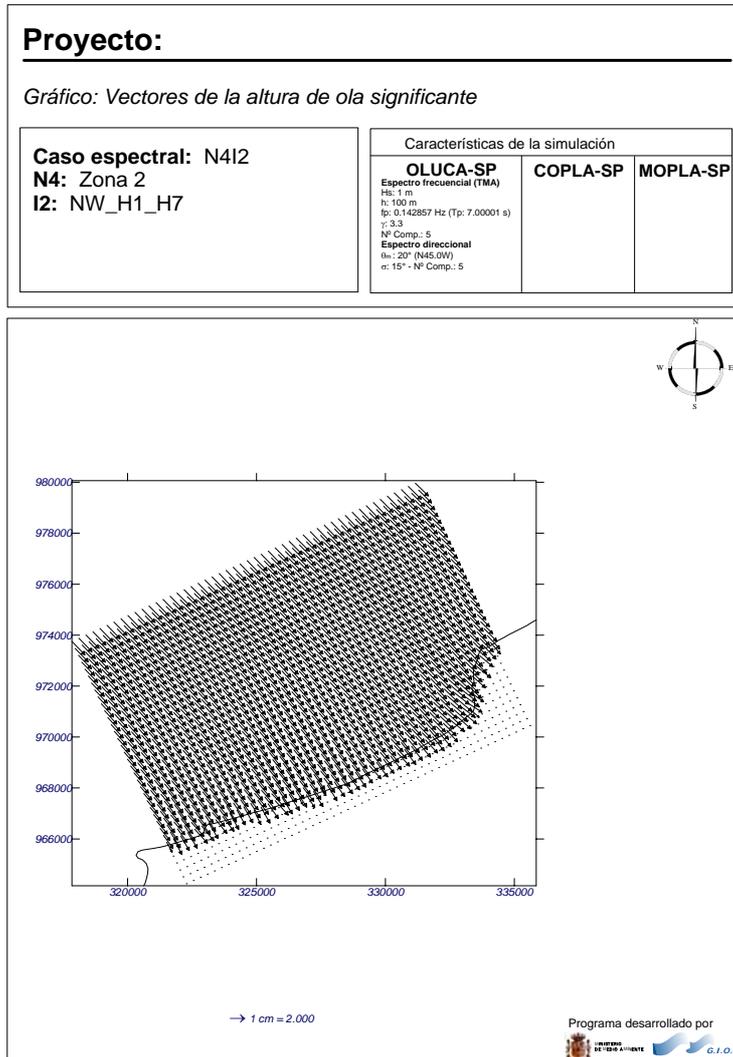


Figura 4.30 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Vectores de oleaje.
 Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Zona 3: Entre Punta San Juan y Punta Arboletes:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

Proyecto:

Gráfico: Altura de ola significativa

Caso espectral: M202
M2: Zona 3
O2: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) y: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θs: -40° (N) σ: 15° - N° Comp.: 5		

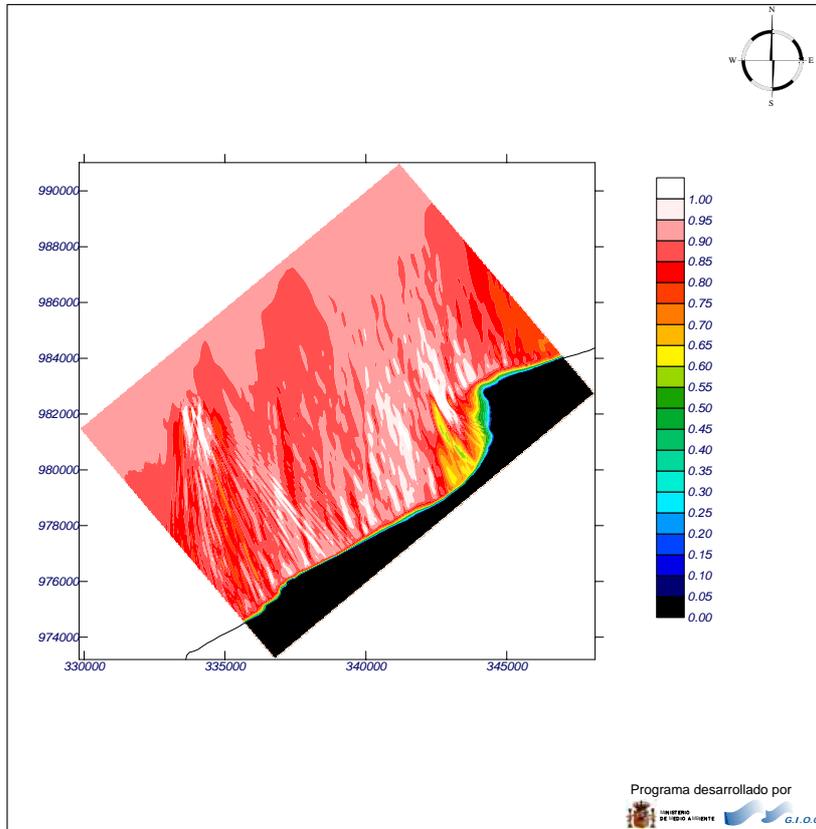


Figura 4.31 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 2. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Obsérvese que todos los oleajes del N (los más energéticos en profundidades indefinidas) sufren una gran refracción como consecuencia de la orientación de la batimetría e intentan girar hasta mostrar una dirección casi perpendicular a la línea de costa frente a las diferentes zonas analizadas. Algunos patrones de difracción se observan como respuesta a las islas e islotes a lo largo de la zona 3, particularmente en Punta Rey. La

antigua punta de Arboletes, actualmente un “stack”, también soporta la incidencia directa de cualquier tipo de oleaje, abrigando en casos de olas del Norte al Volcán de Lodo.

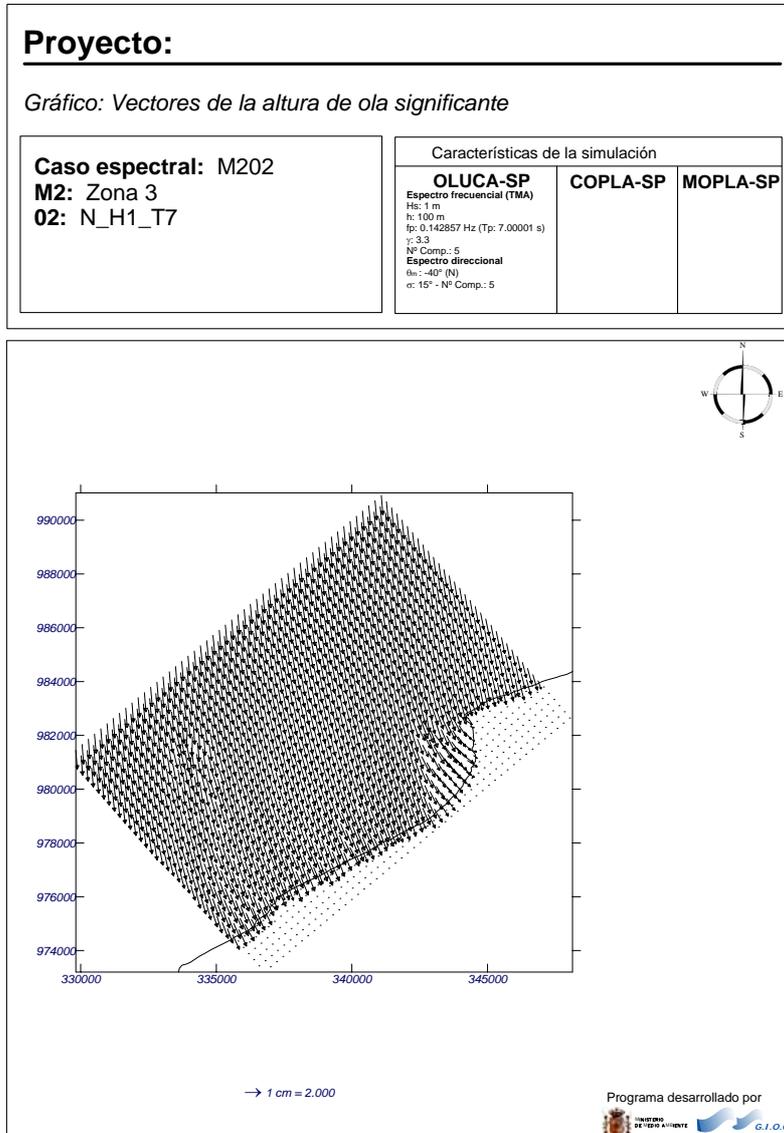


Figura 4.32 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 3. Vectores de oleaje.
Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Como consecuencia de estos comportamientos, los oleajes se agrupan y frente a la línea de costa el ábaco de direcciones está muy concentrado en aquellas del NNW en prácticamente toda la zona. Como la línea de costa tiene un orientación principal N 61° E, es de esperar, entonces, que se formen corrientes longitudinales fuertes en sentido SW.

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: M214
M2: Zona 3
14: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θs: 5° (N45.0W) σ: 15° - N° Comp.: 5		

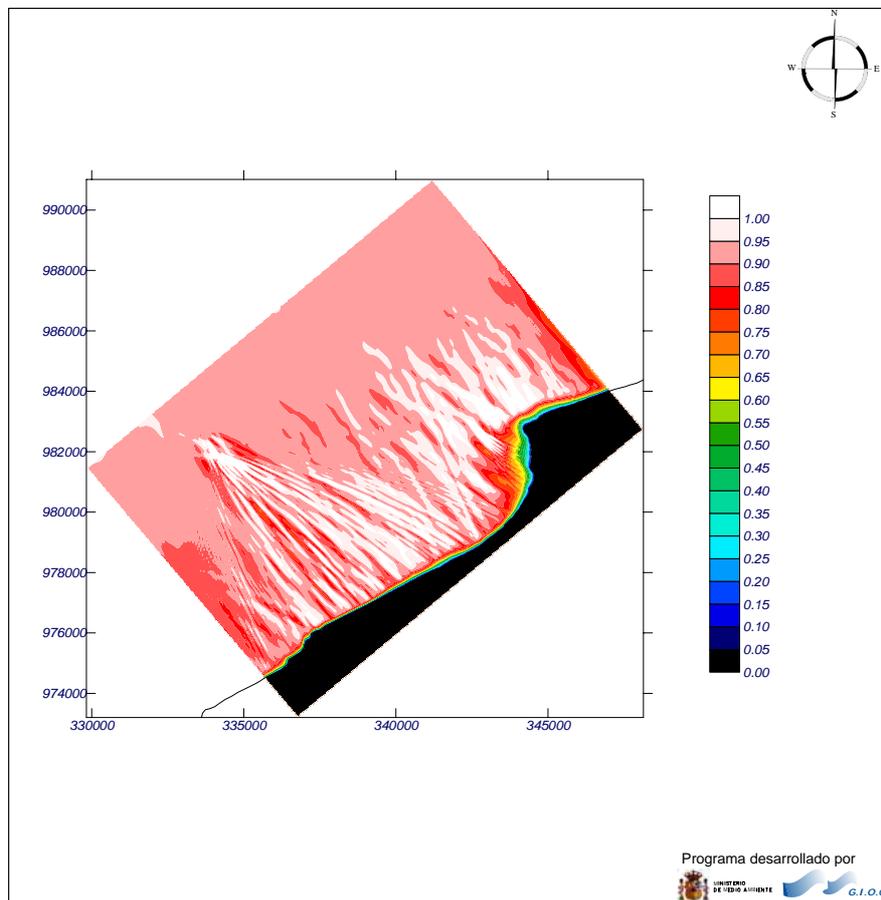


Figura 4.33 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 3. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: M214
M2: Zona 3
14: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m H: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) y: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θ: 5° (N45.0W) σ: 15° - N° Comp.: 5		

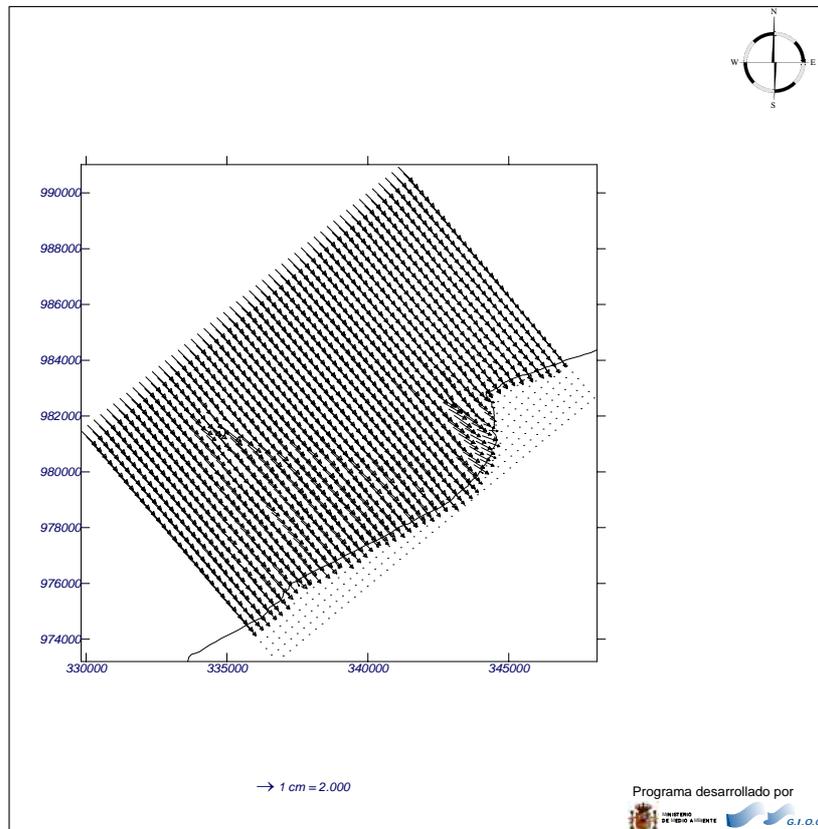


Figura 4.34 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 3. Vectores de oleaje.

Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Como se mencionó en el Capítulo 3, a efectos del riesgo asociado a la erosión del litoral (factor que considera tanto la amenaza natural como la vulnerabilidad de la población), esta zona es la más crítica. Por este motivo, el análisis que aquí se hace incluye la construcción de los regímenes extremales de oleaje en algunos puntos de esta zona. Así pues, los puntos objetivos seleccionados para el análisis de los regímenes medios y extremales son los indicados en la Figura 4.35.

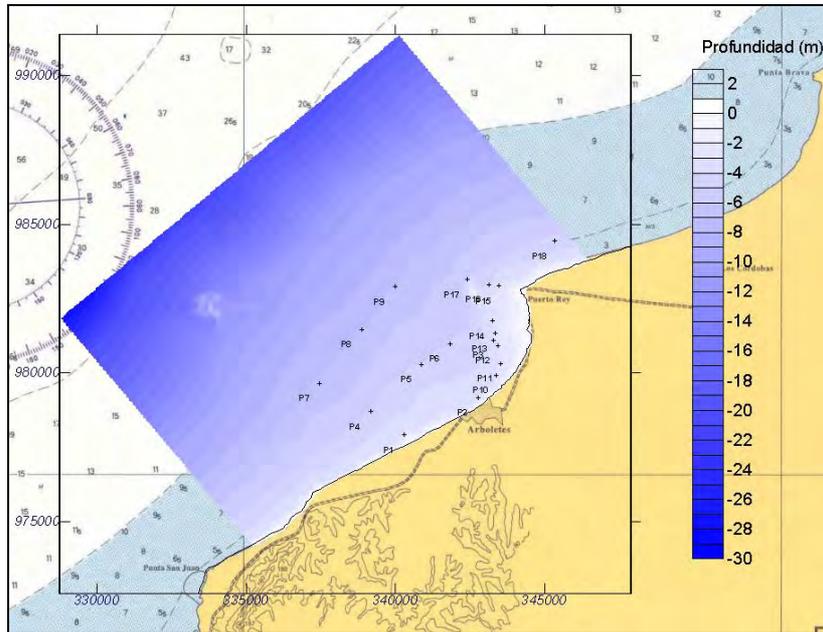


Figura 4.35 Localización de los puntos objetivo seleccionados para la determinación de los regímenes medios y extremales de oleaje frente a Arboletes.

b) Regímenes medios

La metodología utilizada para el cálculo de los regímenes medios de H_s es la misma que se utilizó para el análisis de datos en profundidades indefinidas. En la siguiente figura se presenta el régimen medio de altura de ola significativa en el tramo medio de esta zona. Los cálculos se han hecho a una profundidad de 3 m, buscando representar más ampliamente el oleaje en profundidades someras.

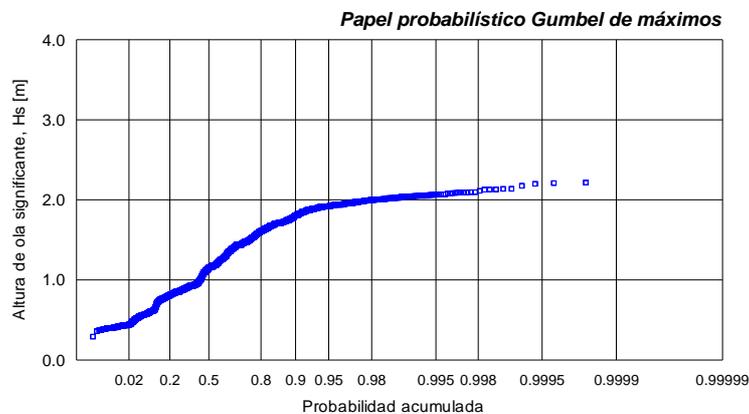


Figura 4.36 Régimen medio de oleaje en la zona 3 a una profundidad de 3 m.

c) Regímenes extremales

La metodología utilizada para el cálculo de los regímenes extremales de H_s es la misma que se utilizó para el análisis de datos en profundidades indefinidas. Dada la cantidad de puntos analizados en esta zona, a manera de ejemplo se presenta en la el ajuste hecho para el Punto 1 en un papel probabilística Gumbel de máximos. La tabla 4.5 presenta los resultados más relevantes, en términos de la altura de ola significativa asociada a un período de retorno dado, de todos los puntos de interés.

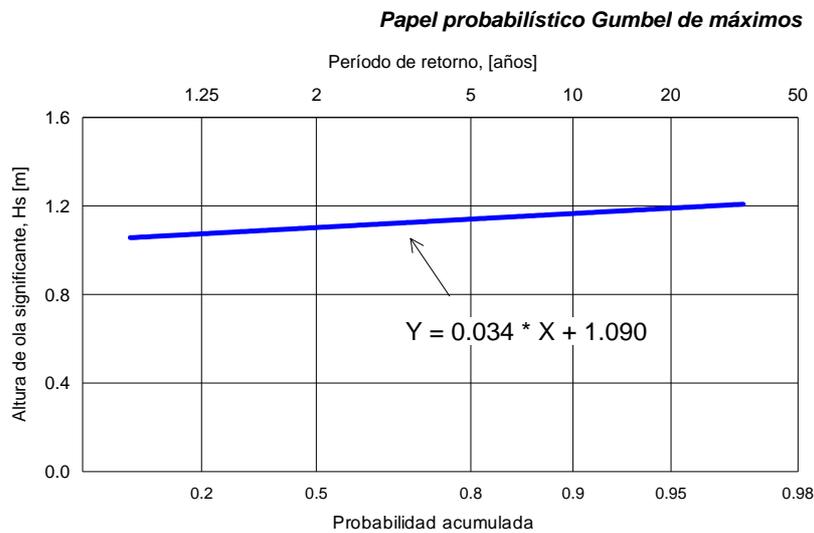


Figura 4.37 Régimen extremal de H_s en el punto 1.

Tabla 4.5 Regímenes extremales de los puntos objetivo

Período de retorno, T_r (años)	Altura de ola significativa, H_s (m)																
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
2	1.105	1.06	0.855	1.535	1.51	1.45	2	2.04	2.05	0.555	0.905	0.85	0.925	0.805	0.98	0.875	1.19
5	1.16	1.18	1.01	1.62	1.58	1.52	2.1	2.14	2.15	1.09	1.03	0.99	1.07	0.93	1.53	1.4	1.68
10	1.16	1.21	1.08	1.62	1.59	1.53	2.11	2.15	2.16	1.11	1.05	1.05	1.1	1.08	1.55	1.42	1.69
25	1.2	1.26	1.15	1.67	1.63	1.57	2.17	2.21	2.22	1.29	1.11	1.12	1.16	1.15	1.74	1.6	1.9
30	1.2	1.28	1.17	1.68	1.64	1.58	2.18	2.22	2.23	1.34	1.12	1.13	1.18	1.18	1.79	1.65	1.94
36.57	1.21	1.29	1.19	1.69	1.65	1.59	2.2	2.23	2.25	1.39	1.13	1.15	1.19	1.2	1.84	1.7	2
50	1.22	1.31	1.22	1.71	1.66	1.6	2.21	2.25	2.26	1.47	1.16	1.18	1.22	1.24	1.93	1.78	2.08
100	1.24	1.36	1.3	1.74	1.69	1.63	2.25	2.29	2.3	1.66	1.21	1.25	1.28	1.33	2.13	1.97	2.26

Zona 4: Entre Punta Arboletes y Punta Brava:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

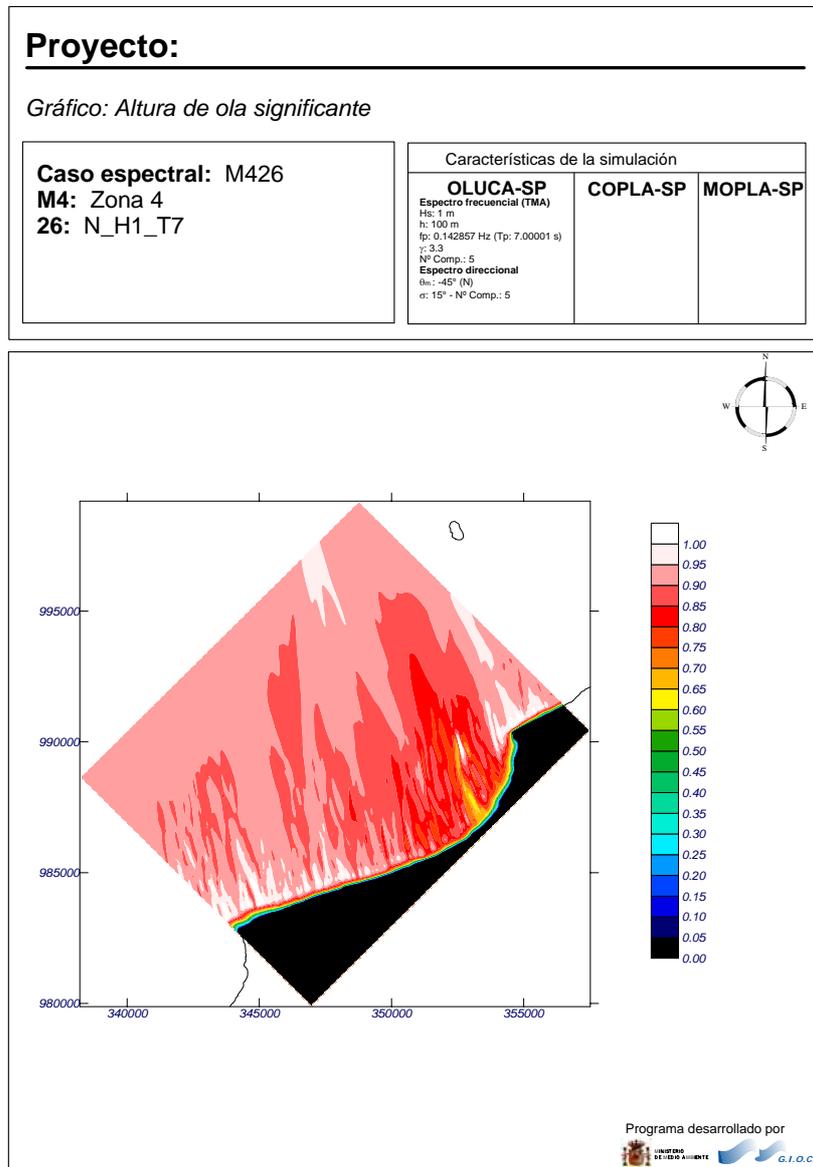


Figura 4.38 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

El patrón de oleaje observado en el caso de incidencia del Norte sería muy sencillo si no fuera por un pequeño bajo localizado frente a Punta Brava que provoca una difracción en el oleaje. La poca influencia de dicha punta se ve contrarrestada por la influencia del bajo, que alcanza a disminuir la altura de ola en un 40% en algunos sitios de la playa de Los Córdoba.

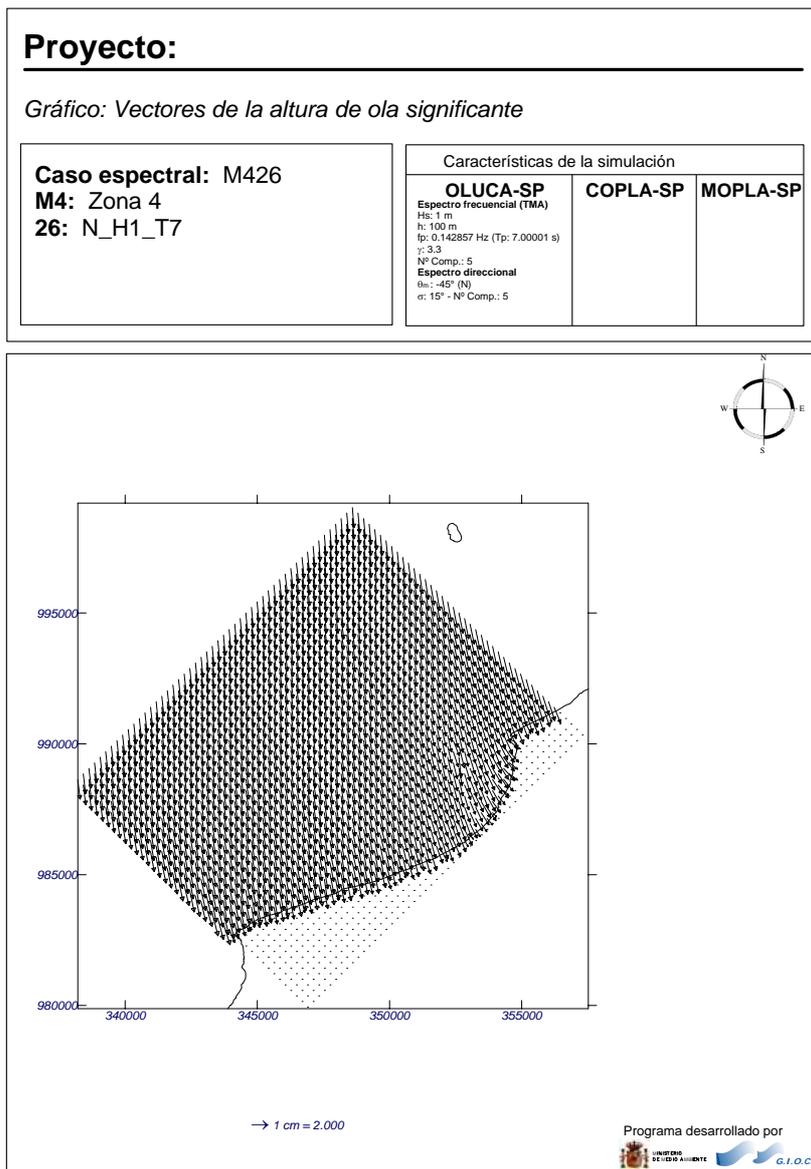


Figura 4.39 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Vectores de oleaje.
 Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Nótese en la gráfica de los vectores de oleaje cómo el ángulo de incidencia de los casos del Norte, los más frecuentes y energéticos como se describió en el apartado anterior, es muy alto. Este detalle hace que las corrientes longitudinales que se forman en esta zona sean altísimas y, por ende, los resultados de erosión muy alta presentados en el Capítulo 3.

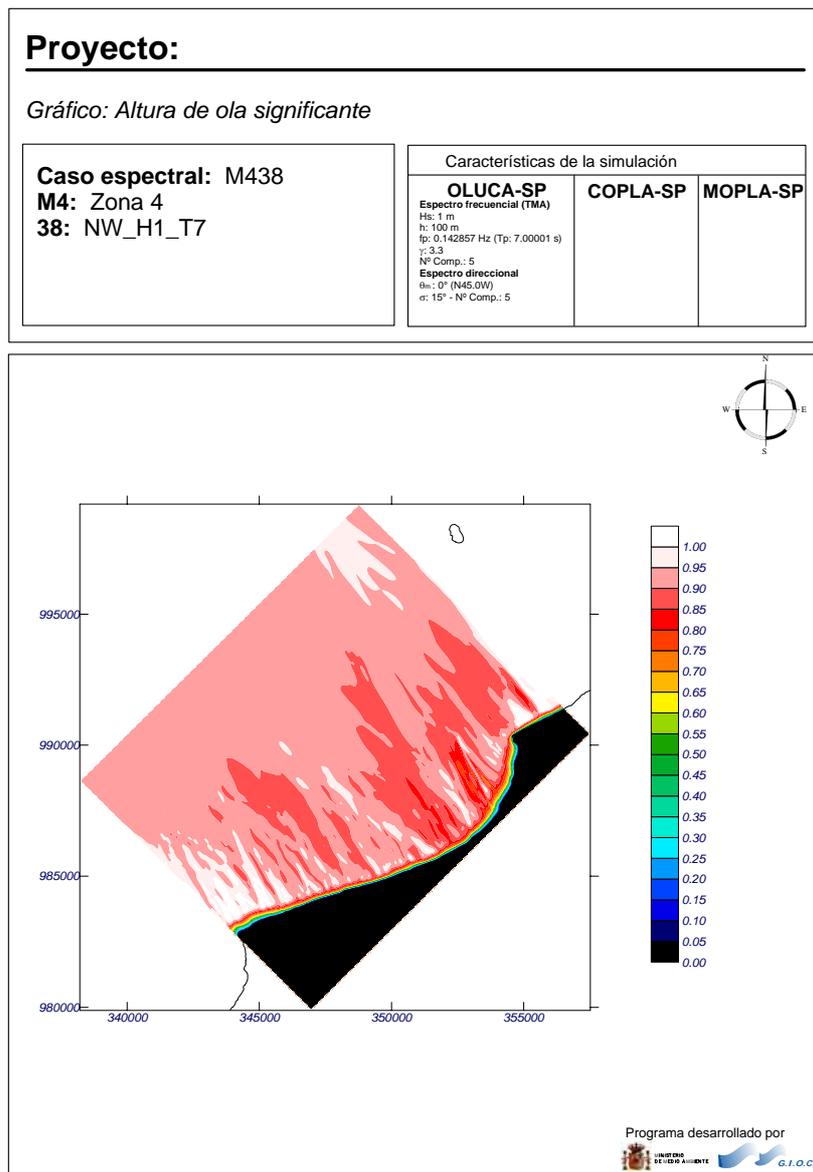


Figura 4.40 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Isoalturas de ola.
 Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

La influencia de la Isla Tortuguilla sobre esta zona cuando los oleajes inciden del Norte no se aprecia muy claramente en las figuras, pero sí es evidente y contribuye también a la difracción y disipación de la energía de dicha variable. La menor altura de ola observada en casi toda la malla de propagación así lo demuestra. Si bien la influencia de ese bajo en los patrones de oleaje también afecta a los casos del NW y W, las consecuencias en estos son mínimas en comparación con los oleajes del N.

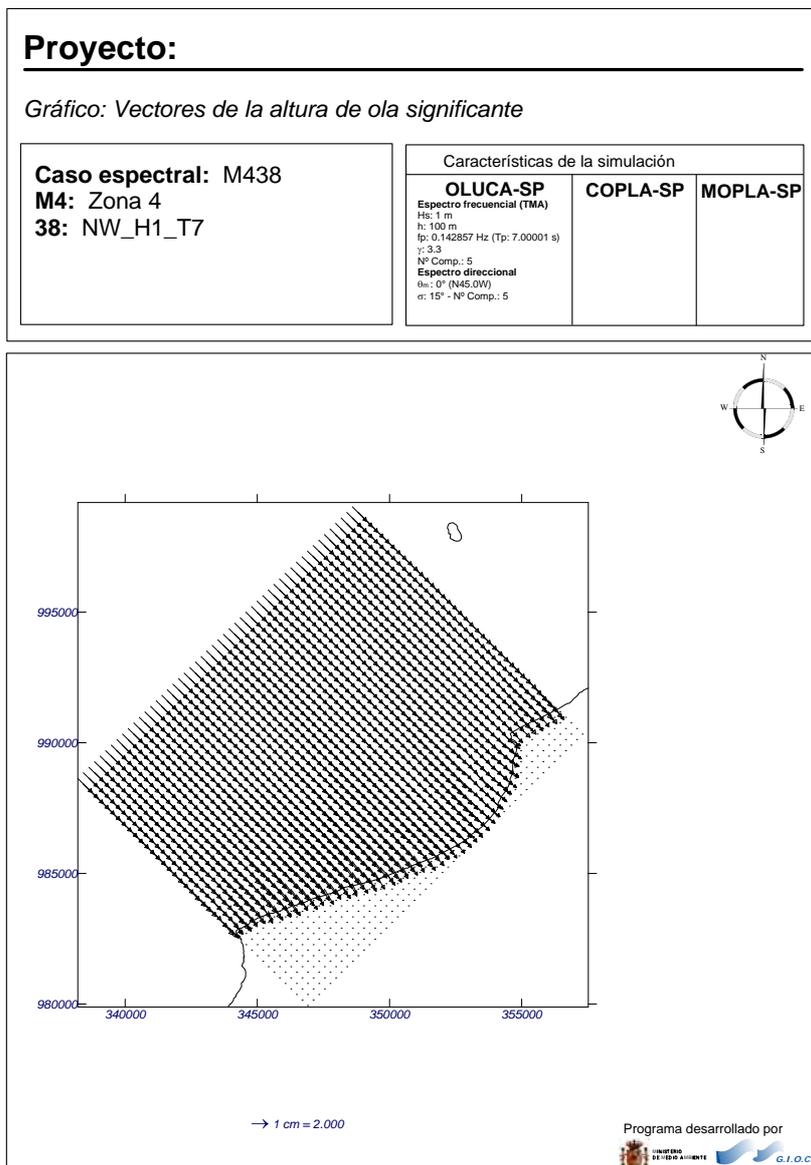


Figura 4.41 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 4. Vectores de oleaje.
 Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

b) Regímenes medios

La metodología utilizada para el cálculo de los regímenes medios de H_s es la misma que se utilizó para el análisis de datos en profundidades indefinidas. En la siguiente figura se presenta el régimen medio de altura de ola significativa en el tramo medio de esta zona. Los cálculos se han hecho a una profundidad de 3 m, buscando representar más ampliamente el oleaje en profundidades someras.

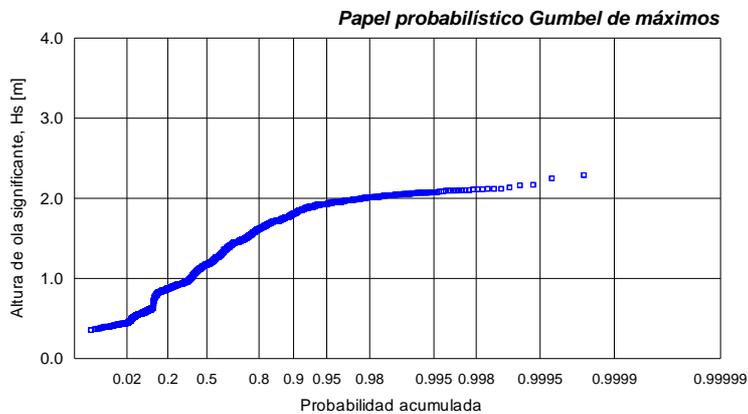


Figura 4.42 Régimen medio de oleaje en la zona 4 a una profundidad de 3 m.

Zona 5: Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

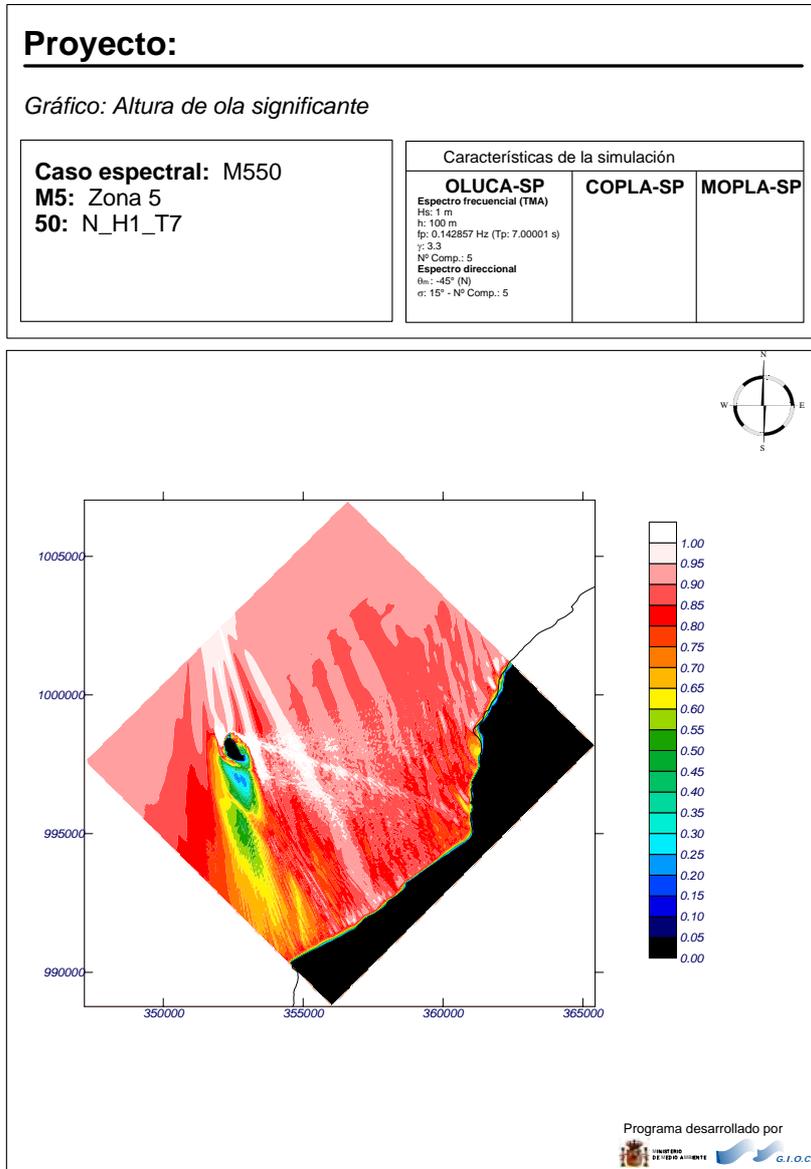


Figura 4.43 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

Isla Tortuguilla es un elemento fundamental en los patrones de oleaje de esta zona. Su influencia se observa tanto en la difracción y refracción del oleaje como en la disipación de la energía de toda esta zona. Las mayores disminuciones de la altura de ola asociadas a esta isla se aprecian en la parte Sur de la playa.

Por otra parte, los oleajes del Norte inciden de tal manera sobre el tramo Puerto Escondido-Punta Buenos Aires que generan grandes ángulos de incidencia con la línea de costa y, por ende, fuertes corrientes longitudinales provocadas por la rotura del oleaje.

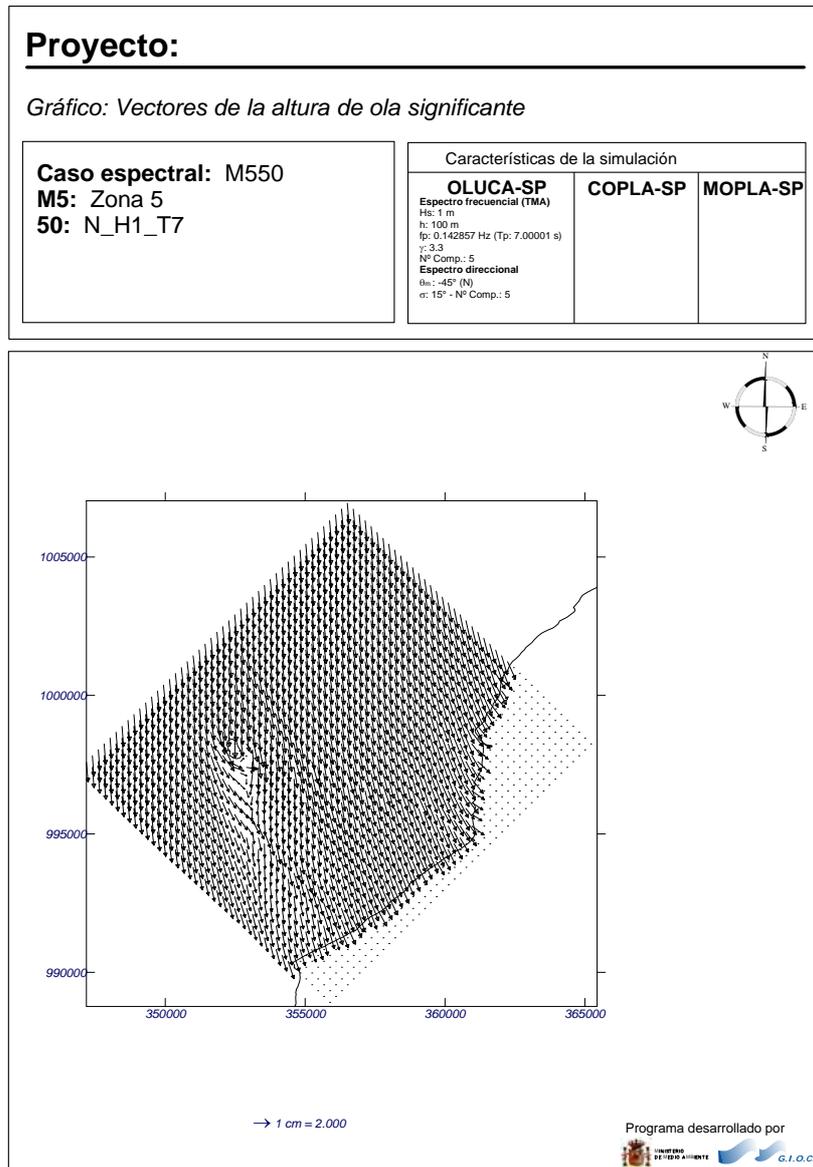


Figura 4.44 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Vectores de oleaje.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

La influencia de Isla Tortuguilla también se observa en los oleajes del NW y W, tal como se nota en las dos figuras siguientes.

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: M562
M5: Zona 5
62: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θa: 0° (N45.0W) σ: 15° - N° Comp.: 5		

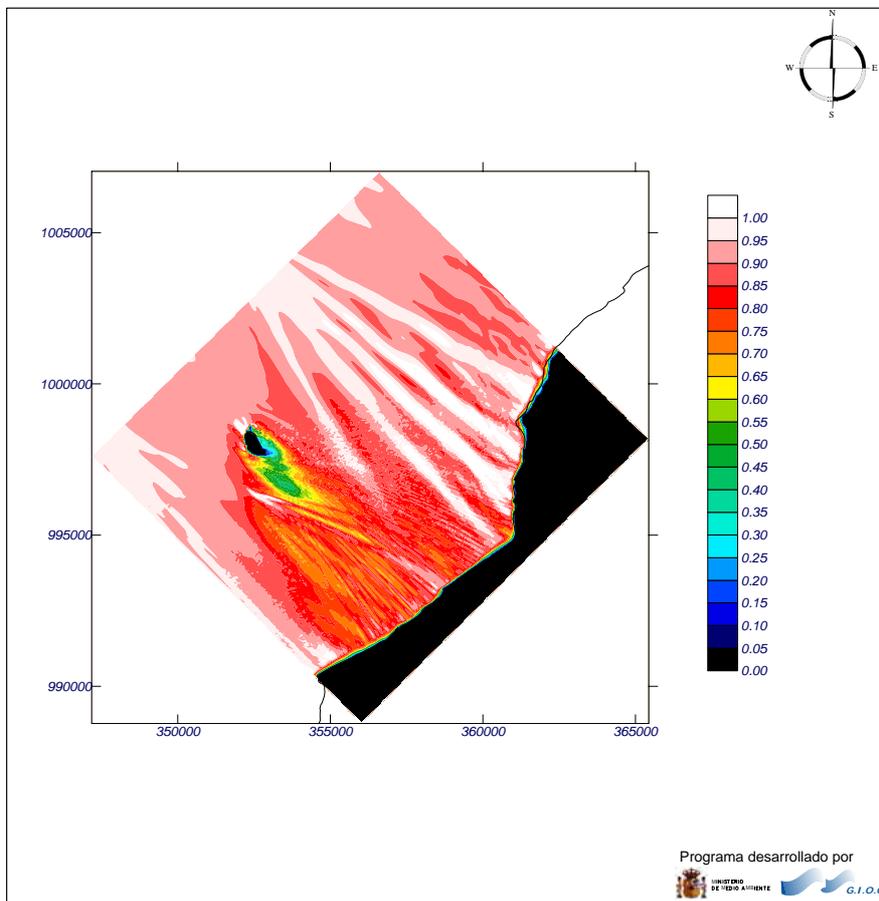


Figura 4.45 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

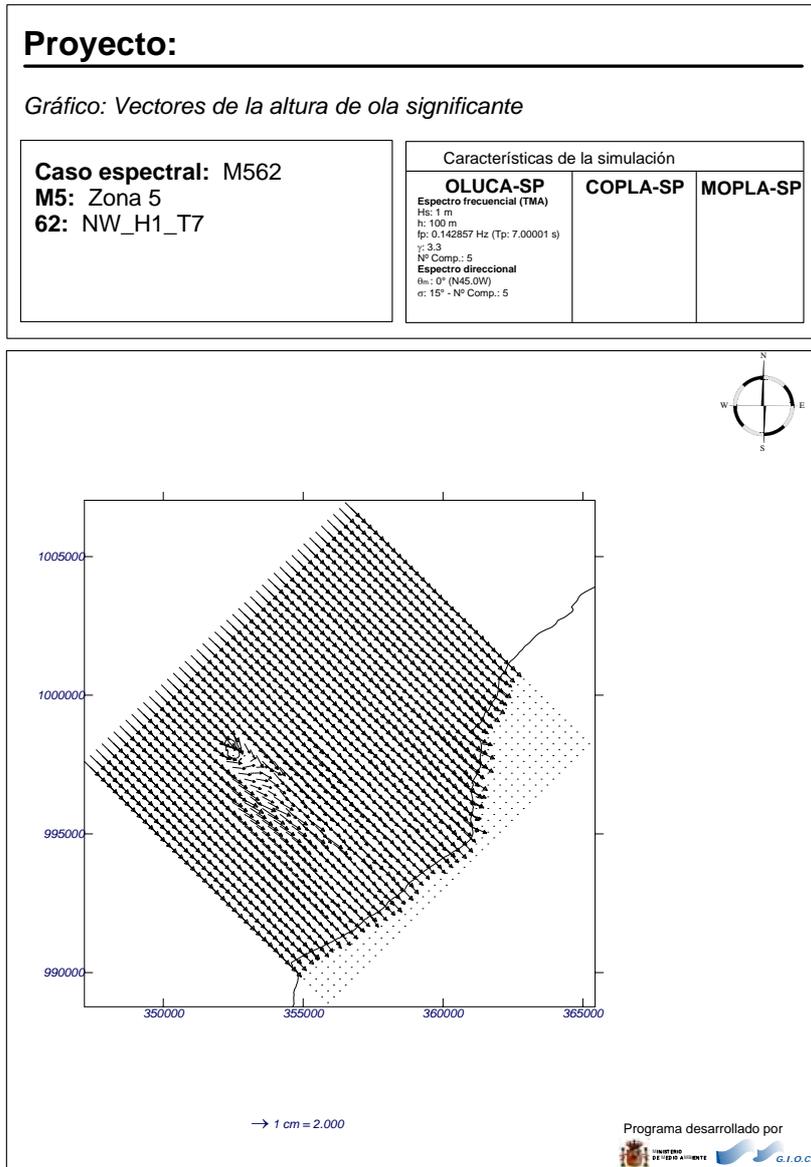


Figura 4.46 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 5. Vectores de oleaje.
 Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

b) Regímenes medios

La metodología utilizada para el cálculo de los regímenes medios de H_s es la misma que se utilizó para el análisis de datos en profundidades indefinidas. En la siguiente figura se presenta el régimen medio de altura de ola significativa en el tramo medio de esta zona.

Los cálculos se han hecho a una profundidad de 3 m, buscando representar más ampliamente el oleaje en profundidades someras.

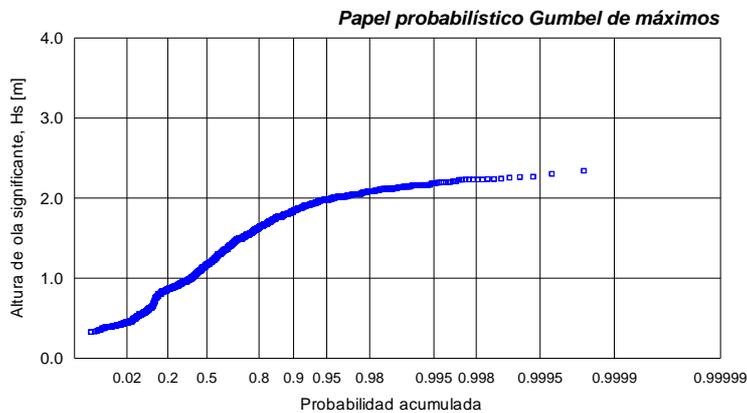


Figura 4.47 Régimen medio de oleaje en la zona 5 a una profundidad de 3 m.

Zonas 6 y 7: Entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle, y entre Boca Mangle y Punta Broqueles:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

Quizás el elemento más perturbador de la dinámica litoral de todo el tramo estudiado, después del delta de Tinajones, es Isla Fuerte. Su dimensión es tal que alcanza a modificar los patrones de oleaje en una amplia zona. Las consecuencias de la difracción, refracción, asomeramiento y disipación sufridas por el oleaje en cercanías de la isla se pueden apreciar tanto en esta zona como en las aledañas.

Es evidente también la influencia de los bajos coralinos localizados frente a Punta La Cruz también sobre los procesos que sufre el oleaje de manera local, tal como se observa en estas figuras, tanto para los casos del N, como para los del NW y W.

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: M774
M7: Zonas 6 y 7
74: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θa: -45° (N) σ: 15° - N° Comp.: 5		

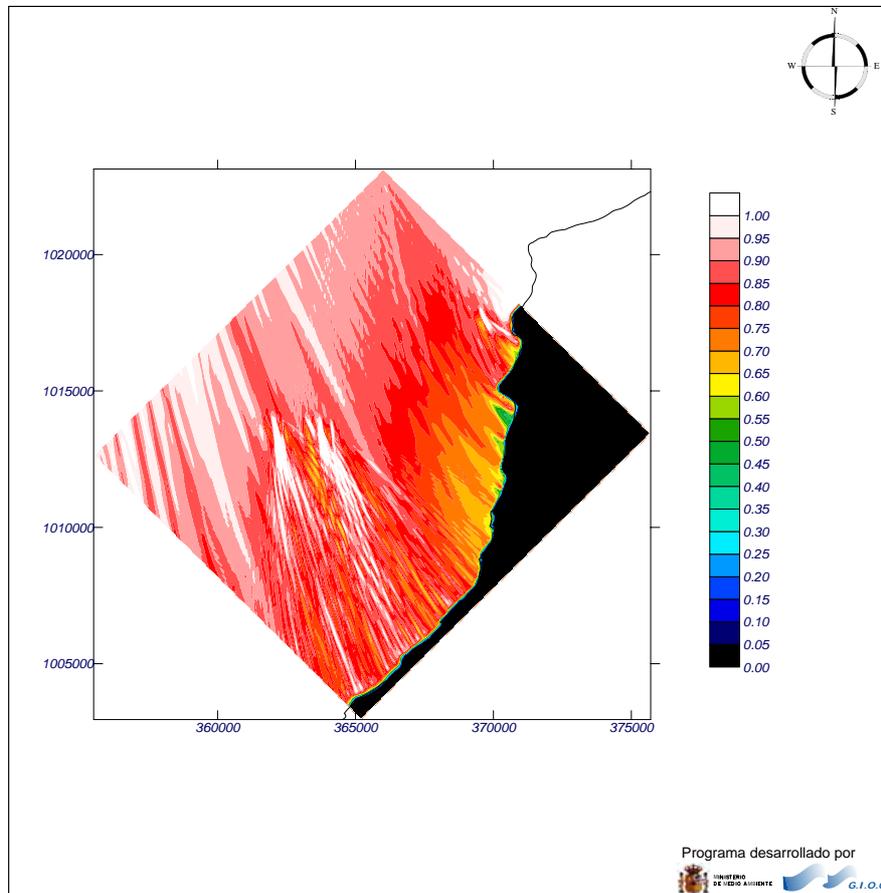


Figura 4.48 Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: M774
M7: Zonas 6 y 7
74: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 N° Comp.: 5 Espectro direccional θa: -45° (N) σ: 15° - N° Comp.: 5		

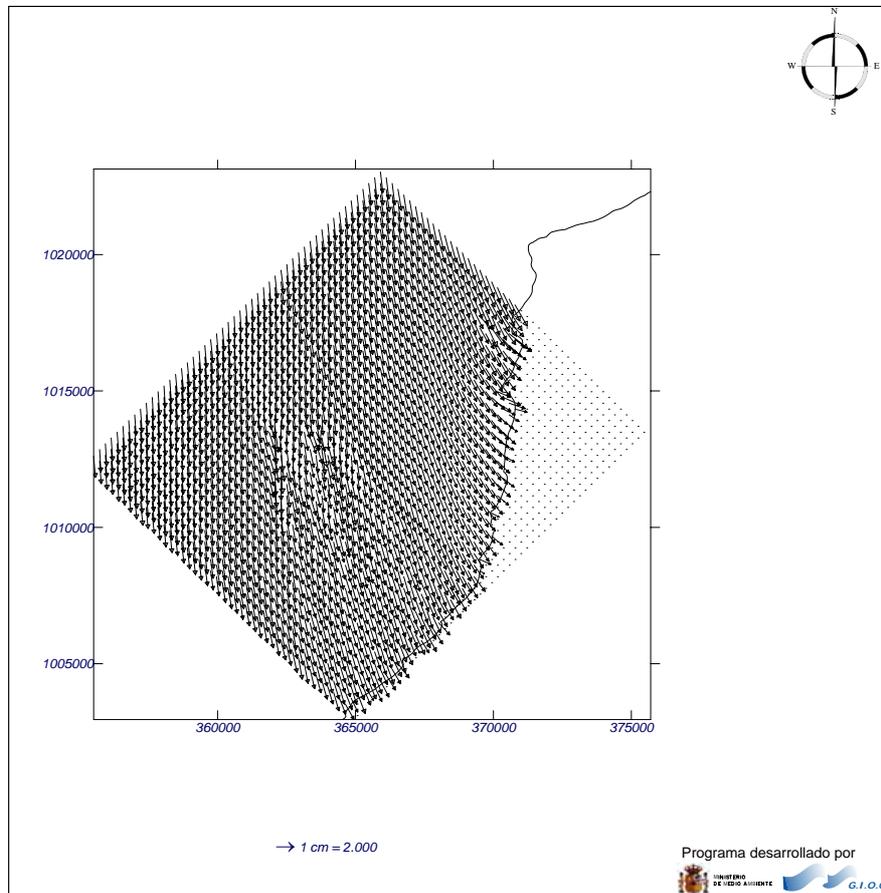


Figura 4.49 Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: M786
M7: Zonas 6 y 7
86: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θs: 0° (N45.0W) σ: 15° - Nº Comp.: 5		

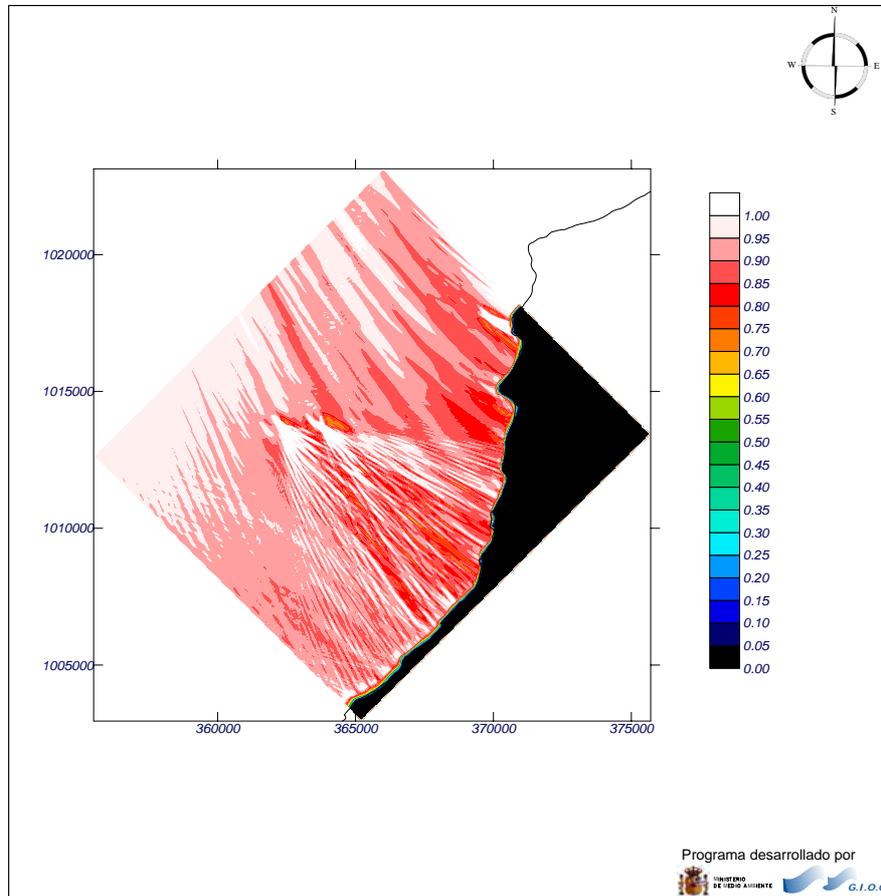


Figura 4.50 Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

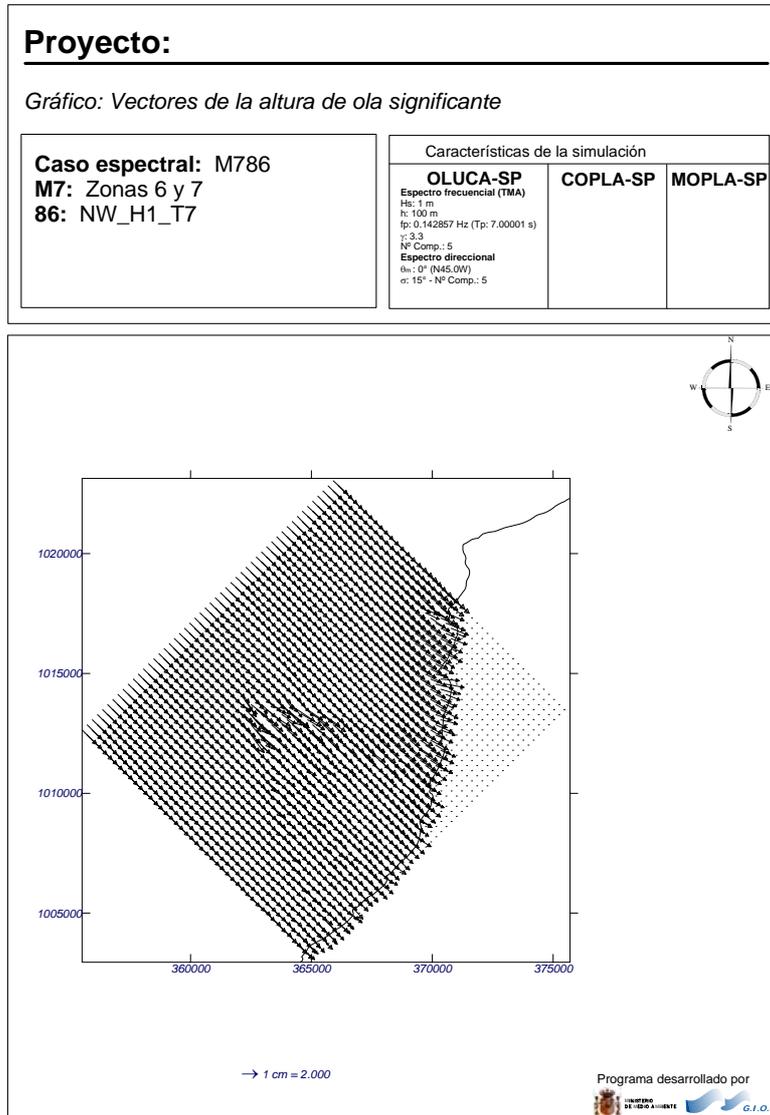


Figura 4.51 Resultados de la simulación de oleaje en las Zonas 6 y 7. Vectores de oleaje. Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

Zona 8: Entre Punta Broqueles y Punta La Rada:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

Tal como se mencionó en la descripción de la propagación de oleaje en la zona anterior, la influencia de Isla Fuerte es todavía más notoria en esta zona. Los valores de altura de ola significativa de 0.50 m que se observan en la siguiente figura así lo demuestran. La amplia zona que cubre esas H_s pequeñas es producto de la difracción que sufre el oleaje en Isla Fuerte.

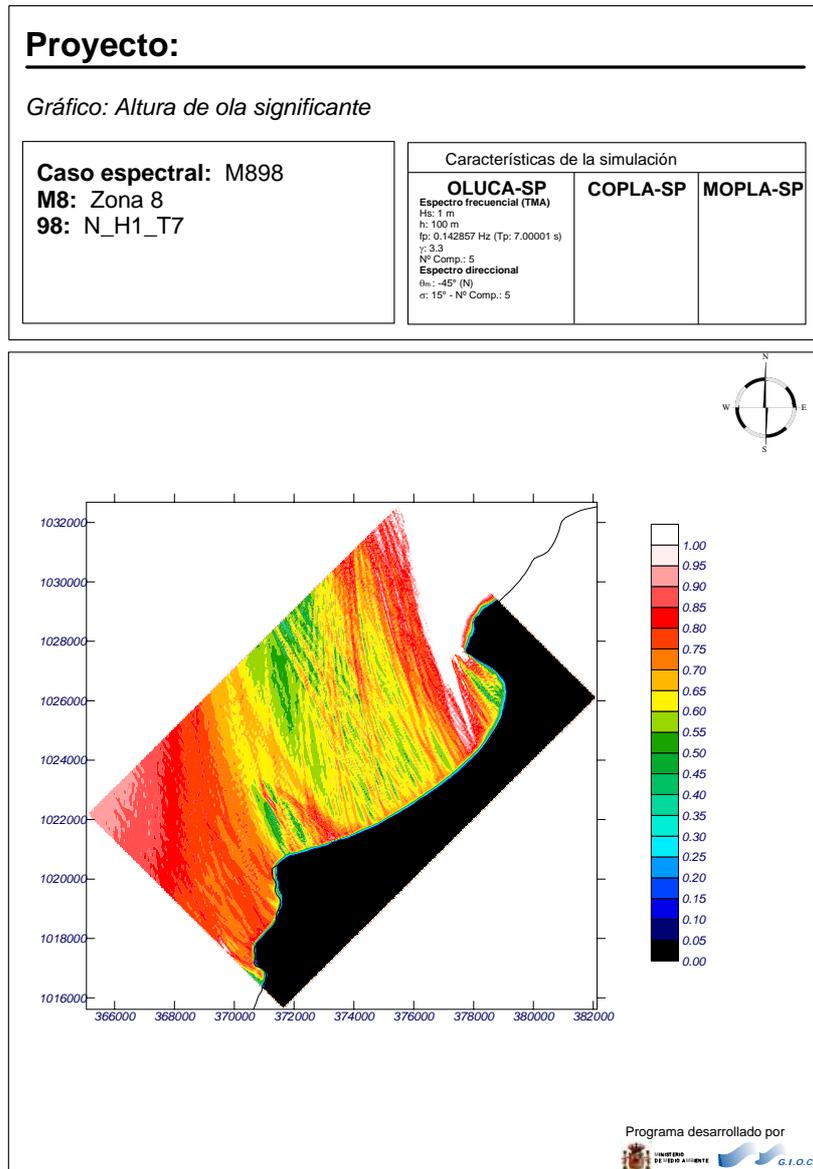


Figura 4.52 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 8. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

El gráfico de vectores de oleaje muestra una concentración de energía entre Punta La Rada y Manzanillo, lo que demuestra que una de las principales causas de la erosión en esta zona es la dinámica impuesta por los patrones de oleaje.

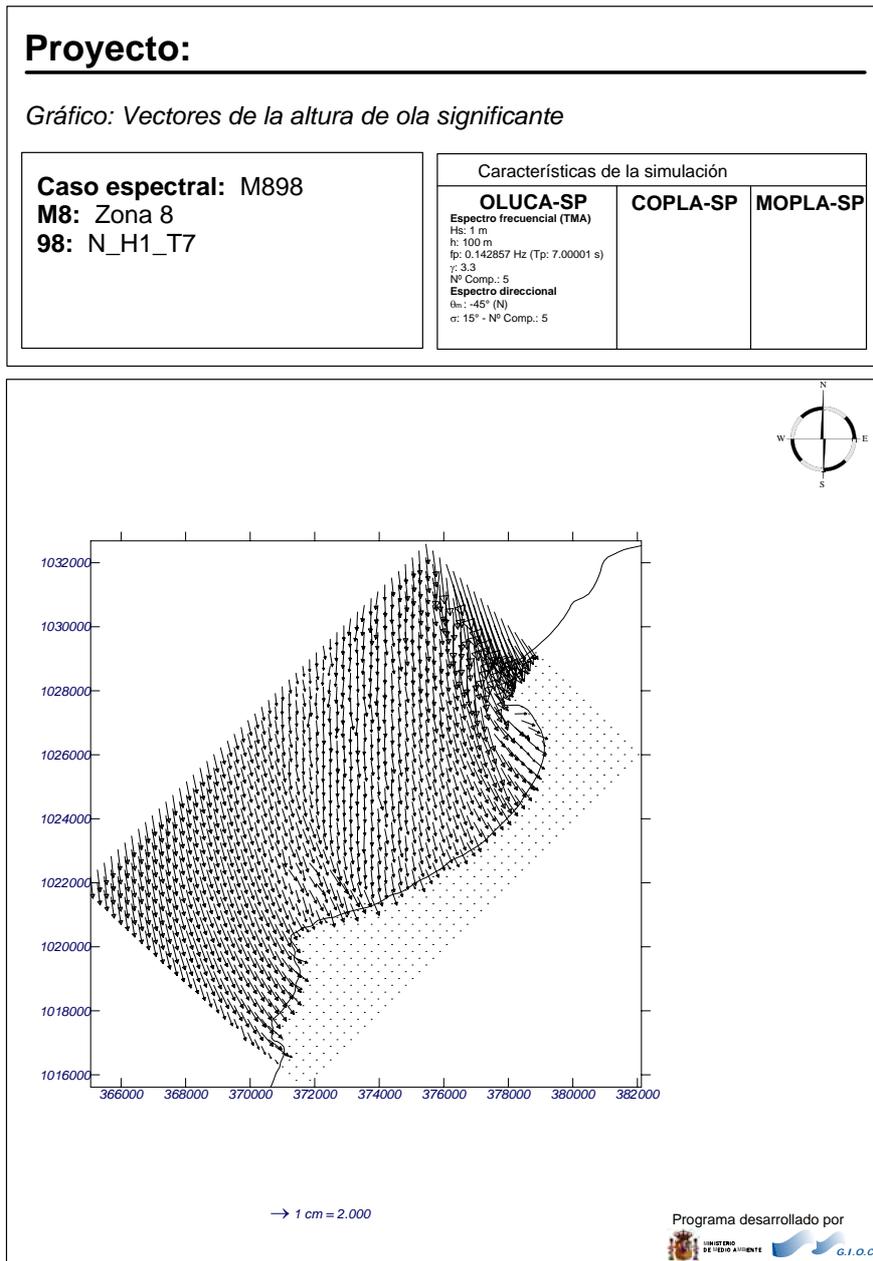


Figura 4.53 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 8. Vectores de oleaje.
 Caso: $\theta = N$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

b) Regímenes medios

La metodología utilizada para el cálculo de los regímenes medios de H_s es la misma que se utilizó para el análisis de datos en profundidades indefinidas. En la siguiente figura se presenta el régimen medio de altura de ola significativa en el tramo medio de esta zona. Los cálculos se han hecho a una profundidad de 3 m, buscando representar más ampliamente el oleaje en profundidades someras.

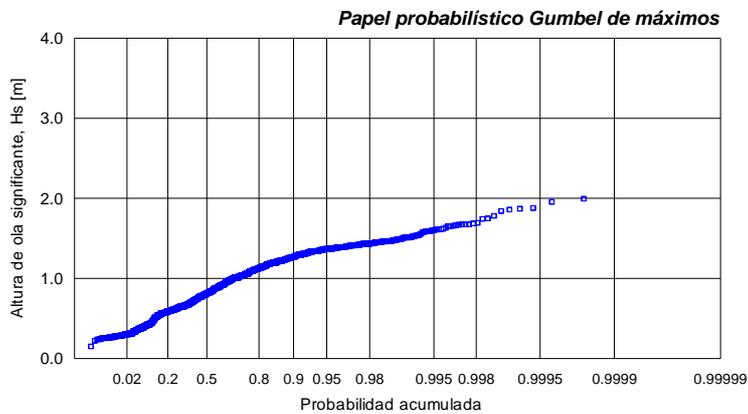


Figura 4.54 Régimen medio de oleaje en la zona 8 a una profundidad de 3 m.

Zona 9: Entre Punta La Rada y Delta de Tinajones:

a) Resultados de las propagaciones

Los resultados de las propagaciones realizadas para los dos casos de ejemplo, tanto para las isoalturas de ola como para los vectores de oleaje en la malla de propagación, se presentan, respectivamente, en las figuras siguientes.

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: N1E6
N1: Zona 9
E6: N_H1_T7

Características de la simulación				
OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP		
Espectro frecuencial (TMA) Hz: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) r: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θw: -45.94° (N) σ: 15° - Nº Comp.: 5				

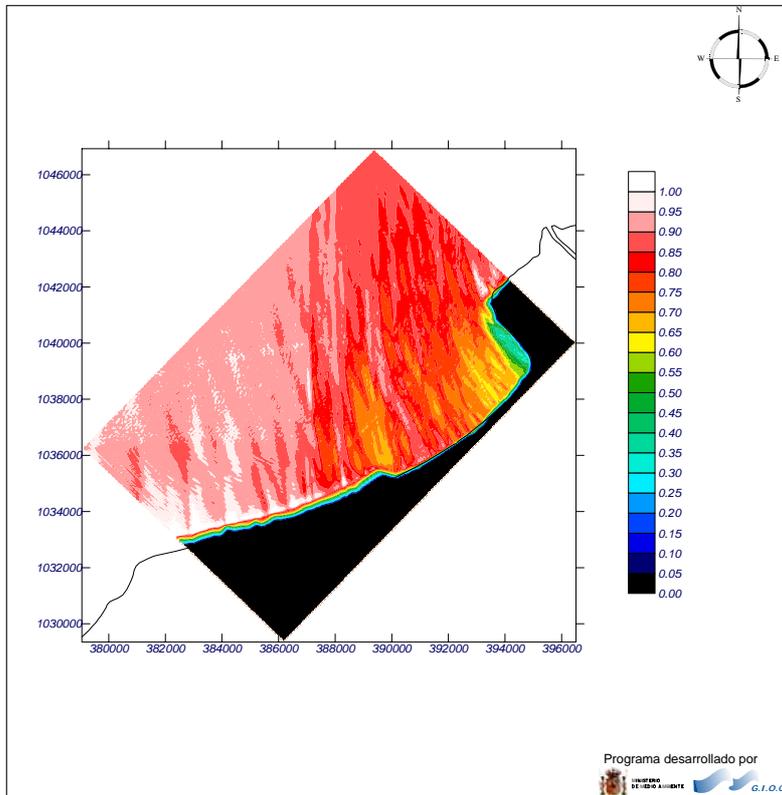


Figura 4.55 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Como ya se ha venido mencionando a lo largo de este informe, el Delta de Tinajones juega un papel importantísimo en la dinámica litoral de la zona de estudio. Por un lado, la variación en la descarga de sedimentos influye directamente en el equilibrio de este tramo litoral. Por otro, los cambios en su morfología pueden retener sedimentos que antes viajaban hacia el Sur (como se explicará con más detalle en el Capítulo 5). Pero además, como se observa en estas figuras, la batimetría somera, producto de la depositación de sedimentos en la desembocadura del río, modifica intensamente los patrones de oleaje.

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: N1E6
N1: Zona 9
E6: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θa: -45.94° (N) σ: 15° - Nº Comp.: 5		

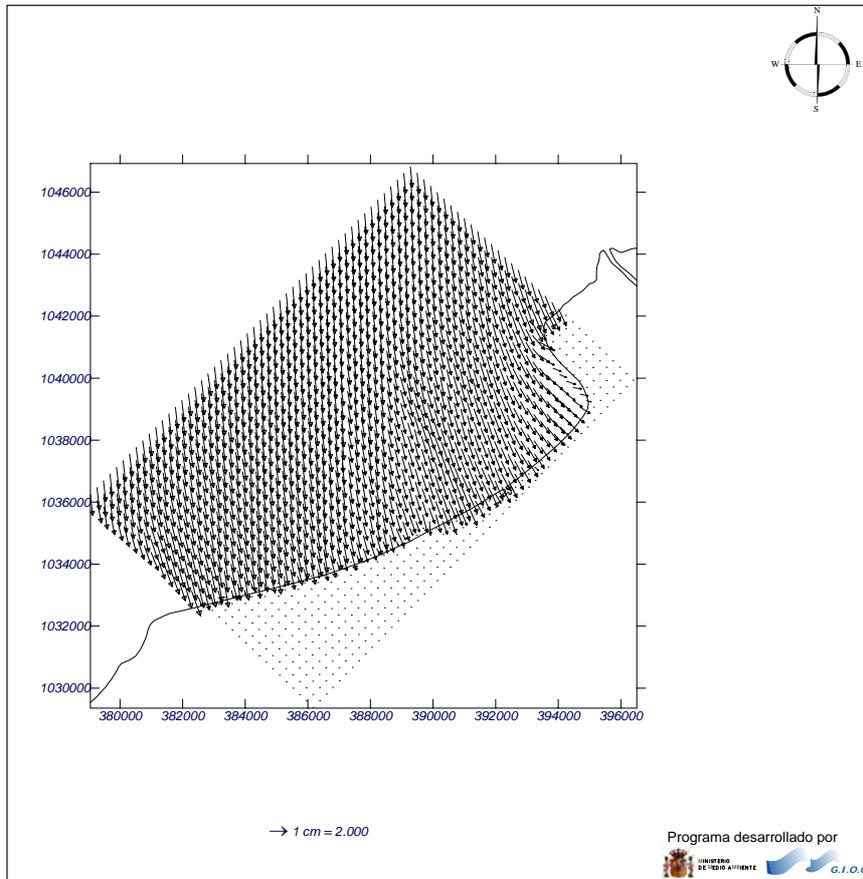


Figura 4.56 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Vectores de oleaje.

Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Nótese en los casos propagados del Norte cómo el oleaje sufre una fuerte refracción desde muy lejos de la línea de costa construida por el delta. Esta refracción es una consecuencia de una zona muy somera. Este fenómeno mantiene más abrigada, frente a dichos oleajes, a la parte Norte de la playa de Los Venados.

Proyecto:

Gráfico: *Altura de ola significativa*

Caso espectral: N1F8
N1: Zona 9
F8: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θs: -0.94° (N45.0W) σ: 15° - Nº Comp.: 5		

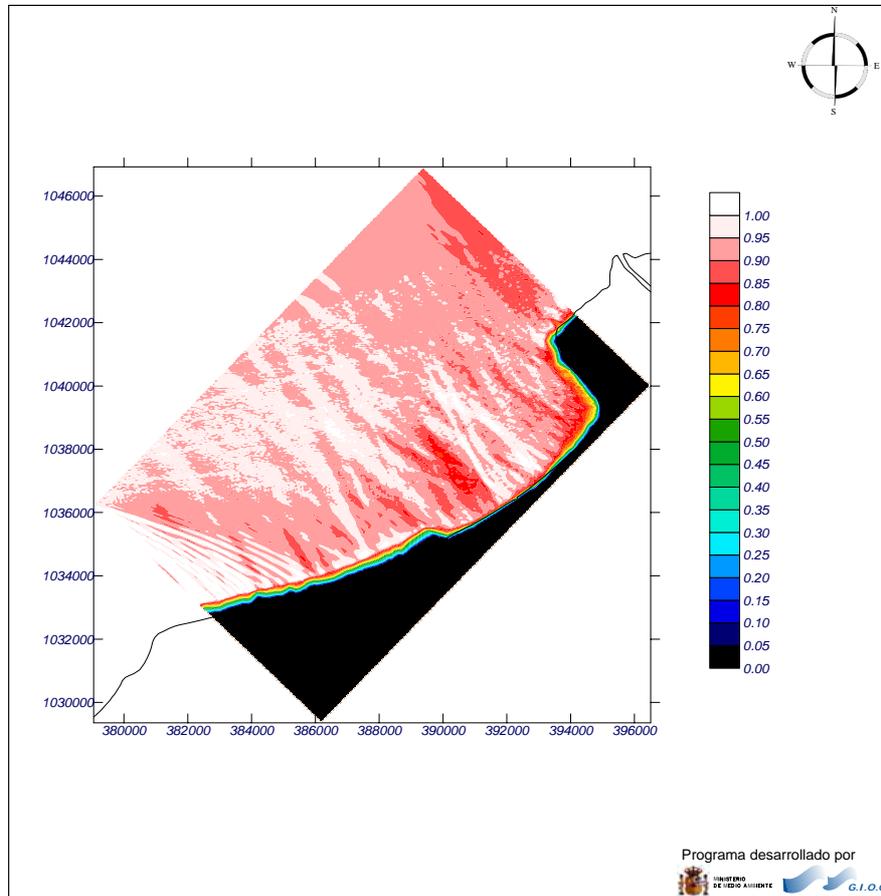


Figura 4.57 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Isoalturas de ola.

Caso: $\theta = NW$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Proyecto:

Gráfico: Vectores de la altura de ola significativa

Caso espectral: N1F8
N1: Zona 9
F8: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θs: -0.94° (N45.0W) σ: 15° - Nº Comp.: 5		

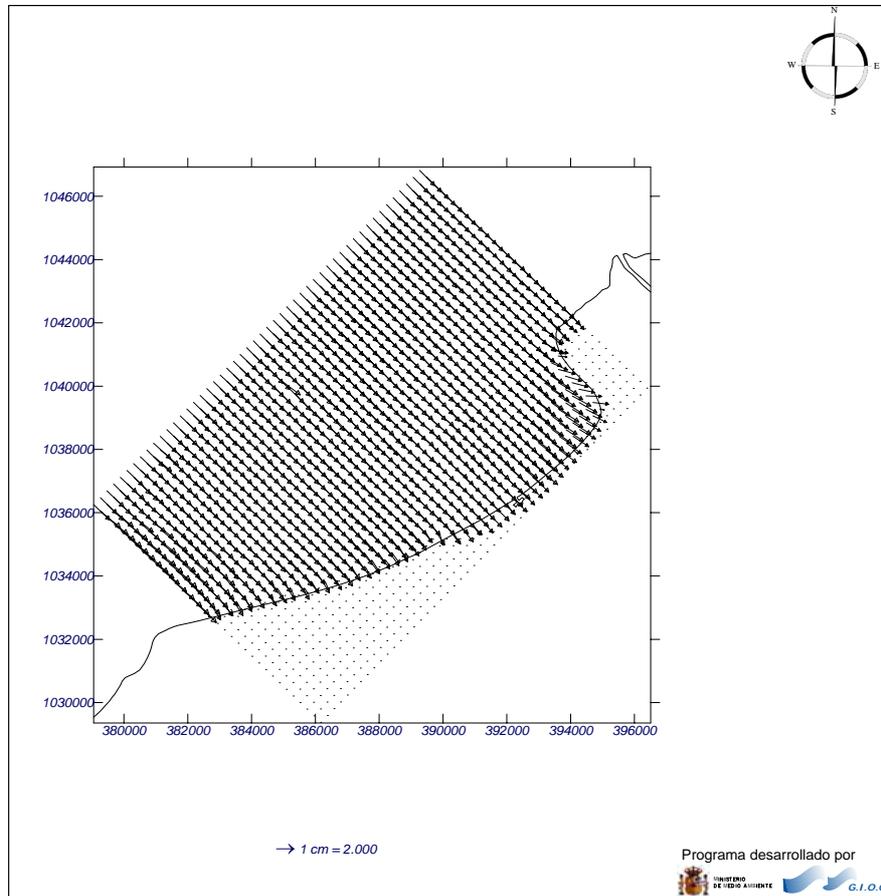


Figura 4.58 Resultados de la simulación de oleaje en la Zona 9. Vectores de oleaje.

Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

4.4. SISTEMAS CIRCULATORIOS DE CORRIENTES

La rotura del oleaje genera una corriente, fundamentalmente paralela a la playa, que es función del ángulo con el que el oleaje incide a la costa (corrientes de incidencia oblicua) y de su altura de ola. Estas corrientes, denominadas corrientes longitudinales, son de especial importancia en la disposición de equilibrio de una playa y, más concretamente, en su forma en planta, dado su importante capacidad de transporte de arena.

En efecto, las corrientes longitudinales se producen en la zona de rotura del oleaje y, por tanto, en un área donde el sedimento se encuentra en suspensión (por la acción propia de la rotura del oleaje) y es fácilmente transportable por efecto de dichas corrientes. De este modo, para que una determinada forma en planta esté en equilibrio es necesario que, o bien no existan corrientes longitudinales, o bien que, aún existiendo, el gradiente de transporte generado por éstas sea nulo.

4.4.1 Modelo numérico de simulación de corrientes de oleaje

La determinación de estas corrientes longitudinales puede ser obtenida por medio de expresiones analíticas en ciertos casos de geometrías de playa simples. En el caso que nos ocupa, la complejidad de los contornos y de la batimetría existente, dan como resultado que estas corrientes sólo puedan ser calculadas por métodos numéricos. Para el presente estudio se ha utilizado como modelo de cálculo de corrientes asociado a la rotura del oleaje, el modelo COPLA desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria. Básicamente, en lo que refiere a las corrientes por rotura, el modelo determina el tensor de radiación del oleaje a partir de los resultados obtenidos de altura e incidencia del oleaje obtenidos en la propagación, calculando el campo de corrientes y niveles debido a dichos tensores de radiación por medio de un modelo no-lineal que resuelve las ecuaciones integradas de Navier-Stokes. Una descripción más detallada acerca de este modelo se recoge en el Anexo 4 de este documento.

Del conjunto de simulaciones de oleaje del apartado anterior, se han obtenido con el COPLA los sistemas de corrientes asociados.

4.4.2 Sistemas circulatorios en playas

Con base en las propagaciones de oleaje descritas en el apartado anterior, procedemos a analizar el sistema de corrientes inducido por dichos oleajes. El análisis se ha llevado a cabo para la zona 3, la de mayor riesgo desde el punto de vista de la erosión del litoral. A continuación se presentan los resultados del análisis. Dada la gran cantidad de casos ejecutados y, por ende, gráficas de resultados, se presentan en este documento el análisis para un caso típico del Norte y otro típico del Noroeste, ambos con $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s; los demás resultados se presentan en el Anexo 5.

Las corrientes longitudinales producidas por la rotura del oleaje en la Zona 3, entre las poblaciones de Arboletes y Punta Rey tienen patrones diferentes para los distintos casos de oleaje propagados. Así, los casos del Norte generan corrientes en sentido Sur en toda la zona. Las mayores se observan entre Punta Rey y Minuto de Dios, con magnitudes que llegan hasta los 0.2 m/s. Frente a la población de Arboletes, estas corrientes alcanzan velocidades de 1.5 m/s.

Los casos del NW muestran un patrón diferente. Entre Punta Rey y Minuto de Dios generan las mismas corrientes que los oleajes del Norte, debido principalmente a la refracción, lo que implica un transporte de sedimentos en sentido Sur bajo cualquier condición de oleaje y, por ende, durante todo el año. Esto explica las tasas de erosión tan altas vistas por los habitantes de ese tramo litoral y comprobadas en el análisis histórico presentado en el Capítulo 3. Entre el río Jobo y Arboletes, las corrientes en los oleajes del NW adquieren otro comportamiento al visto en los oleajes del N. En vez del sentido NE- SW visto en esos casos, en estos se invierte, mostrando un sentido SW-NE. Es decir, cuando el oleaje proviene del W o del NW, las corrientes que vienen de Punta Rey en sentido N-S y las que van de Arboletes en sentido SW-NE, se anulan unos 300 m al N de Arboletes.

Proyecto:

Gráfico: Velocidad de Corrientes

Caso espectral: M202
M2: Zona 3
02: N_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5 Espectro direccional θ _m : -40° (N) σ: 15° - Nº Comp.: 5	Rugosidad de Nikuradse K _{swc} : 1 m Viscosidad de remolino α: 15 m ² /s	

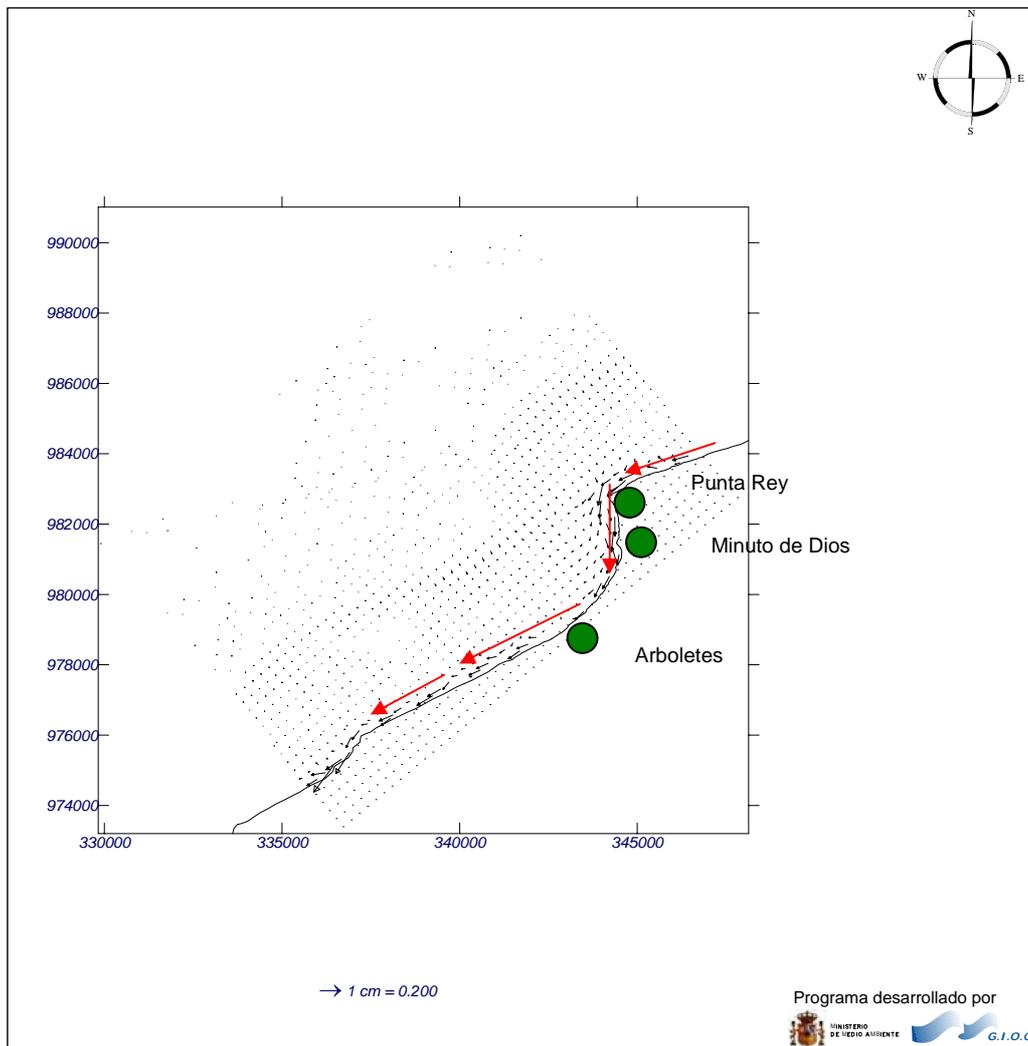


Figura 4.59 Resultados de la simulación de corrientes de oleaje en la Zona 3.
 Caso: $\theta = N$, $H_s = 1$ m, $T_p = 7$ s

Proyecto:

Gráfico: Velocidad de Corrientes

Caso espectral: M214
M2: Zona 3
14: NW_H1_T7

Características de la simulación

OLUCA-SP	COPLA-SP	MOPLA-SP
Espectro frecuencial (TMA) Hs: 1 m h: 100 m fp: 0.142857 Hz (Tp: 7.00001 s) γ: 3.3 Nº Comp.: 5	Rugosidad de Nikuradse Kswc: 1 m	
Espectro direccional θ _m : 5° (N45.0W) σ: 15° - Nº Comp.: 5	Viscosidad de remolino ε: 15 m ² /s	

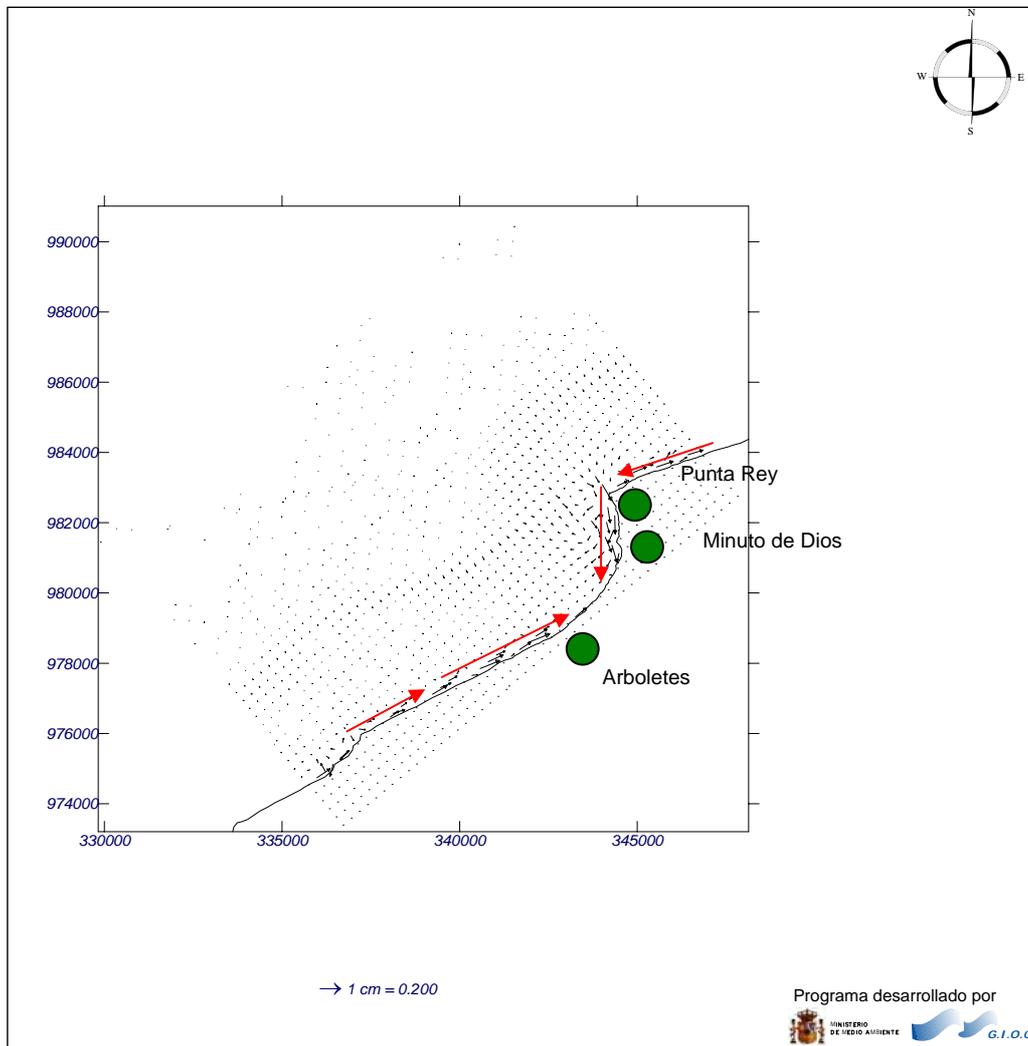


Figura 4.60 Resultados de la simulación de corrientes de oleaje en la Zona 3.
 Caso: $\theta = \text{NW}$, $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7 \text{ s}$

4.5. HIDROLOGÍA

Como ya se ha mencionado, los aportes sedimentarios a la zona son determinantes para garantizar el equilibrio de la costa estudiada. Con el ánimo de contribuir al entendimiento de los procesos que gobiernan morfodinámicamente el tramo litoral comprendido entre el Delta de Tinajones y Punta Caribana, se redacta el presente capítulo. El río Sinú es el elemento que determina la dinámica fluvial y de descarga sedimentaria de la zona, razón por la cual se hace especial énfasis en el análisis de sus regímenes de caudales.

4.5.1 El río Sinú

Breve descripción de la cuenca

La cuenca hidrográfica del río Sinú abarca una superficie de 15600 km², siendo la de mayor extensión superficial de Córdoba. Sus límites oriental y occidental están definidos por las divisorias con las cuencas vertientes de los ríos San Jorge y Mulatos, respectivamente. Por el Sur, la cuenca del río Sinú está delimitada las estribaciones de la Cordillera Central, que constituyen el límite territorial de Antioquia y Córdoba. Al Norte, limita con las aguas del Mar Caribe (Figura 4.61).



Figura 4.61 Cuencas de los ríos Sinú y Mulatos

Desde su nacimiento, el río Sinú recorre la cuenca en sentido Sur-Norte en una longitud cercana a los 370 km. Su desembocadura ha sufrido una gran variación en las últimas décadas, tal como se verá en el Capítulo 5.

Datos de partida

La evaluación de los recursos disponibles en un punto determinado de un curso fluvial requiere del adecuado conocimiento de un buen número de factores. Entre ellos cabe destacar las características geomorfológicas de la cuenca vertiente a ese punto (superficie, pendiente), el tipo de cubierta vegetal, las condiciones de permeabilidad del suelo y de la roca subyacente y las condiciones climatológicas (precipitación y evapotranspiración).

El cálculo de los recursos se realiza habitualmente empleando una herramienta numérica para la que es necesario especificar el valor de numerosos parámetros que representan y cuantifican los aspectos anteriores. Como tal, dicha herramienta requiere de un proceso de calibración y validación con el que se consigue que los valores especificados para los diferentes parámetros representen adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca. Además es necesario tener en cuenta que el régimen natural de los cursos fluviales puede verse alterado por la presencia de embalses o bien por la existencia de detracciones de caudal y vertidos.

Sin embargo, el procesamiento de esta información carece de sentido cuando se cuenta con estaciones de aforo en puntos de la red fluvial de la cuenca, como en el caso del río Sinú. En particular, el IDEAM tiene ubicada una estación limnigráfica, con código 1307706, en el sitio Cotoca Abajo, justo en el punto con coordenadas (9°13N, 75°51W). El instrumento registra tanto los caudales como los niveles y la carga sedimentaria del río Sinú en ese punto desde febrero de 1970. La Figura 4.62 muestra el sitio de localización de la estación.

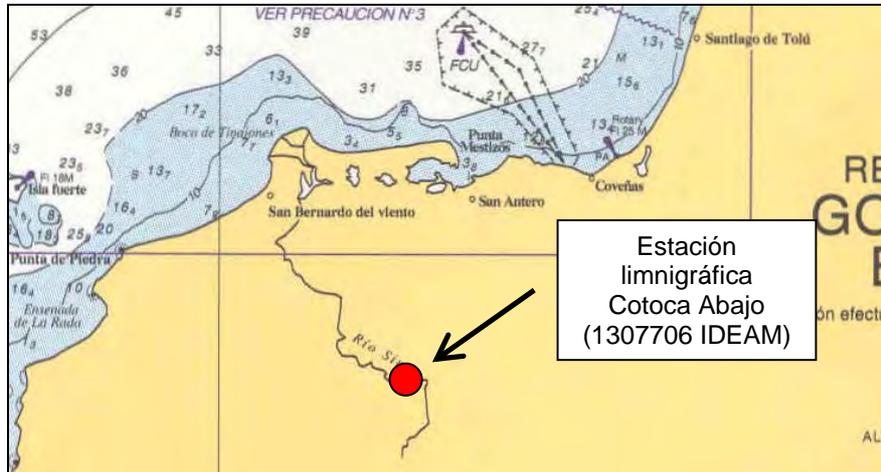


Figura 4.62 Localización de la estación limnigráfica Cotoca Abajo en el río Sinú

Si bien la estación no está localizada justo en la desembocadura del río Sinú, el régimen de caudales puede considerarse representativo de las descargas líquidas y sólidas que éste hace al mar Caribe.

Resultados

La Figura 4.63 muestra los caudales medios mensuales de toda la serie de datos analizada. El comportamiento es típico de los ríos de la zona, con mínimos en el trimestre EFM y un repunte en el mes de abril. Nótese que el caudal medio mensual multianual es de 390 m³/s aproximadamente, variando entre 50 m³/s como mínimo en marzo y 580 m³/s como máximo en octubre.

En la Figura 4.64 se presenta la variación temporal de los caudales medios anuales. En esta gráfica se aprecia claramente un pulso de entre 3 y 5 años de período que gobierna las descargas fluviales del río Sinú.

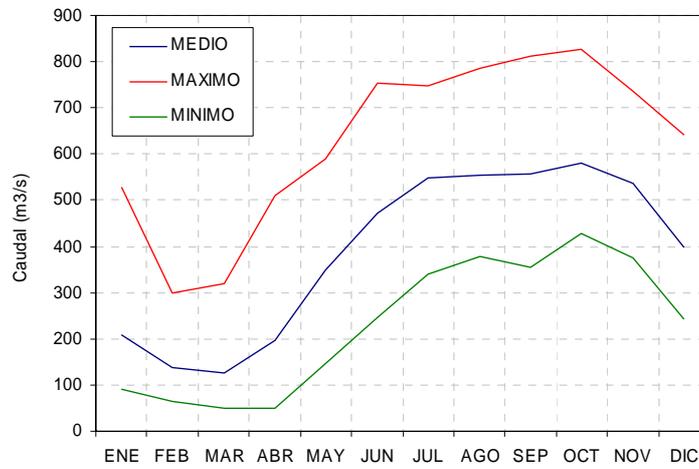


Figura 4.63 Caudales medios mensuales del río Sinú en la estación Cotoca Abajo

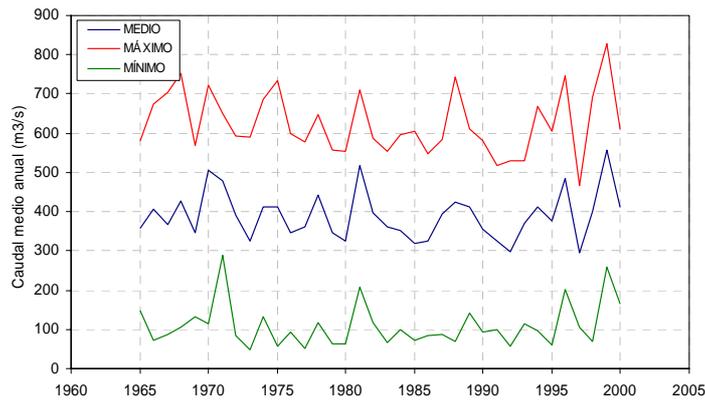


Figura 4.64 Variación temporal de los caudales medios anuales del río Sinú en la estación Cotoca Abajo

La tabla 4.6 presenta el resumen de los datos utilizados para el análisis de caudales en la estación Cotoca Abajo.

Tabla 4.6 Caudales medios mensuales del río Sinú en Cotoca Abajo

ANO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1965	189.1	146.2	202.6	329.3	514.1	247.6	346.4	448.6	532.6	582.1	520.8	241.9	358.44
1966	249.4	157.4	72.1	142.2	291.3	482.3	667.4	643.9	674.6	634.2	493.2	379	407.25
1967	145.7	118.1	87.1	132.9	262	566.9	704.2	704.8	506.9	438.6	377	350.6	366.23
1968	107.9	104.7	155.5	201.1	471.4	752.4	741.7	613.8	556	681.5	492.8	265.1	428.66
1969	161.9	131.2	133.1	167.2	213.4	448.6	542	570.1	530.3	487.3	395.1	367.9	345.68
1970	302.7	262.6	112.9	254.5	416.6	618.1	712	687.1	704.7	721.9	650.9	632.3	506.36
1971	527.9	298.7	318.3	288.9	412.4	486.2	567.7	557	609	648.9	634.1	389	478.18
1972	274.2	138.8	85.66	184.5	437.8	592.4	517.4	452.7	522.5	590.3	541.5	350.3	390.67
1973	134.6	68.28	48.78	49.06	205.9	307.9	432.9	479.5	498.6	558.3	590.9	528.1	325.24
1974	344.2	162.9	131.6	198	430.9	514.1	437.4	456.4	479.9	603	686.2	491.1	411.31
1975	185.9	77.22	68.45	58.19	199.3	337.4	539.8	642.9	711.9	734.2	735.9	643.3	411.21
1976	329.5	162.4	93.9	147.1	289.2	458.4	598.1	452.9	399	496	464.9	278.4	347.48
1977	94.66	76.36	49.99	102.4	291.8	489.7	579.2	556.3	539.9	539.1	547.2	466.9	361.13
1978	134	133	115.9	314.2	473.3	646.4	648.5	613.4	561.9	597.3	614	466.8	443.23
1979	179.6	64.28	64.32	121	314.2	432.8	517.7	498	550.3	555.4	496.2	361.7	346.29
1980	153.4	156.4	63.6	87.6	203.2	338.9	476.4	553.1	443.6	537	498.6	387.2	324.92
1981	206.5		292.9	510.8		670.7	684.5	608.5	711.7	622.9	503.5	353.2	516.52
1982	231.8	213.3	118.4	206.7	430.2	525.4	582.7	576.9	506.8	588.4	498.8	286	397.12
1983	132.3	65.25	80.84	171.1	350.3	484.8	524.8	501.4	519.4	526.9	553.3	424.7	361.26
1984	224.4	130.6	120.5	98.29	199.8	301.2	460	545	578.2	595.4	571.2	390.1	351.22
1985	174.5	88.27	73.39	147.2	147.6	313.8	372.2	471.5	605.7	597.3	506.3	348.1	320.49
1986	154.5	152.2	85.66	307.5	410	388.5	546.7	377.5	355.4	454.6	376.3	279.7	324.05
1987	148.4	152.9	86.2	242.1	440.9	450.5	486.6	584.1	578.6	579.6	529.9	438	393.15
1988	184.2	109.7	70.36	211.3	324.4	455.3	523.8	708.3	742.4	632.4	651.2	474.7	424.01
1989	317.8	141.4	180.6	160.2	352	509	545.2	571.5	558.3	610.9	577.1	439.3	413.61
1990	202.1	109.4	92.16	140.7	323.7	450.2	450.2	474.4	455.3	516	580.4	461.9	354.71
1991	198.5	99.19	124.4	101	284	431.3	492.5	456.9	416.3	518	438.8	333	324.49
1992	133.9	63.41	55.98	70.41	288.2	308.5	339.7	472.8	492.2	529.8	458.8	362.1	297.98
1993	197.7	138.2	115.2	227.8	434.1	450.4	529.2	470.6	443.7	469	504	478.2	371.51
1994	230.2	97.94	95.43	230.7	437.1	470.7	480	523.2	597.4	669.7	637	490	413.28
1995	213.8	90.7	61.5	150.2	286.6	432.4	559.8	563.3	605.5	586.8	559.4	395.9	375.49
1996	310.9	202.6	299.2	290.2	501.8	635.1	746.4	710.9	689.2	612.9	495.6	305.2	483.33
1997	144.8	174.9	105.6	121.7	279.5	411.4	466.8	410.7	362.5	427.6	399.6	243.4	295.71
1998	92.2	101.4	68.7	155.9	346.9	534.5	693	661.6	618.2	549.8	534.6	441.4	399.85
1999	291.1	259.7	306.5	459.6	590.5	609.5	684.4	786.7	812.9	827.4	695	359.4	556.89
2000	209.6	165.7	262.7	249.2	355.9	410	504.6	588.3	609.9	607	550.7	419.3	411.08
MEDIO	208.7	137.6	125	195.3	348.9	471.2	547.3	555.4	557.8	581.3	537.8	397.9	388.68
MAXIMO	527.9	298.7	318.3	510.8	590.5	752.4	746.4	786.7	812.9	827.4	735.9	643.3	827.4
MINIMO	92.2	63.41	48.78	49.06	147.6	247.6	339.7	377.5	355.4	427.6	376.3	241.9	48.78

Nota: Los valores de caudal están en m³/s
Los espacios en blanco indican insuficiencia de datos confiables en esos meses

Por último, se ha construido el régimen de caudales medios y máximos anuales del río Sinú en Cotoca Abajo, lo que puede considerarse el régimen medio de caudales anuales y el régimen extremal de caudales anuales, respectivamente. Para determinar dichos regímenes se ha hecho uso de la base de datos de caudales medios y máximos de cada uno de los años analizados y se ha obtenido la probabilidad acumulada, $i/(n+1)$, donde i es el número de orden del dato y n el número de años considerados. El período de retorno, Tr , asociado a dicha probabilidad se ha calculado como $Tr = 1/(1-P)$. Los resultados se presentan en la Figura 4.65, en la que se ha utilizado un papel probabilística Gumbel de máximos.

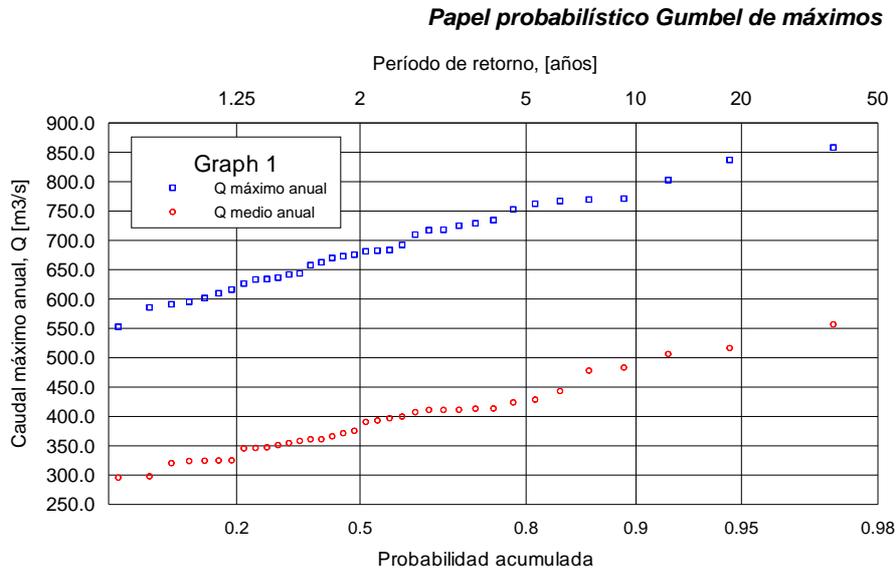


Figura 4.65 Regímenes de caudales del río Sinú en la estación Cotoca Abajo

Primero que todo, es de anotar la precisión del ajuste a este papel probabilístico. Véase que el caudal medio anual con 2.33 años de período de retorno es de 398 m³/s, mientras que el máximo anual con igual período de retorno es de 680 m³/s. Los caudales medios y máximos anuales asociados a un T_r de 10 años son 485 m³/s y 775 m³/s, respectivamente.

4.5.2 Otras descargas fluviales

Además del río Sinú, otros ríos y caños de mediana y pequeña magnitud vierten sus aguas y por ende, sus sedimentos al mar Caribe en el tramo estudiado. En la Figura 4.61 se muestra también la cuenca del río Mulatos, cuya extensión es de 2300 km² aproximadamente, la segunda más importante en el tramo Delta de Tinajones-Punta Caribana.

En la Figura 4.66 se presentan los caudales medios multianuales para los principales ríos y caños del litoral analizado. La tabla 4.7 presenta las características de cada una de las cuencas.

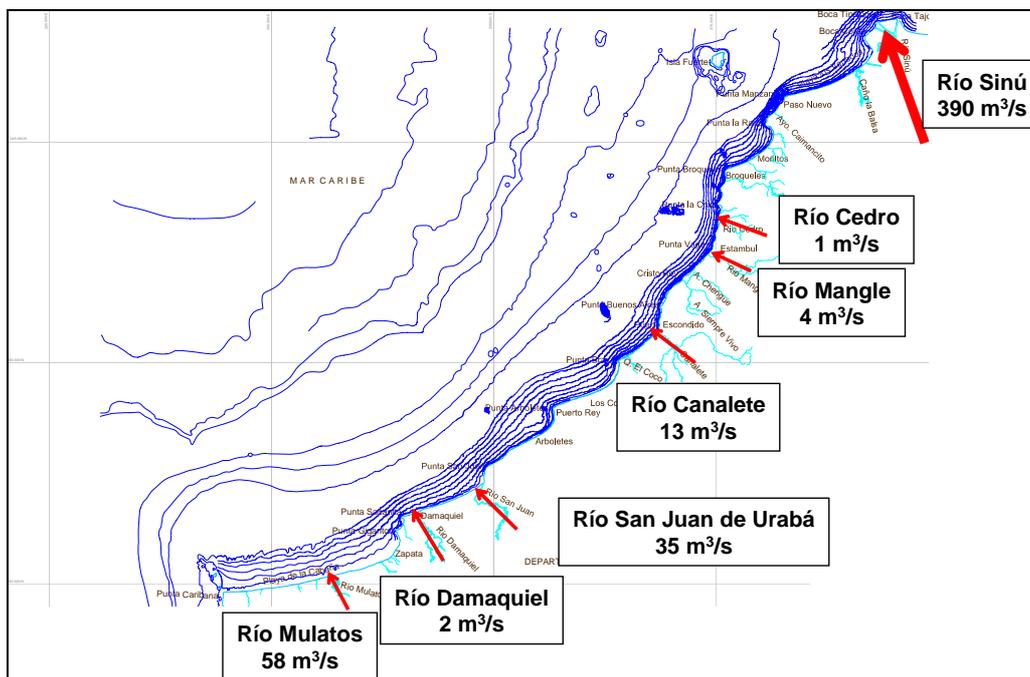


Figura 4.66 Principales descargas fluviales de la zona

Nótese, por ejemplo, que de no ser por los pequeños ríos Jobo y Arboletes, la zona más crítica desde el punto de vista de erosión del litoral no cuenta con aportes fluviales importantes, lo que puede influir en una mayor intensidad en el desequilibrio sedimentario. Los ríos San Juan de Urabá y Mulatos descargan, entre los dos, cerca de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ como promedio multianual, de tal forma que los sedimentos que arrastran sus corrientes pueden garantizar constantemente el flujo de arenas hacia las playas localizadas al Sur de sus desembocaduras. Localmente, los ríos Mangle, Cedro y Canalete también pueden garantizar ese equilibrio sedimentario en las playas aledañas a sus desembocaduras.

Tabla 4.7 Caudales medios multianuales en los diferentes ríos de la zona

Río	Área de drenaje (km ²)	Caudal (m ³ /s)
Sinú	15600	390
Mulatos	2227	57.7
San Juan de Urabá	1708	34.2
Canalete	977	12.9
Mangle	376	3.4
Damaquiel	74	1.67
Cedro	27	1.13

4.5.3 Aportes sedimentarios

Así como los ríos descargan sus aguas al mar Caribe, también aportan una gran cantidad de sedimentos que viaja con ésta en suspensión o transportada por el fondo. Con los datos obtenidos de la estación Cotoca Abajo en el río Sinú, es posible construir las gráficas que se muestran en las Figura 4.67 y Figura 4.68.

La primera de ellas muestra el comportamiento estacional de la descarga de sedimentos. Nótese una clara concordancia con los caudales líquidos. Las mayores descargas ocurren entre junio y noviembre, con valores medios de 0.35 kg/m³, y con mínimos aportes en los tres primeros meses del año. La Figura 4.68 muestra la variación temporal de esa descarga de sedimentos.

En la serie de datos, se ha observado un pico exageradamente alto de octubre de 1995, triplicando el máximo de ese mes, valor que no ha sido tenido en cuenta por la poca fiabilidad de la información durante ese año. Es posible que esa gran descarga ocurriera como consecuencia de algún trabajo de ingeniería aguas arriba de la estación, probablemente algo relacionado con el proyecto multipropósito Urrá I (entre finales de 1995 y principios de 1996 se comenzaron las obras para la desviación del río Sinú en la Angostura de URRÁ, necesarias para la construcción de la Presa -Tomado de <http://www.urra.com.co/antecedentes.htm>), aunque sería necesario un estudio más profundo para concluir sobre este tema.

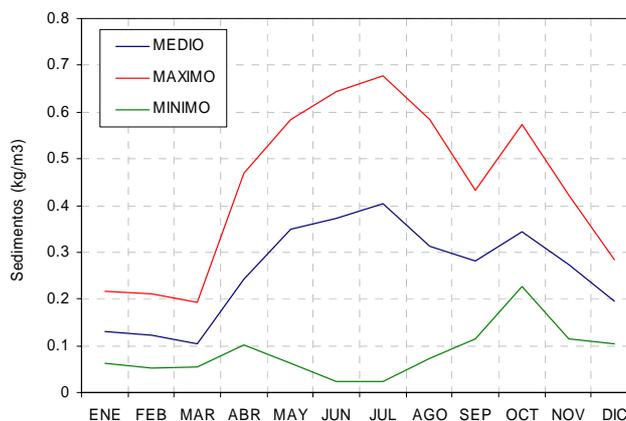


Figura 4.67 Descarga de sedimentos media mensual del río Sinú en la estación Cotoca Abajo

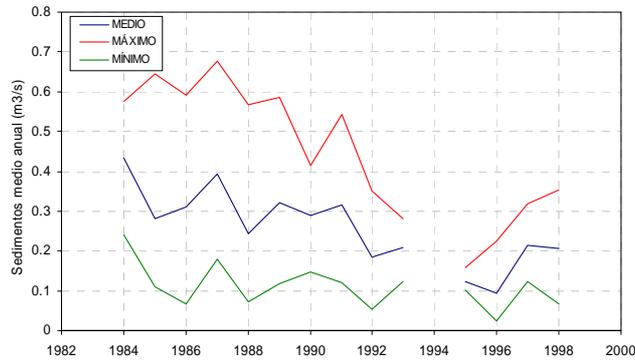


Figura 4.68 Variación temporal de la descarga de sedimentos media anual del río Sinú en la estación Cotoca Abajo

Dada la falta de registros de la carga de sedimentos de los demás ríos y a que entre el caudal líquido y el caudal sólido existe una relación lineal, tal como se muestra en la para los datos del río Sinú en la estación Cotoca Abajo, se ha estimado la carga de sedimentos en los ríos de la tabla 4.7. Los resultados se presentan en la tabla 4.8.

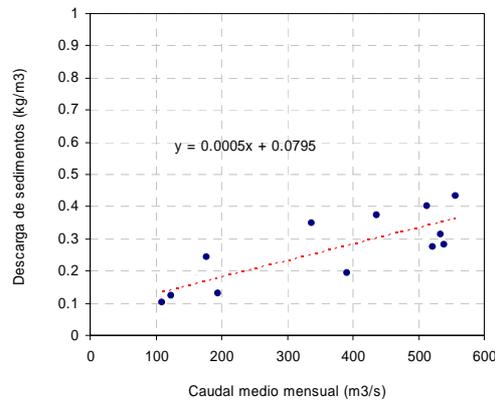


Figura 4.69 Relación entre los caudales medios mensuales y la descarga de sedimentos media mensual del río Sinú en Cotoca Abajo

Tabla 4.8 Carga media multianual de sedimentos estimada de los ríos de la zona

RÍO	Sinú	Mulatos	San Juan	Canalete	Mangle	Damaquiel	Cedro
Sedimentos Kg/m ³	0.27	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08

CAPITULO 5
DINÁMICA LITORAL



5. DINÁMICA LITORAL

5.1. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El estudio de la estabilidad de cada una de las playas del sistema Delta de Tinajones-Punta Caribana en su situación actual no se puede, ni debe llevarse a cabo, sin un análisis global de la unidad fisiográfica. No es posible entender los procesos que ocurren en cada playa sin conocer los procesos que ocurren en las zonas litorales de su entorno. En el presente capítulo se analiza la estabilidad y evolución de este sistema para poder proponer soluciones al problema de erosión identificado. Incluye, entonces, un análisis global y local del transporte litoral de arena en la zona.

Previo al desarrollo de dicho análisis se plantea, en este apartado, la metodología que se utilizará en la evaluación de la estabilidad de las playas, haciendo un énfasis especial en la Capacidad de transporte litoral, el balance sedimentario y evolución de la línea de costa y la estabilidad de la playa (forma en planta y perfil de equilibrio). Esta metodología se fundamenta en dos conceptos previos:

- Dimensionalidad de los procesos.
- Escalas de los procesos.

5.1.1 Dimensionalidad de los procesos

Todos los procesos hidrodinámicos y sedimentarios que acontecen en una playa son, en mayor o menor medida, procesos tridimensionales. Sin embargo, las limitaciones de las herramientas, formulaciones e incluso de nuestra capacidad de entendimiento de dichos procesos no nos permiten analizarlos en toda su complejidad. De este modo, surge como primera y más importante hipótesis de trabajo en el estudio de la estabilidad de una playa, la relativa a la ortogonalidad de los movimientos longitudinales y transversales de la misma.

De acuerdo con esta hipótesis de ortogonalidad, cualquier movimiento de una playa, como por ejemplo el ocurrido tras un temporal, puede ser analizado estudiando los movimientos longitudinales y transversales de la misma, los cuales se asume que son independientes entre si. Nótese que la hipótesis de ortogonalidad permite analizar la estabilidad de una playa estudiando por separado:

- Estabilidad del perfil de playa (eje transversal)
- Estabilidad de la planta de la playa (eje longitudinal).

La hipótesis de ortogonalidad es, en general, suficientemente aproximada a la realidad, especialmente en playas abiertas con estados morfodinámicos extremos (disipativas o reflejantes), tal como ocurre en la zona de estudio. En playas con estados morfodinámicos intermedios, o en playas encajadas con una forma en planta de gran curvatura, existe, sin embargo, una notable interacción planta-perfil, por lo que el análisis por separado del perfil y la planta debe realizarse con cautela, siendo necesario incorporar en el análisis los estados modales y la evolución de los estados morfodinámicos de la playa.

5.1.2 Escala espacial y temporal de los procesos

Las diferentes dinámicas que afectan a una playa se presentan en escalas espaciales que van desde los centímetros (turbulencia), hasta las decenas de kilómetros (marea) y en escalas temporales que van desde los segundos (olas) hasta las décadas (ascenso del nivel medio del mar). Como respuesta a dichas dinámicas la morfología de la playa cambia, a su vez, dentro de todas esas escalas: centímetros-kilómetros, segundos-decadas, véase Figura 5.1.

A pesar de la potencia de cálculo de los ordenadores, y de los intentos realizados en esa dirección, no es posible (ni adecuado) calcular los cambios que acontecen en las escalas superiores, por integración de los procesos de las escalas inferiores. Esto es debido a la falta de una teoría unificada de transporte de sedimentos que retenga la influencia de todos los efectos que se producen en las diferentes escalas espaciales y temporales.

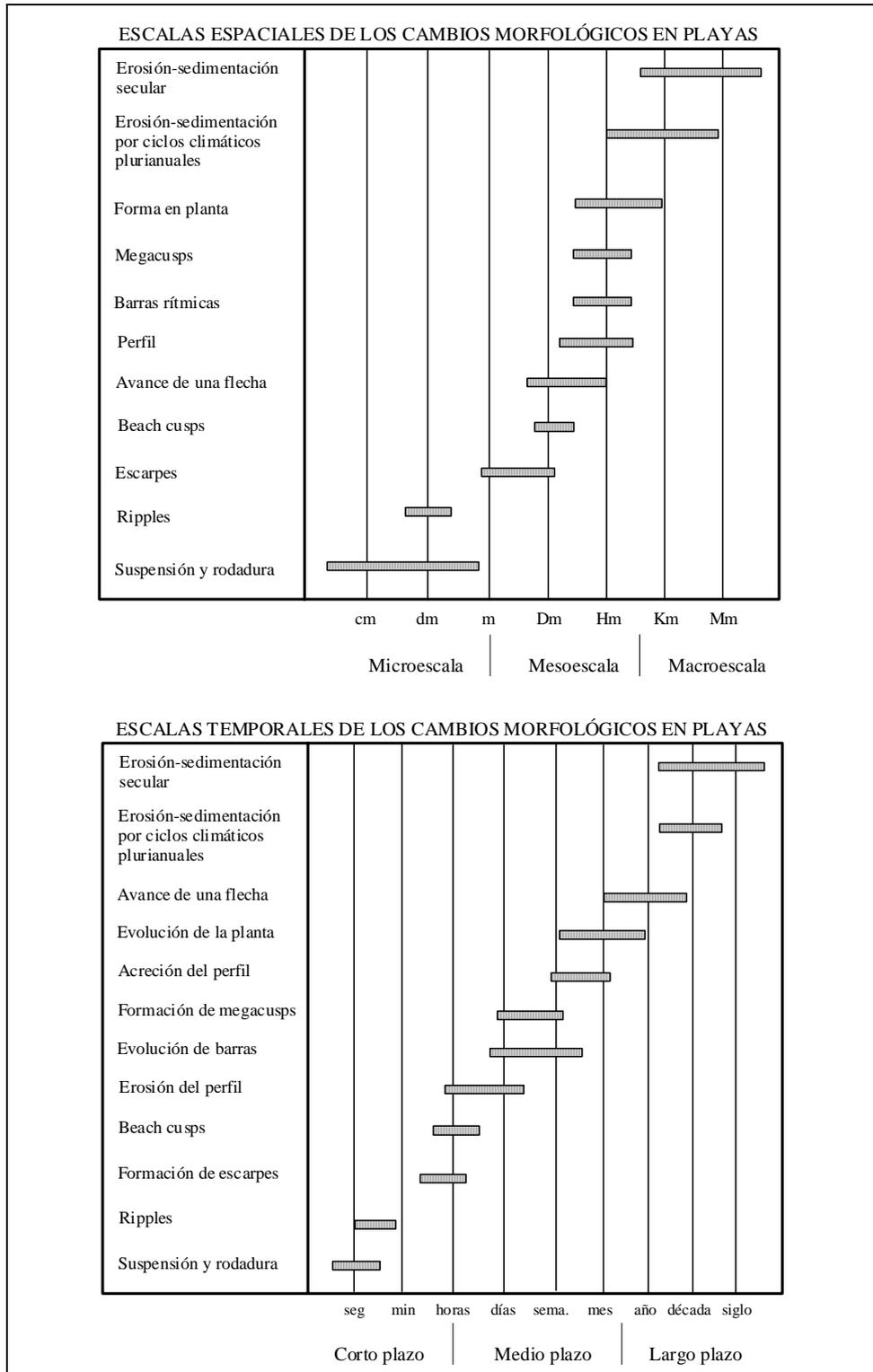


Figura 5.1. Escalas espaciales y temporales típicas de algunos cambios morfológicos de las playas

Esta carencia de teoría unificada da lugar a que los procesos que ocurren en diferentes escalas (de tiempo o espacio) deban ser analizados con diferentes herramientas o formulaciones. Es necesario, por tanto, conocer cuál es la escala de interés en cada problema particular y utilizar la formulación adecuada a dicha escala de interés.

Las escalas de las diferentes dinámicas y respuestas morfológicas de las playas suelen ser clasificadas en: Micro escala, Meso escala y Macro escala de acuerdo con la dimensión espacial y en corto plazo, medio plazo y largo plazo.

En el estudio de estabilidad y evolución de una playa las escalas de interés son la Meso escala (decenas-centenas de metro), Macro escala (km) y el largo plazo (años). Los elementos de escalas inferiores (por ejemplo, la erosión producida por un temporal) solo son relevantes si sus efectos permanecen en el tiempo, o en el espacio, en unidades cercanas a las de interés (por ejemplo, meses), o si su efecto provoca el fallo funcional de la obra (por ejemplo, el oleaje alcanza el trasdós de la playa).

El estudio de estabilidad y evolución se realizará, por tanto, con criterios y herramientas de largo plazo, verificándose posteriormente los eventos de corto plazo.

5.1.3 Metodología de cálculo

En conclusión, los elementos más relevantes de la metodología propuesta para el cálculo de estabilidad y evolución del litoral analizado son:

1. Se acepta, como hipótesis inicial, la ortogonalidad de los movimientos longitudinales y transversales de una playa. Consecuentemente, se admite que la estabilidad de la misma puede ser analizada estudiando la estabilidad de su forma en planta y su perfil.
2. Se separa el análisis de la estabilidad y evolución de la playa de acuerdo con las diferentes escalas de variabilidad de la misma. En particular se analiza la estabilidad a Largo Plazo (años) y Corto Plazo (temporal).

5.2. ANÁLISIS DE LARGO PLAZO

El objetivo del análisis a largo plazo es determinar cual será la forma final de la playa tanto en planta como en perfil, y/o la evolución temporal de dicha forma en escala de años. Siendo el objetivo de este análisis el asegurar que la funcionalidad de la playa se mantenga durante su vida útil.

Dentro de los objetivos del análisis en el largo plazo (escala de años a décadas), primero, debemos entender cuál ha sido la evolución temporal del tramo de costa desde una perspectiva global de toda la zona, lo que ya ha sido descrito en el Capítulo 3. Con base en este primer análisis, se procede a determinar el estado de equilibrio o desequilibrio de las playas en función de modelos morfodinámicos de largo plazo, haciendo uso de la hipótesis de ortogonalidad.

Las formulaciones existentes que intentan predecir la forma en planta y perfil de la playa, para esta escala de tiempos, no intentan analizar los procesos sino magnitudes agregadas de los mismos. Para el análisis del perfil y de la planta de una playa dos son los tipos de modelos más utilizados: los basados en la hipótesis de equilibrio y los basados en la ecuación de la difusión.

La hipótesis de equilibrio postula que si la acción de las dinámicas actuantes (marinas y sedimentarias) se mantiene indefinidamente junto con los contornos, la forma de la playa alcanzará una posición final constante, en equilibrio “estático” o “dinámico” con dichas dinámicas. En equilibrio “estático” el sistema de corrientes es prácticamente nulo (sin transporte litoral) y en equilibrio “dinámico” existe una corriente litoral acompañada de un transporte litoral. En la práctica no es necesario que la acción se mantenga indefinidamente sino que la respuesta de la forma sea mucho más rápida que la escala de interés.

En el caso del perfil, se asume que las modificaciones del mismo se producen en escalas de tiempo que pueden ser consideradas como instantáneas en un estudio a largo plazo, lo que implica que el perfil siempre alcanza la posición de equilibrio. En el caso de forma en

planta, también se puede analizar la forma final de equilibrio, por un lado, se podría conseguir una situación de equilibrio “estático”. En el caso de playas abiertas no encajadas, se podría llegar a una forma de equilibrio “dinámico”, siempre y cuando se mantenga un balance entre el suministro de sedimentos, la dinámica marina y los contornos.

La ecuación de la difusión se basa, en cierto modo, en el mismo concepto, y establece que la forma de una playa tiende hacia el equilibrio tanto más rápido cuanto más lejos se encuentre de dicha posición de equilibrio. Este tipo de formulaciones permiten determinar la evolución temporal de la forma de la playa y, por este motivo, se denominan modelos de evolución (por ejemplo, modelos de evolución de la línea de costa).

En lo que sigue se presenta la aplicación de esos modelos de planta y perfil de equilibrio al litoral estudiado, realizando adicionalmente una descripción de la evolución en el largo plazo de la desembocadura del río Sinú. Esta última con el fin de describir sus cambios, dada su importancia en la morfodinámica de toda la zona, tal como se ha venido mencionando en los capítulos anteriores.

5.2.1 ANÁLISIS EN PLANTA

Introducción

La forma en planta de una playa viene condicionada, principalmente, por el sistema de corrientes asociado a la rotura del oleaje, por el sedimento existente (cantidad, tamaño) y por los contornos o geometría donde ha de encajarse dicha playa. Las corrientes longitudinales son de especial importancia en la disposición de equilibrio de una playa y, más concretamente, en su forma en planta, dada su importancia en el potencial transporte de arena. Bajo la hipótesis ya planteada por Iribarren (1949), que una playa alcanza un estado de equilibrio estático cuando las corrientes netas longitudinales son nulas ($V \sim 0$), González (1995) a partir de una expresión analítica de corriente longitudinal nula, llega a la siguiente ecuación diferencial, la cual se cumple en playas en equilibrio estático:

$$C = F + \int_{H_0}^H K_2 dH \quad \text{que, integrando, queda:} \quad C = F + K_2 \Delta H$$

Donde la línea de costa en equilibrio, C , se define por el frente de ola en la zona de rotura, F , más una relación proporcional, K_2 , al gradiente longitudinal de altura de ola (ΔH). Cuando un oleaje incide en una barrera o dique, tal como se muestra en la Figura 5.2, se presentan efectos de refracción y difracción detrás del mismo, quedando definidas tres regiones desde el punto de vista del oleaje: La región 1, donde no existe efecto del dique sobre el oleaje, los gradientes de altura de ola son prácticamente cero y los frentes del oleaje permanecen invariables, en la región 2 se presentan gradientes de altura de ola y los frentes sufren solo efecto de refracción y la región 3 donde existen gradientes de altura de ola y giro de los frentes debido a la refracción-difracción del oleaje. El punto (P_0) de la Figura 5.2, corresponde al límite "aguas abajo" de la playa, donde no existen gradientes longitudinales de altura de ola debidos al dique y que de acuerdo al modelo, la costa en equilibrio es igual al frente de ola ($C = F$).

Existen formulaciones empíricas que permiten estimar cuál es la forma en planta de playas ubicadas en la zona de sombra de un cabo o elemento de protección (regiones 2 y 3 en la Figura 5.2).

Hsu *et al.* (1989) propusieron para la forma en planta de una playa la expresión:

$$\left(\frac{R}{R_0} \right) = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2$$

donde:

$R =$ radio vector, tomado desde el punto de difracción, que define la forma de la playa.

$R_0 =$ radio vector, tomado desde el punto de difracción, correspondiente al extremo no abrigado de la playa.

$C_0, C_1, C_2 =$ coeficientes (función de β).

$\beta =$ ángulo (fijo) formado entre el frente de oleaje y el radio vector R_0 .

$\theta =$ ángulo (variable) entre el frente de oleaje y el radio vector R .

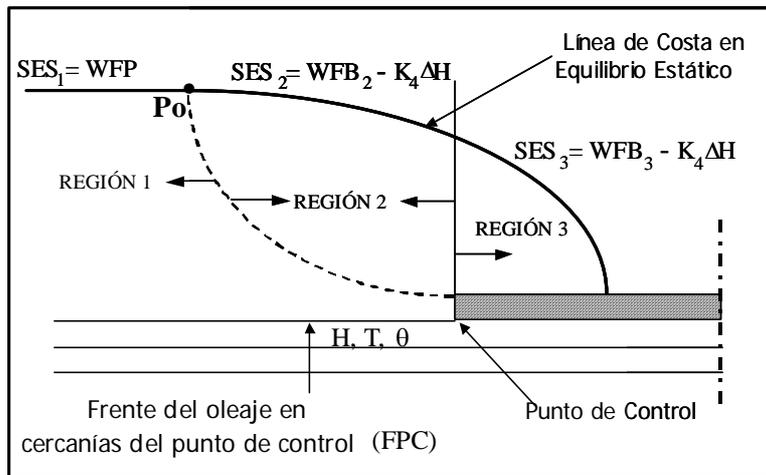


Figura 5.2. Esquema general de una playa encajada en equilibrio

González et al. (2000) plantea una metodología para el diseño de playas encajadas a partir de la formulación de Hsu. En el método desarrollado $\beta = 90 - \alpha_{min}$ (ángulo que define el límite entre las zonas 1 y 2 en el punto P_0), es función de: el número de longitudes de onda o distancia adimensional que exista hasta la línea de costa (Y/L), siendo Y la distancia a la línea de costa y L la longitud de onda y la dirección del frente del oleaje, que corresponde con la dirección del flujo medio de energía en la zona del polo de difracción (punto de control). En la Figura 5.3 se muestra de forma resumida la metodología de cálculo para obtener la forma en planta de equilibrio.

Nótese que en el caso que no exista punto de difracción, o que éste no afecte a la playa, la alineación de la misma será paralela al frente del oleaje que corresponde con la dirección del flujo medio de energía.

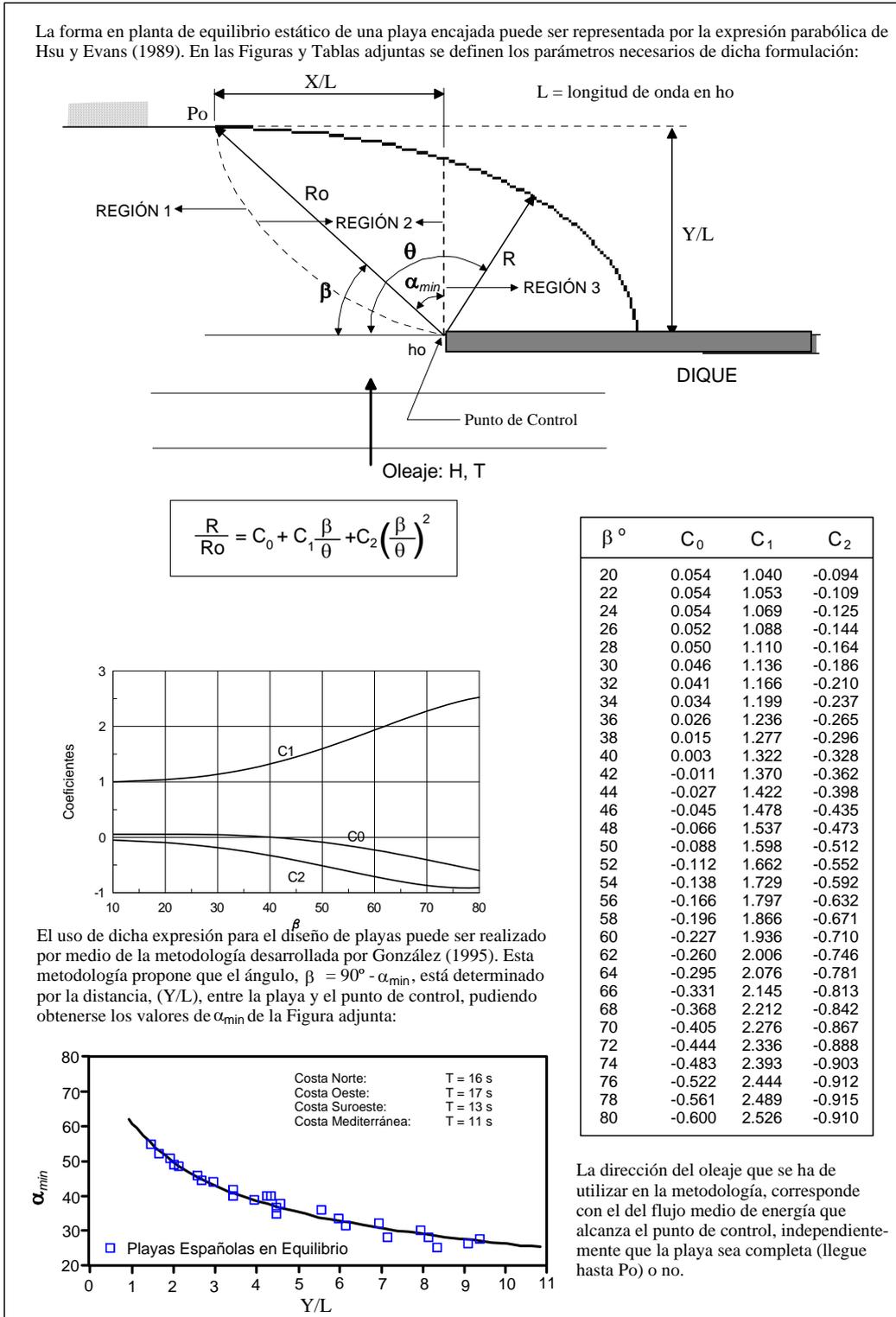


Figura 5.3. Metodología de cálculo para la forma en planta de equilibrio estático en playas encajadas.

Aplicación a la zona de estudio

Los diferentes tipos de formas en planta descritos en los párrafos anteriores, se pueden presentar a lo largo de un gran tramo de costa como el que existe entre el Delta de Tinajones y Punta Caribana. Como se mencionó en el apartado relativo a la evolución de la línea de costa (Capítulo 3), algunas zonas de este litoral se encuentran en estado de desequilibrio. Es decir, la situación no es la misma a lo largo de toda esta costa. Como veremos en la sección del cálculo del transporte litoral, hay zonas donde debido a su localización, orientación de la costa, contornos geológicos y la dinámica local, la capacidad de transporte de arena es menor, con lo cual, los procesos son más lentos, retrasándose en el tiempo.

A continuación se presenta un análisis, por zonas geomorfológicamente homogéneas (ver Capítulo 2), de la forma en planta de las playas.

Zona 1: Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla:

Las playas de esta zona, de 30 km de longitud, parecen ajustarse muy bien a la expresión teórica de playas en equilibrio planteada por Hsu y Evans (1989), tal como lo muestra la siguiente figura. En la figura se muestran los ajustes al modelo teórico hechos para las dos playas: Punta Caribana-Punta Gigantón y Punta Gigantón-Punta Sabanilla.

Al sur de la desembocadura del río Mulatos, la playa sigue una orientación recta $N72^{\circ}E$, en clara concordancia con la dirección del flujo medio de energía del oleaje, FE, en el punto de difracción, la variable que modela la orientación de este tipo de playas. Las líneas batimétricas también se ajustan muy bien a esta orientación.

Nótese cómo entre la desembocadura del río Mulatos y Punta Gigantón se aprecia una parábola que concuerda muy ajustadamente con el modelo teórico empleado, salvo algunas pequeñas irregularidades alrededor de la población de Zapata que obedecen a una variación local del oleaje y que pueden ser las responsables de la mayor erosión en esa pequeña zona. Entre Punta Gigantón y Punta Sabanilla una pequeña se ajusta todavía mejor a dicho modelo de Hsu y Evans (1989). Esto nos indica que, si bien puede

haber erosión, tal como se reseña en el Capítulo 3, ésta parece estar más asociada al retroceso de la línea de costa de toda la playa de manera homogénea. El proceso erosivo se notará, más claramente, en el análisis de los perfiles de playa, tal como se comentará en el siguiente apartado.

En ambos casos, el punto de difracción del oleaje se ha localizado a una distancia de $L/4$ medida desde el punto duro de apoyo de las playas, donde L es la longitud del oleaje que caracteriza al FE en el punto de difracción. Es decir, desde Punta Gigantón y Punta Sabanilla, respectivamente. Según González (1995), este es la distancia que debe considerarse para un estudio bajo condiciones reales.

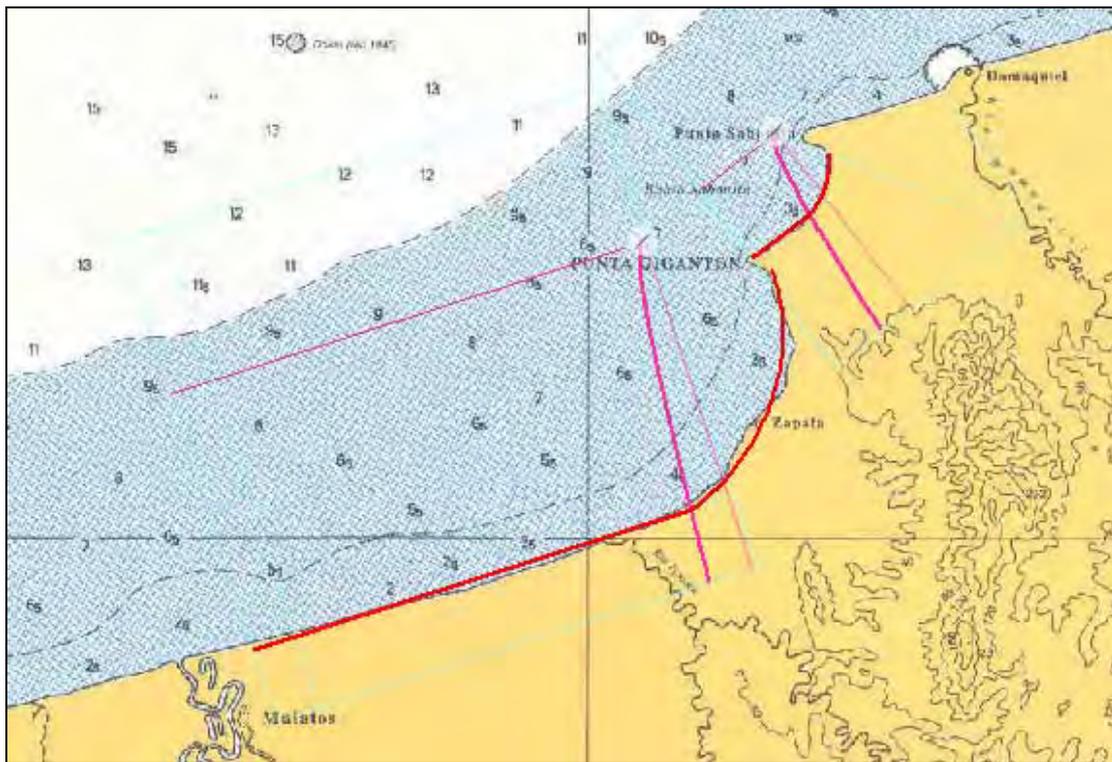


Figura 5.4. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 1.

Zona 2: Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan:

Como ya se ha comentado anteriormente, Punta San Juan parece constituir un saliente rocoso más marcado por procesos de tipo geológico que por procesos de tipo dinámico. Esta percepción se hace notable cuando se observa el brusco cambio en la orientación de la línea de costa justo en la desembocadura del río San Juan. La difracción del oleaje influye sobre un pequeño tramo litoral de cerca de 700 m, entre ese punto y el punto marcado por la intersección de la línea de color rosa y la línea de costa en la figura. Hacia el Sur de esa intersección y hasta Punta Sabanilla, la costa sigue la misma orientación, en una longitud de 15 km, que presenta el flujo medio de energía del oleaje tal como lo demuestra el paralelismo entre las líneas de color rojo (costa) y rosa (FE). El punto de difracción se ha localizado a una distancia de $L/4$, tal como se describió para la zona 1.

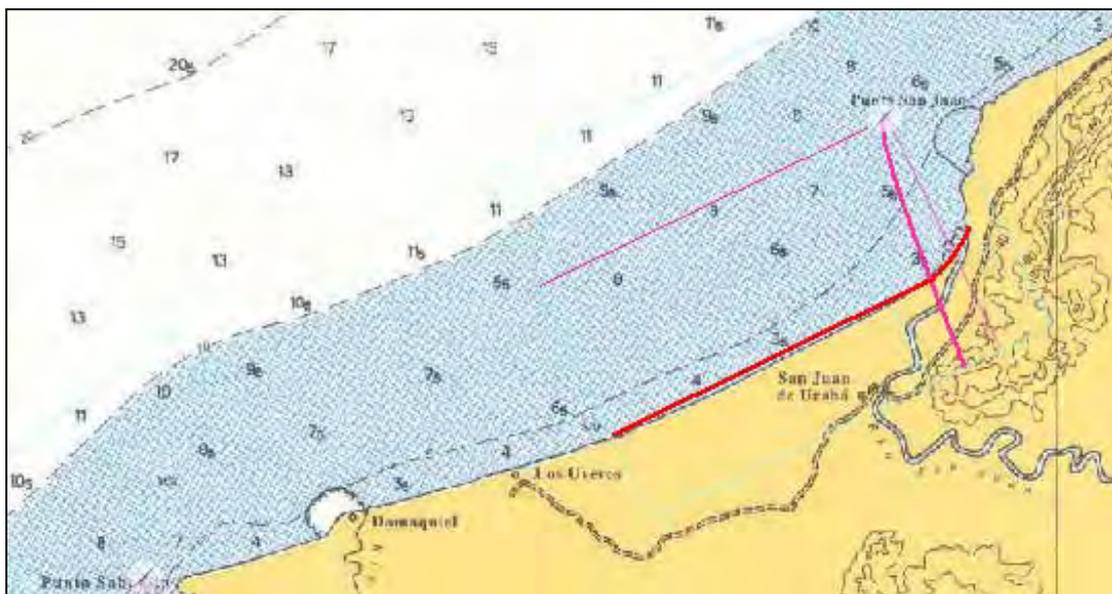


Figura 5.5. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 2.

Zona 3: Entre Punta San Juan y Punta Arboletes:

La siguiente figura muestra el ajuste de las playas de la zona 3 al modelo teórico utilizado, elementos cuya extensión se acerca a los 14 km. Nótese la exactitud entre la línea de

costa y el modelo (línea de color rojo). El punto de difracción está localizado a $L/4$ de la antigua Punta Arboletes, ahora un “stack” situado a 1.6 km de Punta Rey, tal como se muestra en la figura. La zona de influencia de la difracción sólo abarca desde Punta Rey hasta el Volcán de Lodo. Entre éste y Punta La Tina se aprecia una costa recta de batimetría aproximadamente recta. Incluso playas formadas por la difracción del oleaje en pequeños salientes rocosos como Punta La Tina, muestran un excelente ajuste al modelo de Hsu y Evans (1989). La precisión del ajuste y el retroceso de la línea de costa, más o menos similar en toda esta zona, permite concluir que la playa está cambiando en la misma proporción, conclusión que se puede comprobar mediante el análisis de la evolución histórica de los perfiles de playa de esta zona.

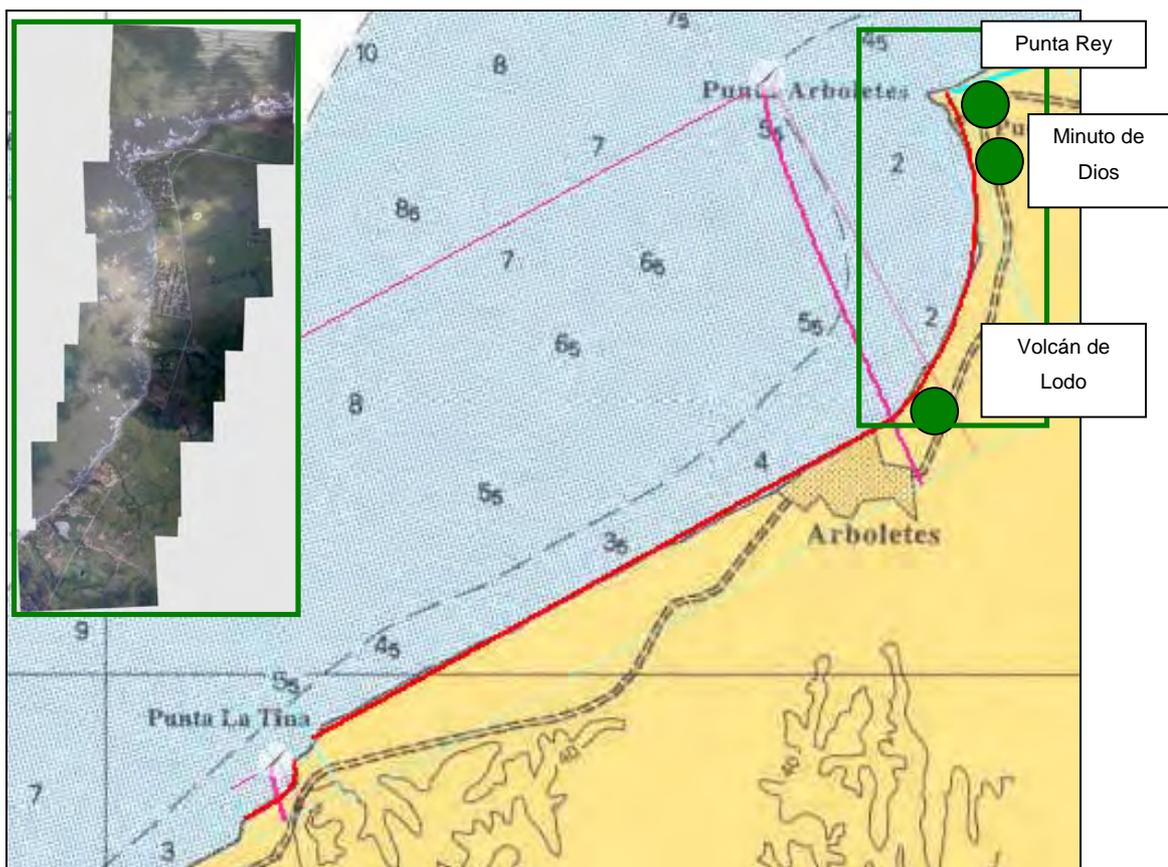


Figura 5.6. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 3.

Zona 4: Entre Punta Arboletes y Punta Brava:

Las playas de la zona 4, de 12 km de longitud, están controladas por dos puntos de difracción, tal como se presenta en la figura siguiente. Un primer punto, de carácter general, se localiza a una distancia de $L/4$ de Isla Tortuguilla; la influencia de esta isla en la difracción del oleaje ya había sido descrita con detalle en el Capítulo 4. El segundo, con una influencia local, está situado a la misma distancia de Punta Brava. L es la longitud del oleaje que caracteriza al FE en el punto de difracción tal como se ha venido explicando en este apartado para las otras zonas.

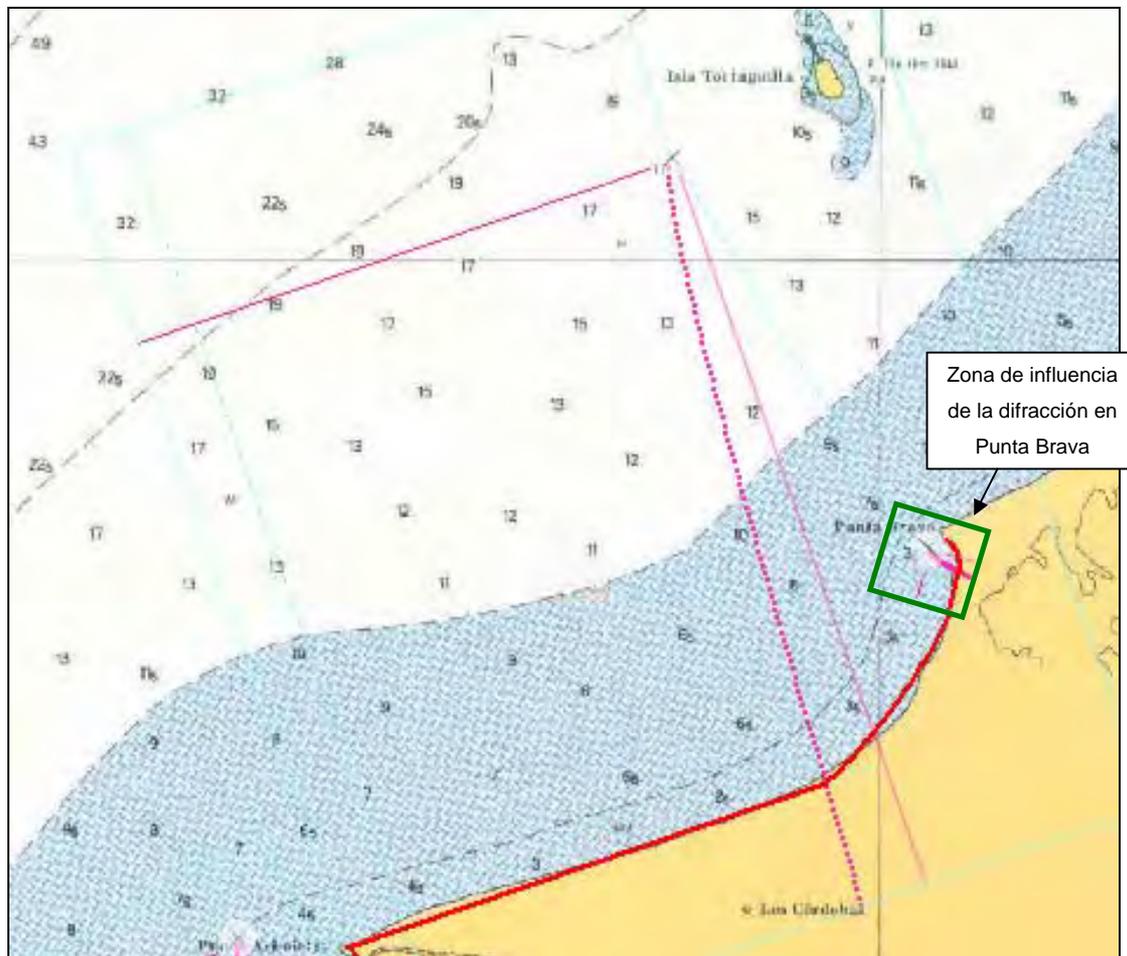


Figura 5.7. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 4.

La playa modelada por la presencia de Isla Tortuguilla muestra lo que las demás: Un tramo recto y un tramo parabólico.

El primero fácilmente observable entre Punta Arboletes y el punto de intersección de la línea de influencia de la difracción (color rosa en la figura) y la línea de costa. A partir de ese punto, la playa es modelada por efecto de las corrientes de rotura del oleaje en la zona de difracción, formando la parábola que se intenta ajustar a la expresión teórica. La continuidad de esta parábola sería otra si no fuera por la presencia de Punta Brava, que alcanza a generar un segundo punto de difracción y, por ende, a modificar el oleaje asociado al flujo medio de energía que llega a esta zona.

La erosión observada en esta zona a lo largo de varias décadas ha sido bien descrita en el Capítulo 3. Dados los buenos resultados del ajuste en planta al modelo teórica de Hsu y Evans (1989), es posible inferir que ese proceso erosivo está asociado a un retroceso homogéneo de la línea de costa más evidente en un análisis de evolución histórica de los perfiles de playa.

Zona 5: Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires:

A diferencia de las zonas analizadas hasta ahora, la zona 5 muestra dos orientaciones perfectamente diferenciables: una orientación desde Punta Brava hasta la desembocadura del río Canalete con dirección N45°E y otra con dirección N2°E desde este punto hasta Punta Buenos Aires. Ambos tramos presentan pequeños salientes rocosos, cada uno de los cuales puede generar una pequeña playa en forma de parábola.

En el primer tramo no existe un punto de difracción importante que permita ver una playa en forma de parábola, aunque sí dos pequeños salientes que modifican el oleaje localmente y que generan dos pequeñas playas de no más de 1 km de longitud. Debido a la mayor frecuencia y energía de los oleajes del cuadrante Norte, de cuya dirección viene el flujo medio de energía en profundidades indefinidas, Isla Tortuguilla no es un influye en la difracción de estos oleajes; en cambio sí puede influir en la difracción de los oleajes del cuadrante W y, en consecuencia, su contribución a la modelación de la playa se limita a la estacionalidad más que a la forma de largo plazo. El modelo ajustado es prácticamente el

de una playa recta, tal como se muestra en la siguiente figura, aunque con pequeñas irregularidades locales.

En el segundo tramo, Punta Buenos Aires y otros dos salientes localizados al Sur de ésta pueden contribuir, muy localmente (en tramos de 500 m cada uno), a la difracción del oleaje, pero su influencia no es fácilmente apreciable.

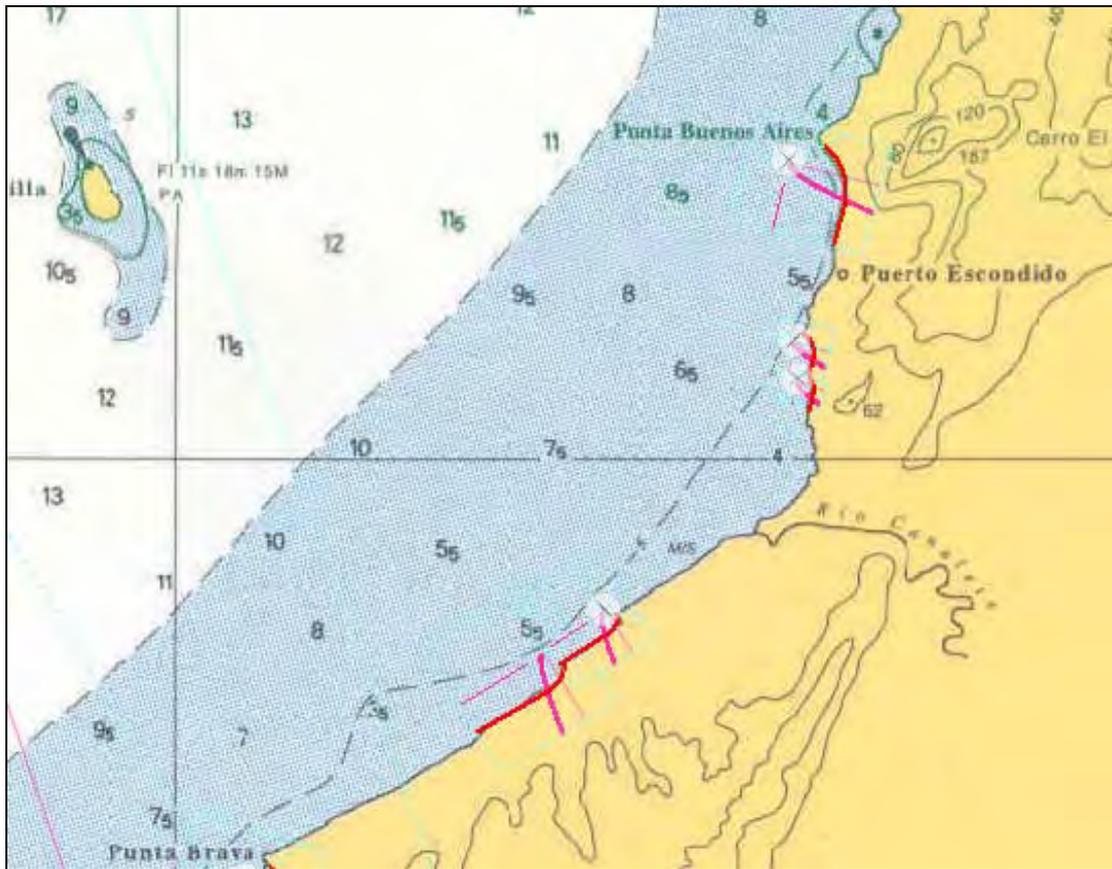


Figura 5.8. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 5.

Zona 6: Entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle:

La Zona 6 está definida por una sucesión de pequeñas playas (de entre 500 m y 1000 m) con una orientación general N47°E, apoyadas en salientes rocosos de poca entidad, tales como Punta Santa Bárbara y Punta La Yuca. Estos puntos duros son de suficiente

magnitud como para modelar playas de forma parabólica que se ajustan perfectamente al modelo teórico de Hsu y Evans (1989), tal como se muestra en la siguiente figura. En cada pequeña playa se aprecia la zona hasta donde llega la influencia de la difracción provocada por los salientes mencionados.

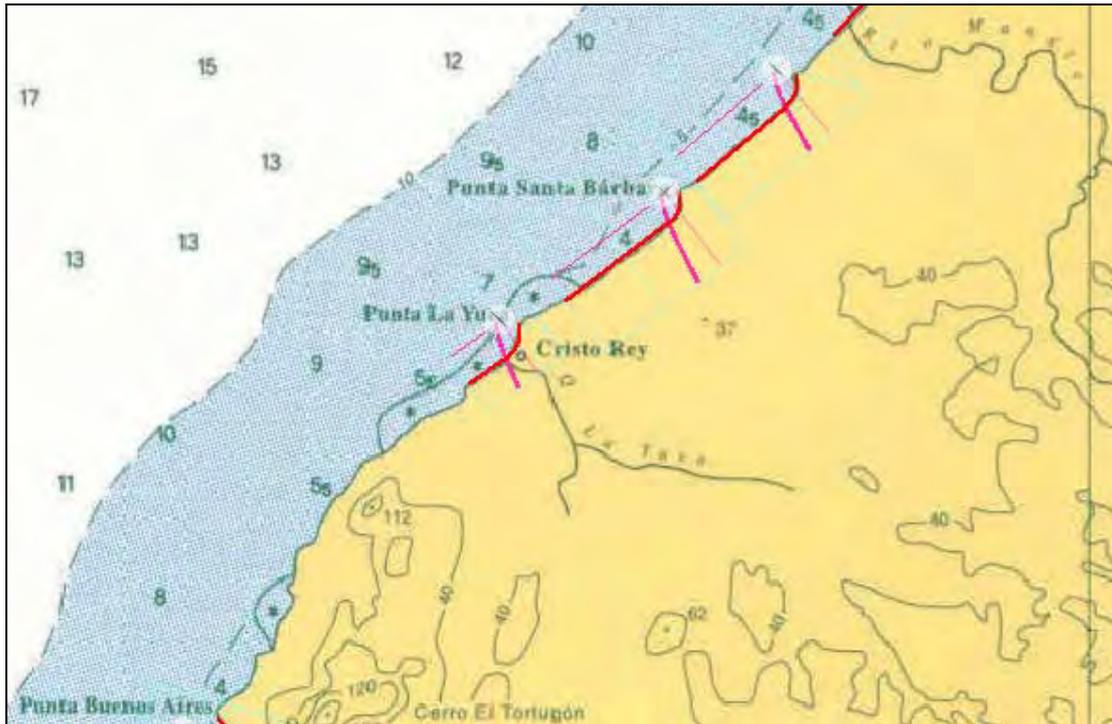


Figura 5.9. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 6.

Zona 7: Entre Boca Mangle y Punta Broqueles:

En la zona 7 ocurre algo similar a lo que se describió en la zona 6. Punta La Cruz, Punta Coquí y Punta Broqueles, entre otras, son salientes rocosos que forman pequeñas playas sucesivas de entre 1500 y 2000 m de longitud. La forma de parábola que se observa en ellas se puede ajustar al modelo teórico de Hsu y Evans (1989). La siguiente figura presenta los resultados de esos ajustes.

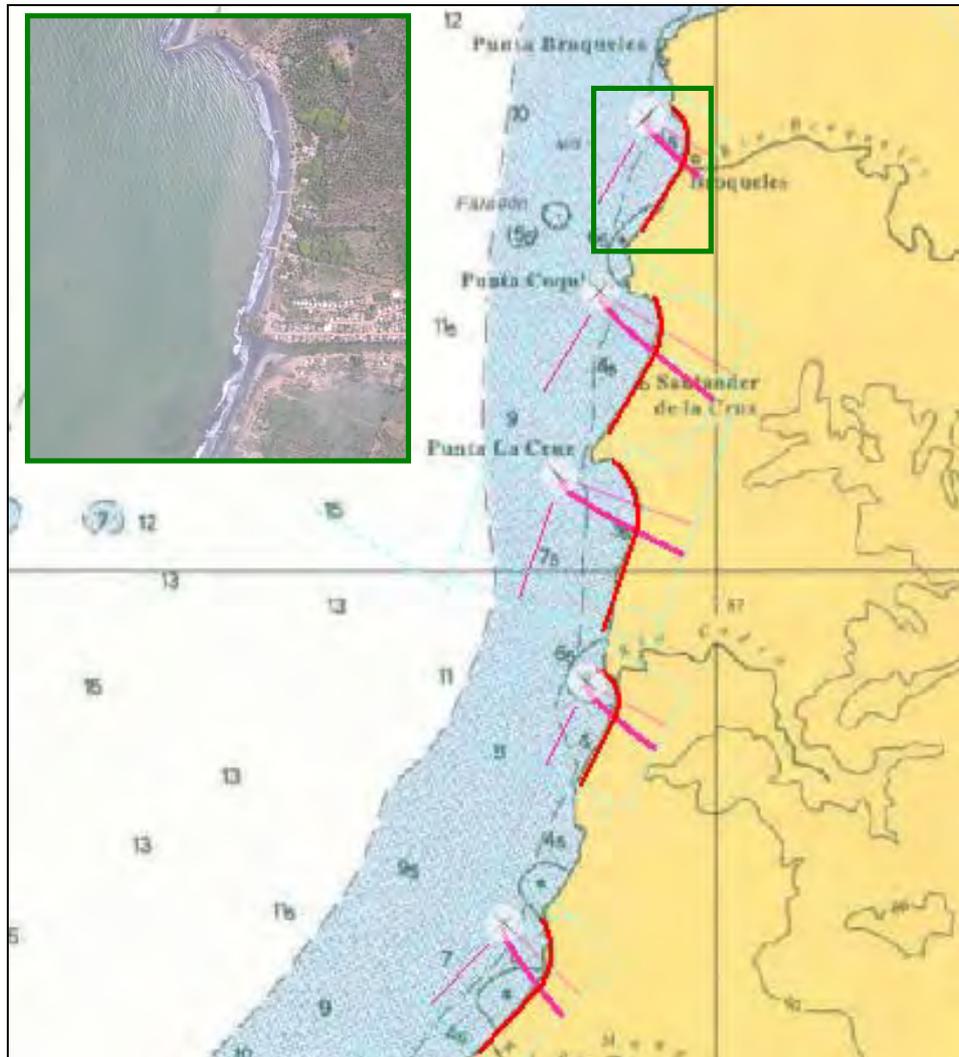


Figura 5.10. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 7.

Zona 8: Entre Punta Broqueles y Punta La Rada:

Si bien es cierto que Isla Fuerte es un gran punto de difracción que puede determinar el comportamiento en esta zona, también lo es que hay una longitud suficiente entre ésta y Punta La Rada (12 km) como para que el oleaje se alcance a recomponer antes de su incidencia al litoral continental. Es decir, en términos morfológicos de largo plazo, Punta La Rada, y no Isla Fuerte, es el elemento que controla la difracción del oleaje en esta zona y, por ende, la playa en forma de parábola se apoya en ésta. El ajuste se muestra

en la figura siguiente. Como se observa, la influencia de la difracción llega hasta la desembocadura del Arroyo Coa.

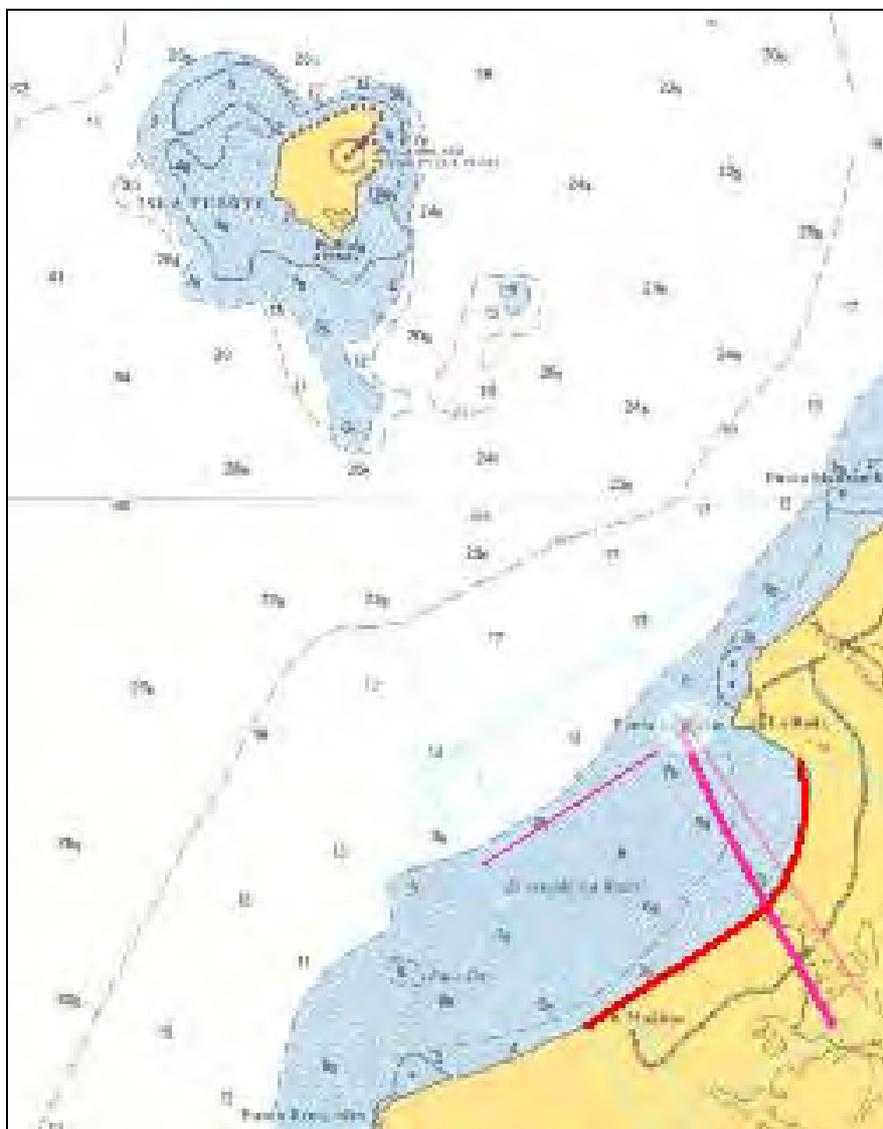


Figura 5.11. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 8.

Zona 9: Entre Punta La Rada y Delta de Tinajones:

Debido a la influencia directa del Delta de Tinajones, que ejerce como un punto de difracción “móvil” sobre el oleaje incidente, la playa Los Venados también se ajusta

relativamente bien a la expresión teórica de Hsu y Evans (1989), tal como se observa en la figura siguiente.

El punto de difracción parece estar a una distancia bastante grande del Delta. En estos casos de grandes desembocaduras, la zona donde comienza la interacción entre las descargas fluviales y el oleaje no está bien definida, aunque puede intuirse que se encuentra, en este caso particular, más cerca de la Boca Corea que de las Bocas Tinajones o Los Llanos, tal como se presenta en la figura. Nótese que de esta forma se logra un excelente ajuste al modelo teórico.

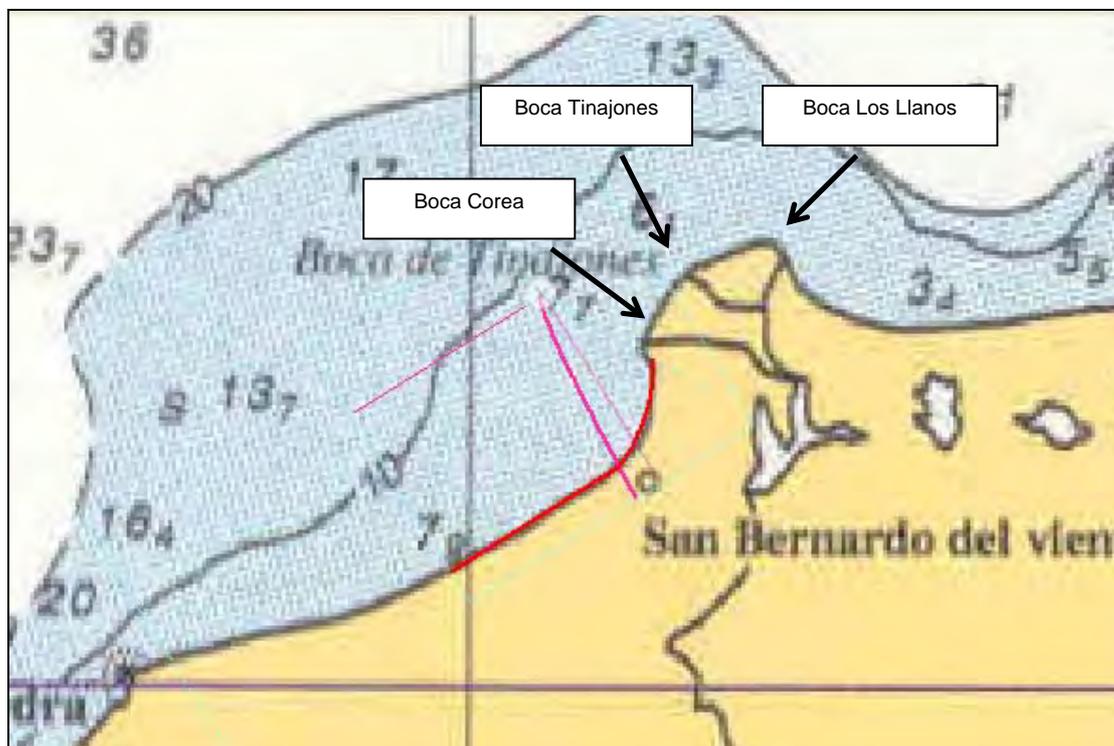


Figura 5.12. Ajuste de la forma de equilibrio de Hsu y Evans (1989) a las playas de la Zona 9.

5.2.2 ANÁLISIS EN PERFIL

Introducción

Como es sabido, el perfil de playa se define como la variación de la profundidad del agua con la distancia desde la línea de costa. Por otro lado, el perfil de equilibrio se puede definir, Dean (1991), como el resultante del balance entre fuerzas constructivas y destructivas que ocurre en condiciones de oleaje estacionario para un sedimento en particular.

El perfil de playa depende de la granulometría presente ya que el transporte transversal es función de las acciones hidrodinámicas, las dimensiones de la partícula y de su peso. Al mismo tiempo, es de suponer, que el oleaje se verá afectado por los cambios en la configuración del perfil, pues el oleaje responde a la configuración batimétrica. Tal circunstancia, lleva a concluir, que existe una relación biunívoca de equilibrio, entre la dinámica marina y la morfología del perfil.

La descripción analítica del perfil de playa fue estudiada por varios autores, entre ellos Bowen, Dalrymple, Fredsøe, Dally y Dean. En general, en todos los modelos se presenta un perfil de equilibrio cóncavo, donde la pendiente de la playa decrece conforme nos alejamos de la costa. Esta descripción es consistente con un sin número de perfiles medidos en campo. En general todos los modelos asumen, que el perfil se forma en función de un oleaje que se disipa paulatinamente conforme se propaga hacia la costa.

Naturalmente, a partir de cierta profundidad, el perfil de equilibrio ya no responde activamente a las acciones del oleaje, definiéndose una profundidad a partir de la cual, el transporte de sedimentos transversal y longitudinal no tiene una magnitud apreciable. Esta profundidad se conoce como la profundidad de corte, o límite del perfil activo.

Cálculo de la profundidad activa

Para poder analizar el comportamiento transversal de las playas se determina en primer lugar la zonificación de su perfil (es decir, en dirección transversal o perpendicular a la

línea de costa). Hallermeier (1978) propuso en 1978 una zonificación del perfil de la playa en función de la variabilidad del perfil y del tipo del transporte dominante, distinguiéndose:

- zona exterior u *offshore*: en la que los cambios del perfil son despreciables.
- zona de asomeramiento o *shoal*: en la que existen pequeños cambios no despreciables en el perfil a lo largo del año fundamentalmente debido al transporte transversal.
- zona litoral: en la que se producen grandes cambios del perfil debido tanto al transporte longitudinal como al transversal.

El límite entre la zona litoral y la de asomeramiento viene dado por la *profundidad activa* h^* y el límite entre ésta y la zona exterior por la *profundidad de cierre* d_i .

En 1978 Hallermeier ya había propuesto a partir de los resultados de unos ensayos en laboratorio una expresión para el cálculo de la profundidad activa y en 1980 presentó otra fórmula para la obtención de la profundidad de cierre.

$$h^* = 2,28H_{s12} - 68,5 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right)$$

$$d_i = H_{sm} T_{sm} \sqrt{\frac{g}{5000D}}$$

siendo

H_{s12} la altura de ola significativa local superada 12 horas al año,

T_{s12} el período significativo asociado a H_{s12} ,

H_{sm} la altura de ola significativa local media anual,

T_{sm} el período medio anual,

D el diámetro medio del material situado a una cota $1,50 d_i$.

Birkemeier (1985) utilizando numerosos datos medidos en perfiles de playas obtuvo una expresión modificada para h^* :

$$h^* = 1,75H_{S12} - 57,9 \left(\frac{H_{S12}^2}{gT_s^2} \right)$$

Del estudio de clima marítimo se obtienen las diferentes alturas de ola con probabilidad de ocurrencia de 12 horas/año. Los períodos asociados se obtienen teniendo en cuenta la correlación H_s-T_p obtenida en el Clima marítimo para los datos analizados.

Atendiendo a lo expuesto anteriormente, se concluye que la profundidad activa está alrededor de los 2 metros de profundidad y la de cierre cercana a las 5 metros de profundidad.

Modelo conceptual de perfil de equilibrio

Existen diversas formulaciones que permiten describir un perfil de playa conocido el tamaño del material existente (arena, grava) y el oleaje actuante. Dean (1977), por ejemplo, obtuvo, a partir de datos referentes a playas en diversos lugares del mundo, las siguientes características para un perfil de equilibrio:

Ecuación del perfil:

$$h = A x^{2/3}$$

Valor del parámetro de forma A:

$$A = k \omega^{0.44}$$

donde:

- h = profundidad (m)
- x = distancia (m)
- ω = velocidad de caída del grano (m/s)
- g = gravedad (m/s^2)

Esta formulación es válida hasta la profundidad de corte descrita en el apartado anterior.

Es interesante señalar que en la formulación de Dean, la forma del perfil depende única y exclusivamente del tamaño del sedimento a través del parámetro de forma A, mientras que el oleaje nos señala la cota de finalización del perfil, h^* . De este modo, una playa de arena tendrá una pendiente más tendida que una playa de gravas. Del mismo modo, una playa abierta al oleaje, esto es, expuesta a un oleaje mayor, tiene un perfil activo más largo que otra playa en un lugar resguardado.

El valor del coeficiente k que relaciona el parámetro A con la velocidad de caída del grano obtenido por Dean (1987) fue de $k = 0,61$.

Aplicación al litoral estudiado

A continuación se presenta un análisis de los perfiles de playa de cada una de las zonas morfológicamente homogéneas que fueron identificadas y descritas en el Capítulo 2. Dada la gran cantidad de información, se presentan aquí los perfiles más representativos de cada zona. La localización de los perfiles puede observarse en el Plano No. 3.1 del Anexo 1.

Zona 1: Entre Punta Caribana y Punta Sabanilla:

A manera de ejemplo, se presenta a continuación el ajuste realizado a los dos perfiles de los tramos características de esta playa. En primera instancia, el perfil de la zona recta, donde no hay influencia de la difracción del oleaje (Perfil 2). Nótese cómo un $K = 0.51$, recomendado por Dean (1991) para su modelo, no se ajusta muy bien al tramo analizado; Por el contrario, un $K = 0.2$ ajusta muy bien ese modelo teórico. El segundo tramo, donde gobierna la difracción del oleaje, presenta un perfil un poco más pendiente que el anterior, hecho que se ve reflejado en un mayor K; en este caso, $K = 0.62$.

Como bien se ha explicado, este modelo se puede aplicar a zonas donde no existen desembocaduras ni salientes rocosos. Es de esperar, entonces, que los perfiles 5 a 9 no se ajusten bien al modelo de Dean (1991) por la influencia de la desembocadura del río

Mulatos. Lo mismo ocurrirá con los perfiles 18 a 20, localizados en los puntos de difracción del oleaje.

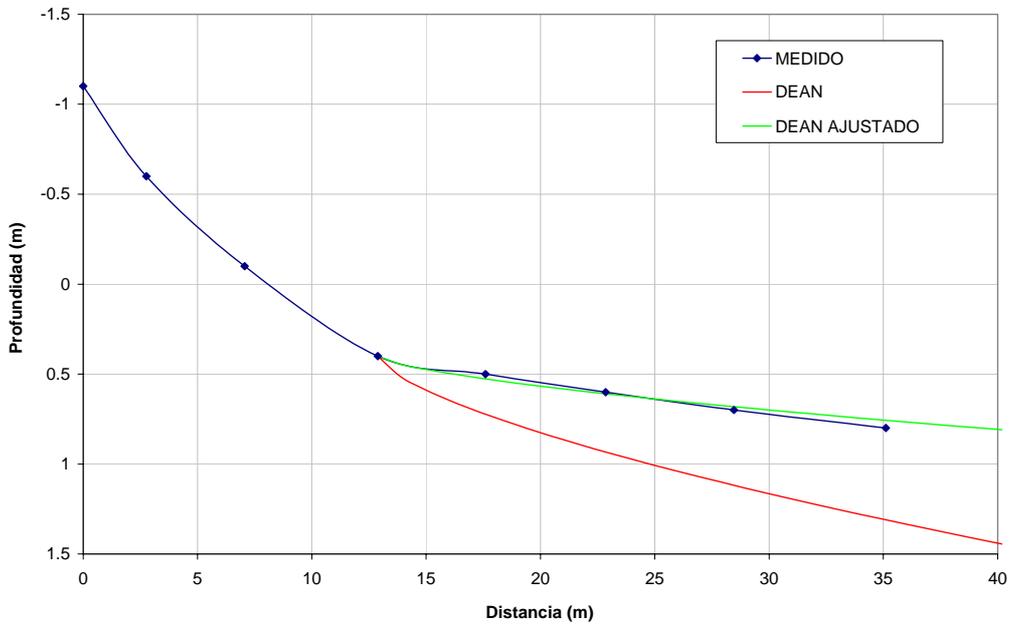


Figura 5.13. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 1. Perfil 2

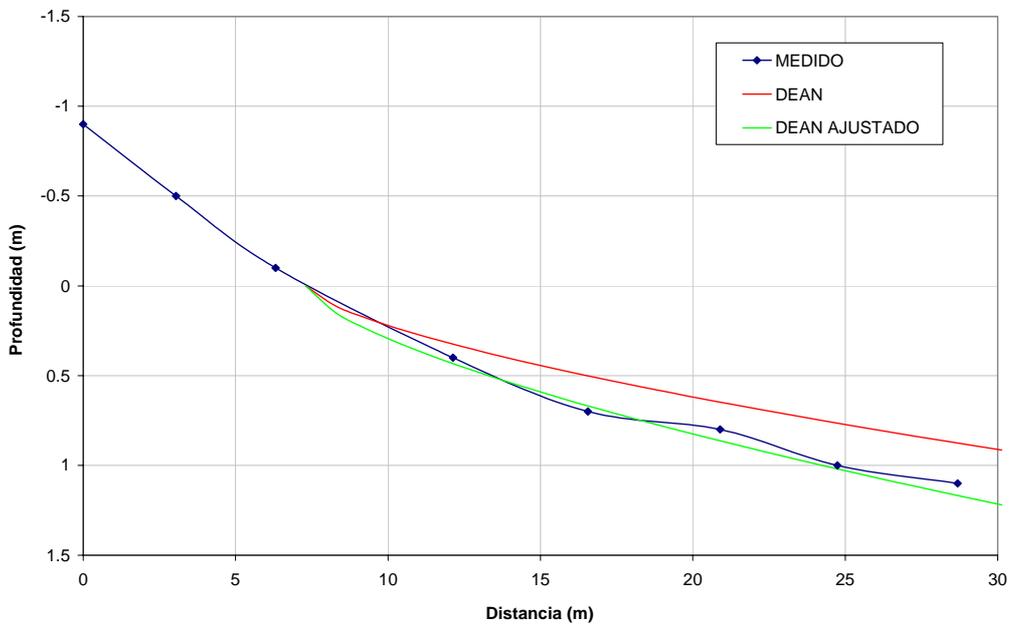


Figura 5.14. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 1. Perfil 13

Zona 2: Entre Punta Sabanilla y Punta San Juan:

Como se explicó en el apartado anterior, la playa de esta zona se divide en dos tramos con orientaciones muy diferenciadas. Este brusco cambio de orientación probablemente tenga su explicación en procesos geológicos. Sin embargo, el perfil 23, localizado en el primer tramo entre Punta Sabanilla y la desembocadura del río San Juan, un litoral recto, se ajusta muy bien al modelo teórico de Dean (1991). Los resultados se muestran en la siguiente figura, en la que se ha utilizado un coeficiente, K, de 0.3 en vez del 0.51 recomendado por dicho autor.

Tal como ya se ha explicado, la desembocadura del río San Juan puede hacer que no coincidan los perfiles reales levantados alrededor suyo con el modelo teórico, tal como ocurre con el perfil 25.

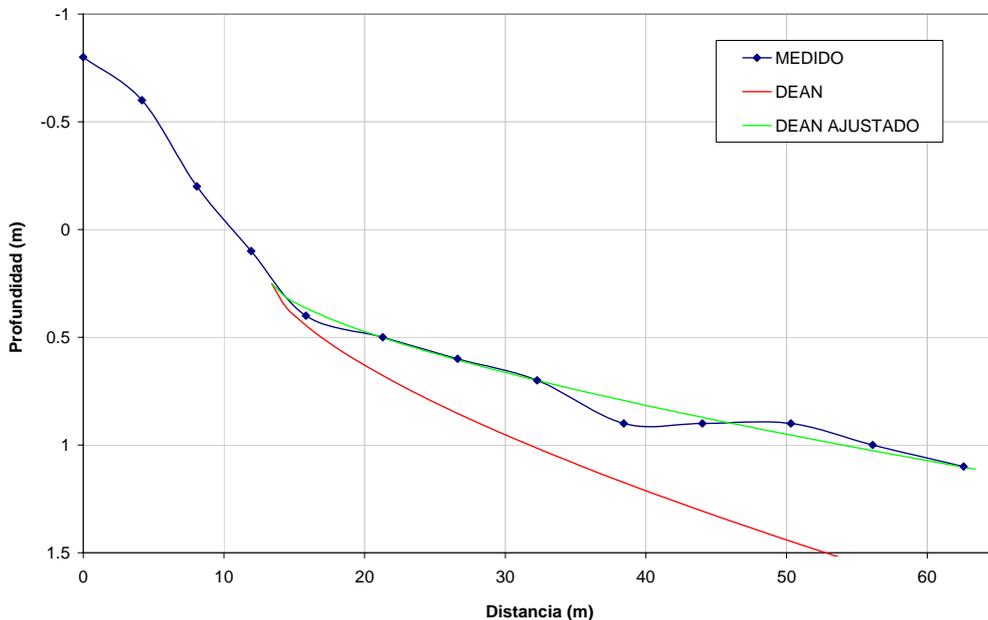


Figura 5.15. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 2. Perfil 23

Zona 3: Entre Punta San Juan y Punta Arboletes:

Los perfiles 29 y 30 se encuentran justo en dos salientes rocosos. El perfil 31 está muy influenciado por la desembocadura del río Jobo. No es el caso del perfil 37, que, tal como se muestra en la figura siguiente, se ajusta muy bien al perfil teórico de Dean (1991), aunque con un $K = 0.44$, ligeramente inferior al $K = 0.51$, ajustado por dicho autor en el planteamiento del modelo.

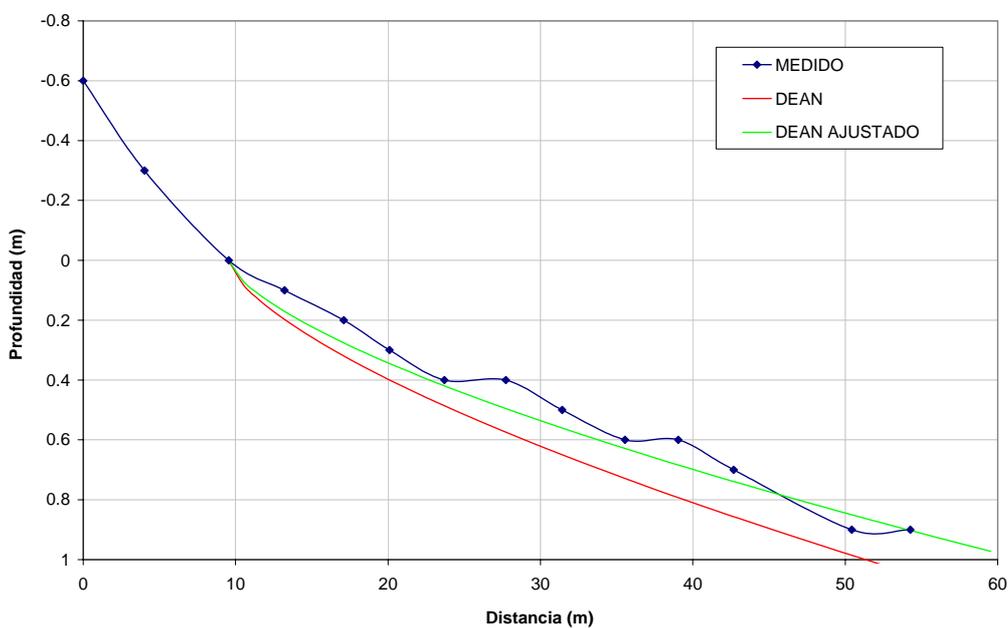


Figura 5.16. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 3. Perfil 37

Zona 4: Entre Punta Arboletes y Punta Brava:

Como ya se ha mencionado en el Capítulo 3, esta es la zona de mayor erosión en todo el litoral analizado. Los perfiles 39 y 40 se encuentran en el tramo recto de esa playa en retroceso. El perfil 41 se ha localizado justo en Punta Brava, el punto de difracción del oleaje en esta zona. Es de esperar, por tanto, que el modelo teórico no se ajuste bien a este tipo de perfiles.

Zona 5: Entre Punta Brava y Punta Buenos Aires:

El perfil 42 está muy afectado por la desembocadura del río Canalete, por lo que probablemente no se ajuste bien al modelo planteado por Dean (1991). Sin embargo, el perfil 43 sí parece ajustarse a este modelo si se utiliza un coeficiente $K = 0.45$, muy cercano al 0.51 utilizado por el autor.

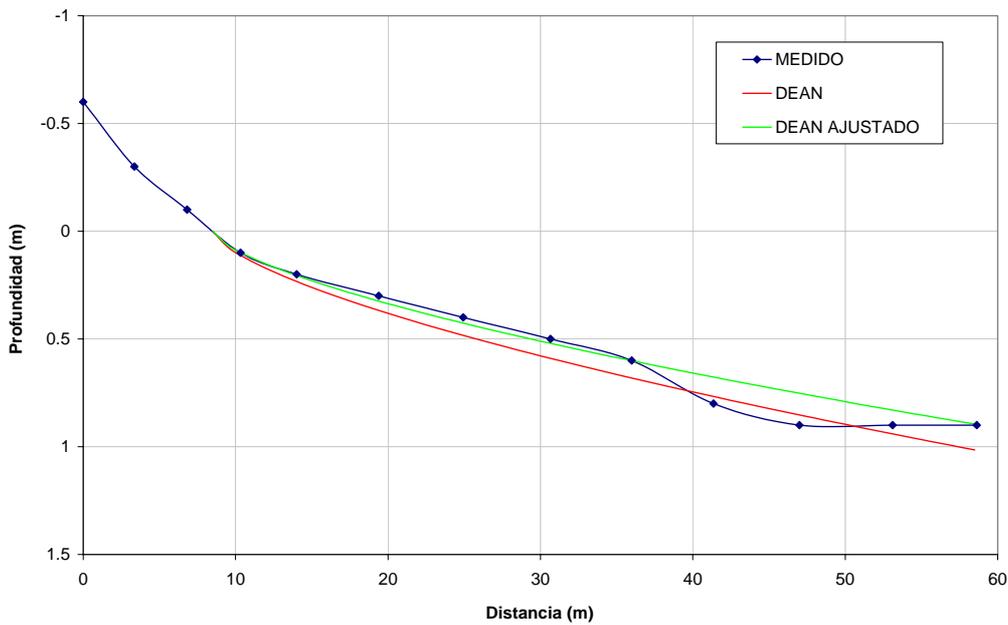


Figura 5.17. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 5. Perfil 43

Zona 6: Entre Punta Buenos Aires y Boca Mangle:

La desembocadura de dos arroyos, Chengue y Siempre Vivo, la localización del perfil 47 justo en un saliente rocoso en la población de Cristo Rey hacen que no todos los perfiles de este tramo litoral se ajusten al modelo teórico que se ha venido mencionando. El perfil 46 sí que lo hace, tal como se muestra en la figura siguiente. Para este caso se ha utilizado un coeficiente de ajuste, K , de 0.52.

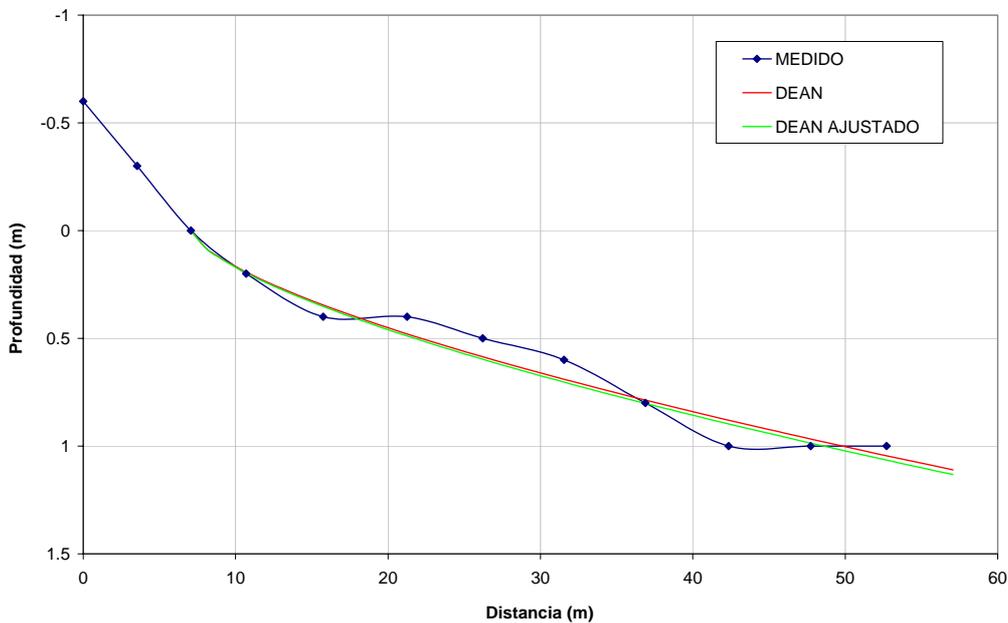


Figura 5.18. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 6. Perfil 46

Zona 7: Entre Boca Mangle y Punta Broqueles:

Esta es quizás la zona con mayor cantidad de salientes rocosos de todo el litoral estudiado y, por ende, de mayor número de puntos de difracción del oleaje. Cada uno de estos puntos genera una pequeña playa, tal como se comentó en el apartado anterior. Es de esperar, por tanto, que este tramo presente irregularidades en el fondo debidas a puntos duros, por lo que los perfiles teóricos, desarrollados para playas de arena, no se ajusten perfectamente. Uno de ellos (perfil 53), sin embargo, sí se ajusta al modelo de Dean (1991), tal como se muestra en la figura siguiente, en donde se ha utilizado un $K = 0.45$. Este perfil se encuentra en la zona de difracción del oleaje generada por Punta Broqueles.

Los perfiles 49 y 50 están localizados en dos salientes rocosos, Punta Tranconal y Punta de La Cruz.

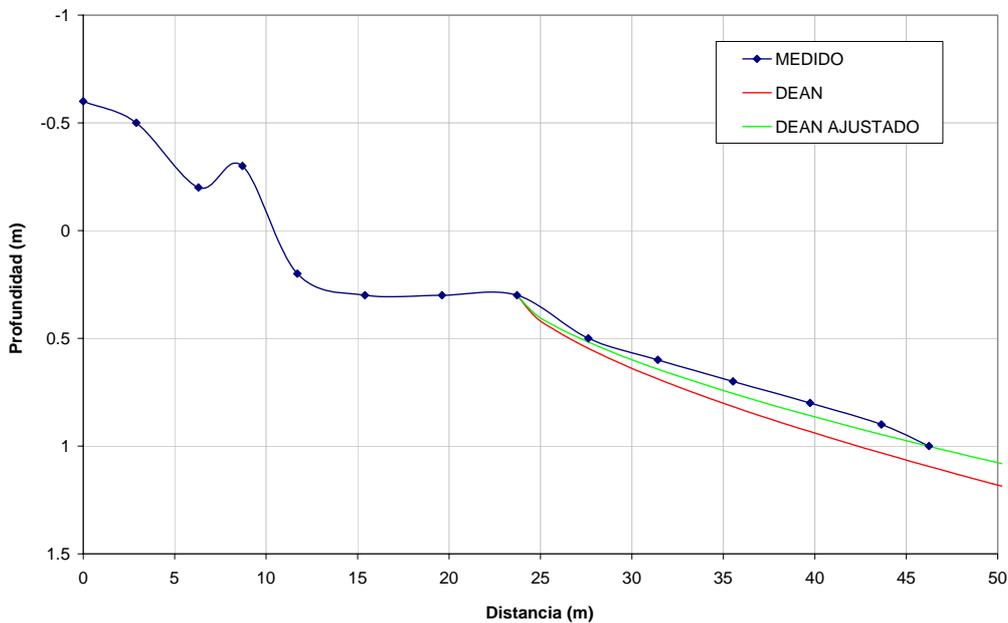


Figura 5.19. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 7. Perfil 53

Zona 8: Entre Punta Broqueles y Punta La Rada:

La doble difracción provocada por Isla Fuerte y Punta La Rada, y la gran cantidad de desembocaduras, probablemente sean las causas por las cuales los perfiles localizados en esta zona no se ajusten muy bien al modelo teórico de Dean (1991), aún sabiendo que en todas las demás zonas sí se ha podido hacer.

Zona 9: Entre Punta La Rada y Delta de Tinajones:

En general, los perfiles de esta zona están muy influenciados por la desembocadura del río Sinú. Sin embargo, el perfil 62, situado en la zona media de la playa Los Venados, por fuera ya de la zona de influencia de la difracción que genera el Delta de Tinajones, se ajusta relativamente bien al modelo de Dean (1991), aunque con algunas irregularidades producto de lo mencionado anteriormente. Para este caso, se ha utilizado un coeficiente de ajuste, $K = 0.51$, exactamente el mismo utilizado en el desarrollo del modelo.

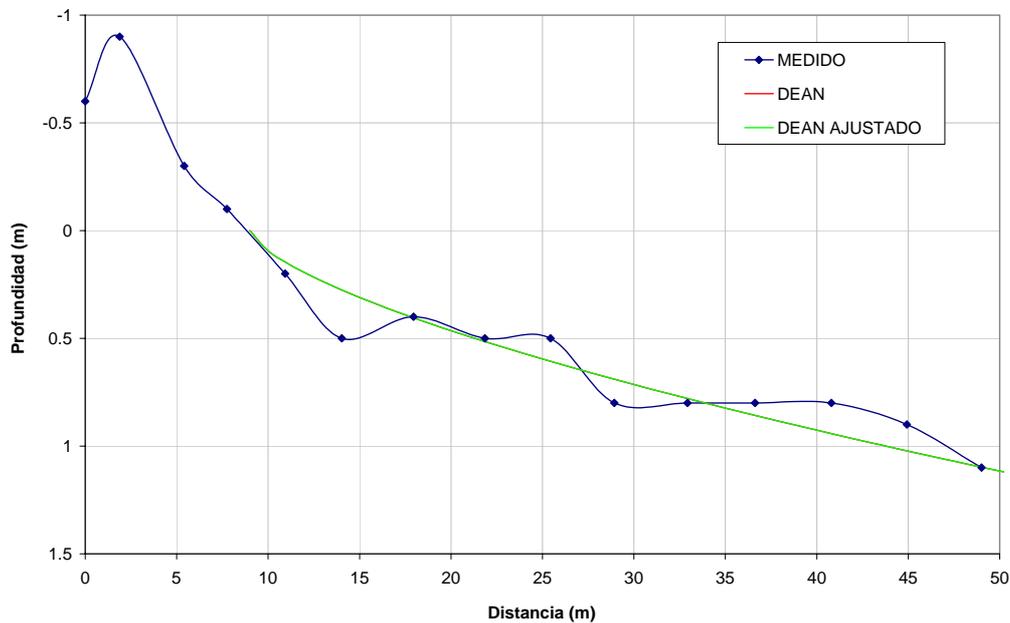


Figura 5.20. Ajuste de la expresión de Dean (1991) a los perfiles de la Zona 9. Perfil 62

5.2.3 EL DELTA DEL RÍO SINÚ

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, las descargas fluviales del río Sinú siempre han determinado el aporte sedimentario de toda la zona de estudio. Es de esperar, por tanto, que cualquier modificación ocurrida en estos aportes modifique en la proporción similar el litoral aguas abajo del delta. En este apartado se presenta el análisis de la evolución del delta del río Sinú durante el último siglo.

Información

El análisis de la evolución del delta del río Sinú se ha realizado a partir de varias fuentes de información, tal como se relaciona a continuación:

- Palacio, H.H. y Restrepo, A.F. (1999). Influencia de la evolución del delta del Río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral Caribe Antioqueño. Trabajo Dirigido de Grado. Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 111p.

- Ideam, (s.f). Morfodinámica, población y amenazas naturales en el litoral Caribe colombiano (Valle del Sinú – Morrosquillo – Canal del Dique). 70 p.
- Serrano, B. (s.f.). Evolución del delta del río Sinú. (http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/DeltaSinu_archivos/frame.htm).

Análisis

Según Ideam, la evolución del Delta del río Sinú se puede diferenciar, geológicamente, en cuatro etapas:

- Delta de Los Venados hasta 1762
- Delta de Mestizos entre 1762 y 1849
- Delta de Cispatá entre 1849 y 1938
- Delta de Tinajones entre 1938 y la actualidad

La escala temporal de este trabajo se reduce al estudio de los ocurrido en las últimas decenas de años, es decir, se considera un “tiempo ingenieril de largo plazo”. Por este motivo, sin desconocer el análisis y la importancia de la evolución de la desembocadura del río Sinú anterior a 1938, en este apartado se hace especial énfasis en el desarrollo del Delta de Tinajones.

Así pues, y con base en la información señalada anteriormente, se construyó la evolución histórica del delta del río Sinú durante el último siglo. Si bien las diferentes fuentes coinciden en los elementos fundamentales, se presentan a continuación los resultados de la última referencia dada su claridad. La siguiente figura muestra la configuración del Delta de Cispatá en 1938, por donde en aquella época desembocaba el río Sinú al mar Caribe. Las descargas de sedimentos constituyeron lo que hoy se conoce como la bahía de Cispatá. Estos sedimentos y los que provenían del litoral Norte podían ser transportados por la corriente de deriva hacia el Sur sin ningún obstáculo. Obsérvese que Tinajones era una playa aproximadamente recta y paralela.

Sin embargo, el cambio en la desembocadura del río Sinú, justo en la playa de Tinajones, comenzó a formar el delta del mismo nombre a partir de ese año, 1938. La evolución a partir de ese momento es la que se presenta en la siguiente figura.

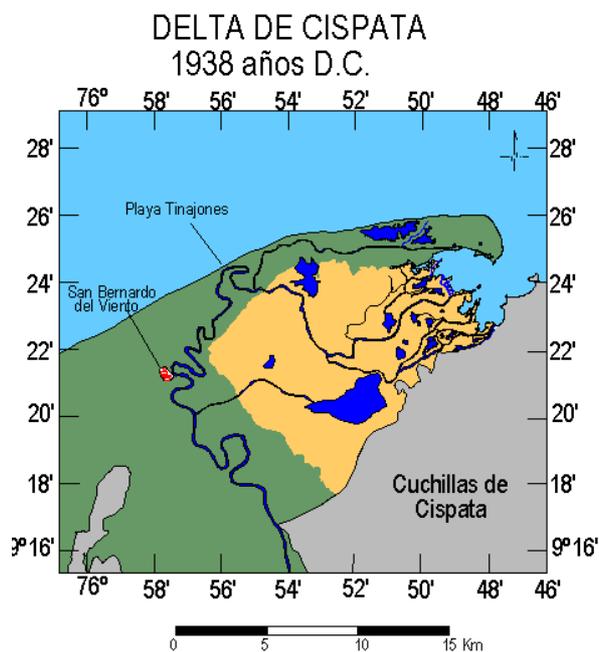


Figura 5.21. Delta del río Sinú en Cispata en 1938

Fuente: Serrano, B. (Invemar)

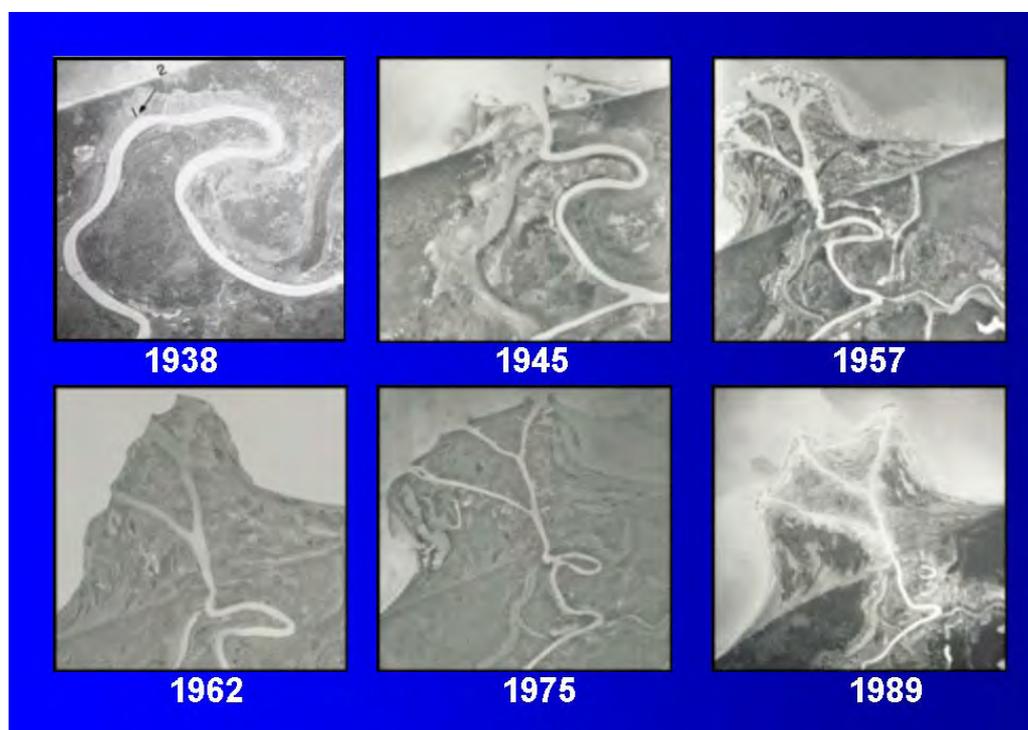


Figura 5.22. Evolución del Delta del río Sinú en Tinajones. 1938-1989

Fuente: Serrano, B. (Invemar)

Las fotografías aéreas son muy explícitas. Nótese cómo entre 1938 y 1945 se abrió la desembocadura de Tinajones. A partir de ese momento, el área del Delta de Tinajones ha crecido linealmente, tal como se presenta en la siguiente figura. Nótese que, al menos hasta finales del siglo pasado (fecha hasta la cual se tienen datos), el delta parecía estar creciendo linealmente, lo que permite intuir que el delta no parece estar tendiendo hacia un volumen de equilibrio.

Este cambio generó un par de consecuencias adicionales a la dinámica litoral aguas abajo de la formación del delta:

1. Una gran cantidad de los sedimentos que aportaba el río Sinú comenzaron a ser utilizados en la formación del Delta de Tinajones.
2. La desembocadura generó un “espólón dinámico” que cortó la corriente de deriva y, por ende, el transporte de sedimentos hacia aguas abajo del delta de Tinajones debido las corrientes de oleaje.

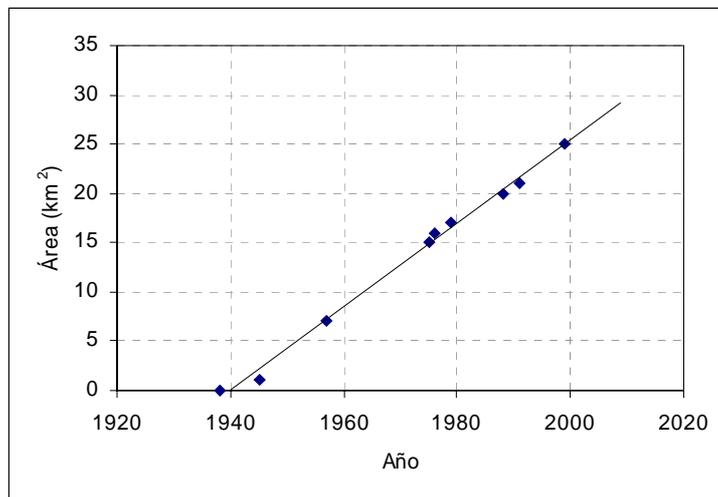


Figura 5.23. Evolución temporal del área del Delta de Tinajones

En conclusión, se ha creado un desequilibrio sedimentario hacia aguas abajo del Delta de Tinajones, debido a la creación de esta unidad fisiográfica. Los sedimentos que copaban

la capacidad transportadora de las corrientes de deriva entre éste y Punta Caribana se depositan en el mismo Delta. Se genera, entonces, una falta de sedimentos en esta zona que es cubierta por la arena de las playas. Este déficit sedimentario continuará hasta tanto no se cree un nuevo equilibrio dinámico.

5.3. ANÁLISIS DE CORTO PLAZO

Al objeto de determinar cuál es el desequilibrio sedimentario hacia aguas abajo del Delta de Tinajones es necesario calcular el transporte potencial de sedimentos de las corrientes de oleaje. Para ello se parte de los resultados de las propagaciones que se presentaron en el capítulo de clima marítimo.

Metodología de análisis

La fórmula del CERC relaciona la tasa de transporte de sedimento a lo largo de la playa como peso sumergido, I , con el flujo de energía del oleaje por unidad de longitud de la costa, P_l , como:

$$I = KP_L$$

donde K es un coeficiente empírico de proporcionalidad, y:

$$P_l = (EC_g \sin \theta \cos \theta)_b$$

donde el subíndice b se refiere a la rotura. La densidad de energía E y la celeridad de grupo C_g en el punto de rotura, se aproximan a partir de teoría lineal de ondas como:

$$E = \frac{1}{8} \rho_w g H_b^2$$
$$C_g = (gh_b)^{1/2} \cong \left(\frac{gH_b}{\gamma_b} \right)^{1/2}$$

donde:

ρ_w = la densidad del agua

g = la aceleración de la gravedad

H_b , θ_b y h_b = altura de ola, ángulo de los frentes y profundidad en rotura

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b}$$

con lo cual, la primera ecuación es entonces:

$$I = \frac{K}{16\sqrt{\gamma_b}} \rho_w g^{3/2} H_b^{5/2} \sin(2\theta_b)$$

Por otro lado, el peso sumergido de la arena transportada es:

$$I = (\rho_s - \rho_w) g a' Q$$

donde ρ_s es la densidad del material que forma el sedimento, $a' = (1-p)$ donde p es la porosidad, y Q es el caudal del transporte sólido. Relacionando las ecuaciones 9 y 10 se llega a:

$$Q = \frac{K \rho_w g^{1/2}}{16(\rho_s - \rho_w)(1-p)\sqrt{\gamma_b}} H_b^{5/2} \sin(2\theta_b)$$

Obsérvese que Q depende directamente de la altura de ola elevada a la potencia 5/2 y el seno de dos veces el ángulo, lo que implica que el transporte tiene un máximo para $\theta_b = 45^\circ$ y decrece para ángulos mayores o menores que éste.

Las primeras calibraciones de la fórmula del CERC (1966), se llevaron a cabo con base en 9 datos de campo y 150 ensayos de laboratorio, donde propusieron un valor $K = 0,42$ (utilizando la altura de ola como la media cuadrática, H_{brms}). Komar e Inman (1970) incluyeron otras 14 playas a las 9 iniciales, y excluyeron los datos de laboratorio, obteniendo $K = 0,77$, el cual es el valor recomendado por el Shore Protection Manual

(SPM) (1977, 1984) con Hbrms o $K = 0,39$ con altura de ola significativa (Hbs). En el año 1977 el CERC llevó una revisión del coeficiente K, incluyendo 33 datos de playas de arena obtenidas en 9 proyectos de investigación independientes, dentro de las cuales estaba: Duck 85, SuperDuck, Kraus 1989 y Rosati et al. 1990. El valor de K obtenido a partir de estos estudios, muestra una variación en un rango de 0,2 a 1,6, proponiendo como valor medio de $K = 0,78$.

Kraus et al. (1982) recomiendan, a partir de incluir otras playas, un valor medio de $K = 0,58$ y Komar (1990), en una revisión de estas formulaciones compara la formulación anterior que se basa en el flujo medio de energía del oleaje, con una formulación de Inman y Bagnold (1963) que calcula el transporte litoral como una combinación de oleaje – corriente, llegando a la conclusión de que el $K = 0,58$ propuesto por Kraus es acertado.

Nótese que la formulación del CERC no tiene en cuenta el tamaño del grano, para esta expresión es igual transportar una arena con $D_{50} = 0,2$ mm que una arena con $D_{50} = 2$ mm, lo cual no es verdad, lo que pasa, es que todas las anteriores propuestas del coeficiente K, en su gran mayoría han sido obtenidas con base en arenas finas, con $D_{50} < 1$ mm.

Deigaard y Fredsoe (1985) afirman que la formulación del CERC se debe aplicar para valores con $D_{50} < 0,2$ mm. Por otro lado, autores como Komar (1989) han encontrado que en playas con $D_{50} \sim 2$ mm, el valor de mejor ajuste era $K \sim 0,14$, incluso autores como Nicholls y Wright (1991), proponen para gravas un $K = 0,03$ (con Hbrms) y $K = 0,02$ (con Hbs).

Otros autores como del Valle, Medina y Losada (1991), proponen una dependencia exponencial del coeficiente K respecto al D_{50} (véase figura siguiente), con la relación:

$$K = 1,4e^{-2,5D_{50}}$$

Expresión recogida hoy en día en el CEM (revisión del Shore Protection Manual) para la determinación del coeficiente K (Chapter III.2.3). Un mejor análisis de esta y otras

formulaciones de transporte de sedimentos debido a las corrientes de oleaje está recogido en Guanche et al. (2005).

Dada la variabilidad de tamaños de grano en la zona de estudio, con predominio de arenas gruesas, se decidió que el tamaño del sedimento era relevante en el transporte sólido de esta zona, por lo tanto, se utilizó esta última relación para determinar K en función del D50 en la formulación del CERC.

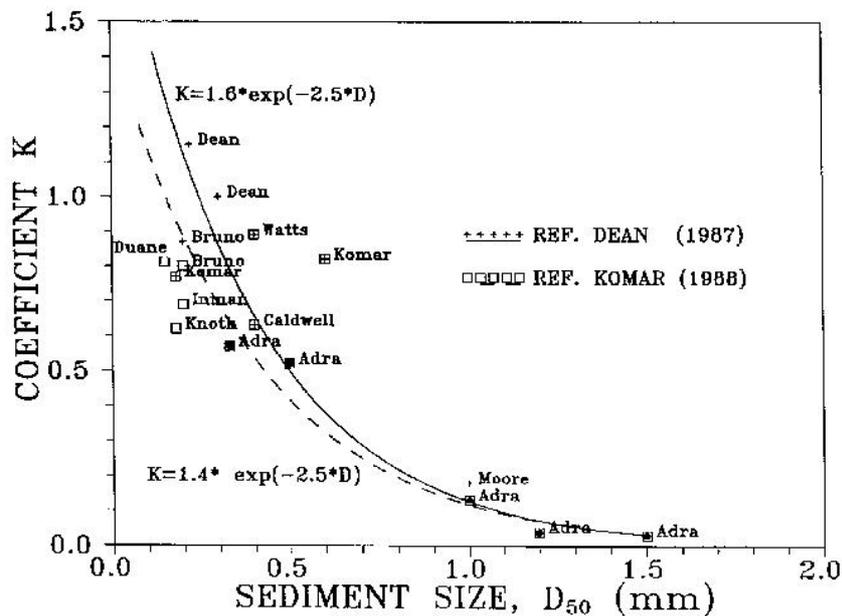


Figura 5.24. Variación del coeficiente K en función del diámetro del sedimento

Resultados

Así pues, es posible calcular el transporte sólido longitudinal de sedimentos como consecuencia de las corrientes de oleaje producidas en rotura, Q_s . Para ello se han determinado tres perfiles en cada zona geomorfológicamente homogénea y en cada uno de ellos se ha calculado Q_s a partir de los datos de corrientes simulados numéricamente. Toda la base de datos de oleaje ha sido considerada para este análisis. El transporte

sólido longitudinal, asociado a las corrientes de rotura del oleaje, de una zona determinada se ha calculado como el promedio encontrado en cada perfil. Se ha estimado, entonces, el caudal sólido medio multianual neto para cada zona. Los resultados se presentan en la figura siguiente, en la que se aprecia claramente la relación tan estrecha entre Q_s y el retroceso en la línea de costa.

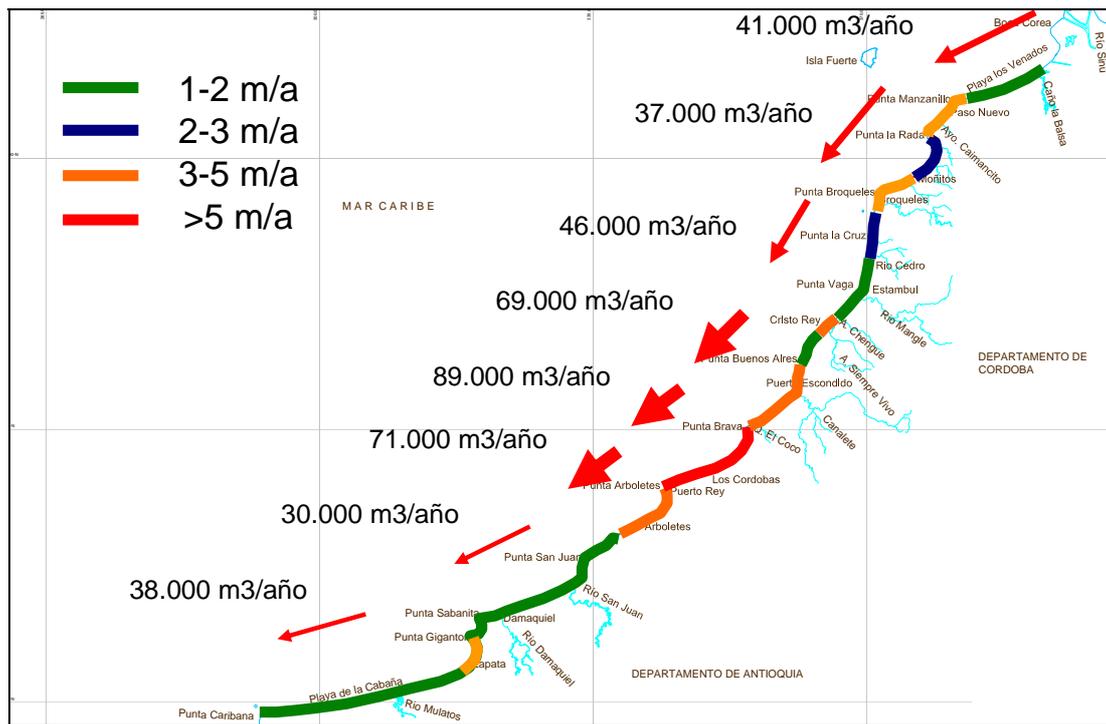


Figura 5.25. Transporte potencial de sedimentos debido a las corrientes del oleaje

Es de aclarar que, dadas las diferencias entre las distintas formulaciones para el cálculo del transporte sólido longitudinal, en algunos casos hasta con un orden de magnitud de diferencia, estos resultados deben ser entendidos en un contexto semicuantitativo. Es decir, dan una idea del comportamiento y los patrones de esta variable, pero en este caso no intentan reportar con toda fiabilidad las magnitudes estimadas.

5.4. FUNCIONAMIENTO MORFODINÁMICO DEL SISTEMA

5.4.1 Introducción

El equilibrio sedimentario de una playa depende fundamentalmente de:

1. Las fuentes de aportes y sumideros de arena que ésta tenga.
2. La capacidad de transporte de la dinámica marina local.
3. La geología de la zona, en cuanto a sus contornos de confinamiento lateral y transversal por fondo. Incluyendo dentro de éstos las actuaciones humanas (diques, espigones, muros, ...).

Para poder analizar cómo estos elementos influyen en la forma en planta de una playa, vamos a ver cómo se define la posición de la línea de costa en un tramo cualquiera, partiendo de la base de la ecuación de balance del flujo de sedimento.

En la siguiente figura se representa un tramo de costa, cuya forma se define mediante la posición de puntos a lo largo de la playa, expresada como distancias medidas desde tierra ($y_0, y_1, y_k, y_t, y_s...$). Si planteamos la ecuación de balance del flujo de sedimento en un sector de la playa comprendido entre dos perfiles A y B, separados una distancia Δx , se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = K \frac{\partial q}{\partial x}$$

donde:

y , es la posición de la línea de costa

q , es el flujo de sedimento

t , es el tiempo

K , es una constante de proporcionalidad.

Si planteamos esta ecuación en términos de diferencias finitas, la celda A-B, se obtiene que:

$$\frac{y_t - y_{t-1}}{\Delta t} = K \frac{q_B - q_A}{\Delta x}$$

despejando, la posición de la costa (y_t) en un instante t , se llega a:

$$y_t = y_{t-1} + (q_B - q_A)K \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Expresión que nos dice que la posición de la línea de costa, y_t , en la mitad del tramo A-B en un instante de tiempo t , depende de la posición de la misma línea de costa un tiempo anterior, y_{t-1} , y de la diferencia entre el flujo de sedimento que sale por la sección B (q_B), respecto del flujo de sedimento que entra por la sección A (q_A), que en otras palabras significa, lo que se acumula o se pierde entre A y B en un tiempo Δt .

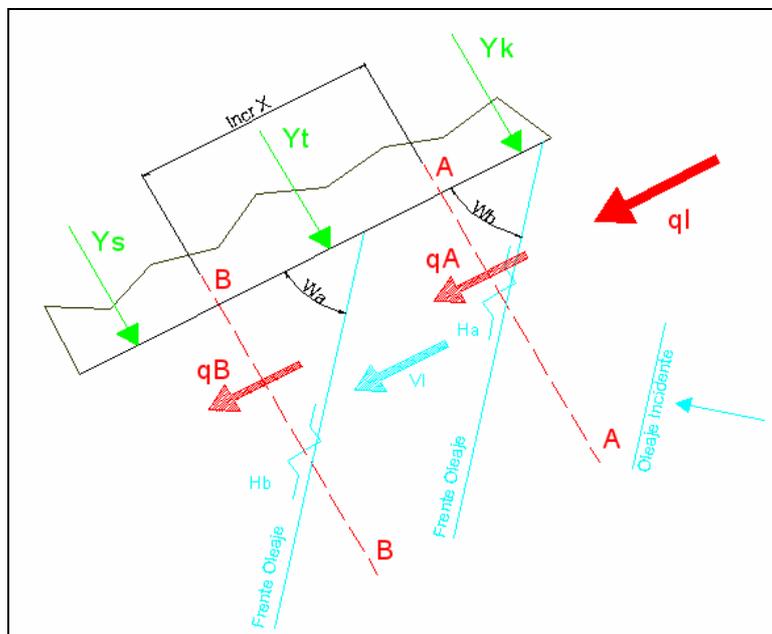


Figura 5.26. Esquema transporte litoral

Los flujos de sedimento en q_A ó q_B , están asociados a la corriente litoral, V_i , la cual a su vez, depende del oleaje incidente. Más precisamente el ángulo que forma el frente del

oleaje con la orientación local de la costa, θ_b , y el gradiente de altura de ola, ΔH , entre los puntos A y B:

$$\Delta H = \frac{H_B - H_A}{\Delta x}$$

Los flujos de q_A y q_B son la capacidad de transporte de arena debido a la dinámica marina local, lo cual no necesariamente corresponde con el transporte litoral real que aporta el sistema desde costa arriba, en este caso denominadas q_i .

Teniendo en cuenta las variables que definen la forma de la línea de costa anteriormente descritas, podemos encontrar distintos tipos de forma en planta:

Equilibrio “estático”

Se dice que una playa alcanza una forma en planta en equilibrio “estático” cuando la corriente neta litoral es nula ($V_i \sim 0$), lo que implica que el transporte litoral potencial y real es cero ($q_i = q_A = q_B = 0$). Esto implica que:

$$y_i = y_{i-1}$$

o, lo que es lo mismo, la línea de costa no varía en el tiempo llegando a una situación de equilibrio. Esto se consigue en playas encajadas o confinadas lateralmente, donde: (1) los elementos en sus extremos son lo suficientemente largos, para evitar que entre o salga arena del sistema ($q_i \sim 0$), y (2) las corrientes que se generan longitudinalmente por gradientes de altura de ola se compensan o anulan con las corrientes generadas por la oblicuidad de los frentes, razón por la cual $q_A = q_B = 0$.

Equilibrio “dinámico”

Una playa consigue una posición de equilibrio “dinámico”, cuando la corriente litoral es distinta de cero ($V_i \neq 0$) y el transporte litoral real es igual al potencial en las dos secciones ($q_i = q_A = q_B \neq 0$). Bajo esta situación, la línea de costa se mantiene en equilibrio. En el

caso de una playa recta con gradientes de altura de ola mínimos, la línea de costa toma la orientación que permite formar un ángulo, θ_b , entre el frente del oleaje y ésta, generando un transporte potencial igual al real de la zona (q_l). Para que la línea de costa llegue a conseguir este ángulo θ_b con los frentes, es necesario un apoyo costa abajo, entre más largo es este apoyo, mayor será el avance de la línea de costa, pero eso sí, manteniendo su forma.

Desequilibrio transitorio

Cuando la forma en planta de una playa que está en equilibrio “estático” o “dinámico” es modificada, ya sea porque se varía un contorno lateral, o se modifica la capacidad de transporte (modificaciones en la altura de ola y/o la oblicuidad de los frentes), esta comienza un proceso de modificación de su forma en planta, hasta conseguir nuevamente con el paso del tiempo, una condición de equilibrio “estático” o “dinámico”. Nótese que no se ha modificado en este caso el transporte litoral.

En la situación en que la capacidad de transporte es modificada, tenemos que q_B es distinta a q_A ($q_B \neq q_A$), presentándose dos opciones: que ($q_B - q_A > q_l$), en este caso la situación es de erosión en el sector A-B. La segunda opción es que ($q_B - q_A < q_l$), en tal caso la situación es acumulativa en el tramo A-B.

En el caso de la construcción de una obra perpendicular a la línea de costa o de la generación de un delta, por ejemplo, se genera aguas arriba un bloqueo del transporte litoral. Por lo tanto, $q_B \sim 0$, mientras q_A es similar a q_l , lo cual provoca una situación de acumulación, modificando la orientación de la línea de costa. La línea de costa al ir avanzando hacia el mar llega un momento en que lo sobrepasa, continuando nuevamente el paso de q_B , hasta conseguir con el tiempo un equilibrio “dinámico” donde $q_B \sim q_A \sim q_l$.

Aguas abajo ocurre lo contrario, $q_A \sim 0$ y $q_B \neq 0$, generando un proceso de erosión, con la complicación que $q_l \sim 0$ debido a la presencia de la obra (o del delta). El problema que se genera costa abajo es que no se podría llegar a un equilibrio “dinámico” si no se restituye q_l , ya sea porque el transporte litoral supera la estructura o de manera artificial por medio de un by-pass.

Desequilibrio sedimentario. Erosión neta

Esta situación sucede cuando la playa, o un tramo de la misma, no puede conseguir una situación de equilibrio “estático” o “dinámico”. Este caso sucede cuando la capacidad de transporte es mayor que el transporte litoral existente ($q_B - q_A > q_l$), ya sea porque se ha reducido el transporte litoral o en el caso costa abajo de una obra perpendicular a la costa (que, a efectos prácticos, también puede ser la formación de un delta), donde no se ha restituido el transporte litoral. En estos casos la playa continuamente va retrocediendo dado que la arena va siendo transportada costa abajo, con el paso de muchos años este proceso se va transmitiendo costa abajo, hasta llegar a desaparecer la arena existente.

5.4.2 Planteamiento conceptual del funcionamiento morfodinámico del sistema

En este punto del informe, es posible definir conceptualmente cómo funciona el sistema litoral estudiado desde el punto de vista morfodinámico. A continuación se describen los puntos que nos ayudan a entender los problemas de erosión observados durante los últimos 40 años entre Punta Caribana y el Delta de Tinajones, descritos con detalle en el Capítulo 3. Para este análisis nos hemos basado en lo reseñado en el apartado 5.4.1, en cuanto a los elementos que intervienen en el equilibrio sedimentario de las playas:

1. Las fuentes de aportes y sumideros de arena que ésta tenga.
2. La capacidad de transporte de la dinámica marina local.

5.4.2.1 Las fuentes de aportes y sumideros de arena que ésta tenga

1. El principal aporte de sedimentos del tramo litoral analizado es el río Sinú, con un caudal líquido medio multianual de 390 m³/s y una carga media multianual de 0.27 Kg/m³. Su influencia abarca toda la zona.

2. Se ha creado un desequilibrio sedimentario hacia aguas abajo del Delta de Tinajones, debido a la creación de esta unidad fisiográfica. Los sedimentos que copaban la capacidad transportadora de las corrientes de deriva entre éste y Punta Caribana se vienen depositando en el mismo Delta desde 1940. Se genera, entonces, una falta de sedimentos en esta zona que es cubierta por la arena de las playas.
3. La desembocadura del río Sinú generó un “espólón dinámico” que cortó la corriente de deriva y, por ende, el transporte de sedimentos hacia aguas abajo del delta de Tinajones debido las corrientes de oleaje.
4. Esta dinámica impuesta por la desembocadura del río Sinú parece no tender hacia un equilibrio en el corto plazo.
5. Otros pequeños afluentes también vierten sus aguas a la zona. Los ríos Mulatos, Damaquiel y San Juan lo hacen en las zonas 1 y 2. El río Canalete desemboca en la zona 5, el río Mangle en la zona 6 y el río Cedro en la zona 7. Su influencia no va más allá de la misma zona de desembocadura, motivo por el cual se observa una erosión menos intensa donde mayores son los aportes de estos pequeños ríos.
6. Existe una intensa extracción de arena por parte de los pobladores de la zona. En particular, las zonas de Damaquiel y Arboletes han sido las más afectadas por esta causa.

5.4.2.2 La capacidad de transporte de la dinámica marina local

1. Las corrientes de deriva necesitan copar su capacidad transportadora de alguna manera. Los sedimentos que transportaban ahora están atrapados en la formación del Delta de Tinajones. Para ello hacen uso de los sedimentos de las playas.
2. El transporte de sedimentos asociado a dichas corrientes es, en mayor medida (80%), en sentido Norte-Sur.
3. La capacidad transportadora del oleaje es muy superior a los aportes sedimentarios de la zona. Por este motivo, las playas se encuentran en un desequilibrio sedimentario con erosión neta.
4. Por estas razones, las zonas de mayor erosión también están asociadas a mayores tasas de transporte de sedimentos debido a las corrientes de rotura del oleaje.
5. Ese proceso erosivo parece estar asociado a un retroceso muy homogéneo de la línea de costa en cada zona identificada.

CAPITULO 6

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS



6. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Una vez caracterizada la zona de estudio, entendidos los fenómenos que en esta suceden y teniendo en cuenta el análisis de riesgo de la zona de estudio, se han planteado una serie de alternativas que permitan dar solución a los problemas asociados a la erosión costera en el municipio de Arboletes.

Una de las formas más efectivas de intervenir ante el problema de erosión acelerada, es la implementación de sistemas cerrados en equilibrio estático, que garanticen como su nombre lo dice, el equilibrio estático sedimentario, es decir, que además de que el balance sedimentario sea igual a cero, no exista ningún tipo de flujo sedimentario de entrada y salida en el sistema. De esta forma se crea un sistema aislado de los procesos erosivos que suceden en el exterior de éste, evitando la pérdida de sedimentos del sistema y por ende la erosión.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PLANTEADAS

Para afrontar el problema de erosión costera en Arboletes se han planteado diversas alternativas, acordes con el funcionamiento morfodinámico de la zona de interés, los aspectos socioeconómicos, y todas las variables físicas que puedan tener alguna influencia sobre los resultados que se puedan esperar de dichas actuaciones. Igualmente se ha tenido en cuenta la disponibilidad de materiales (arena, roca, material de relleno, hormigón, etc.) que puedan influir en la viabilidad de cualquiera de estas alternativas de solución.

Se han presentado ocho alternativas diferentes que pueden ser planteadas de manera independiente o mediante su combinación. Las alternativas propuestas son:

- Dique en Punta Rey
- Tómbolos en Arboletes
- Tómbolos en Volcán de lodo

- Espolones en Arboletes
- Espolones en Volcán de lodo
- Paseo marítimo en Punta Rey
- Paseo marítimo en Minuto de Dios
- Tómbolos y paseo marítimo en Arboletes

A continuación se describen cada una de las alternativas planteadas de forma independiente y se analiza su influencia sobre la dinámica litoral de la zona.

6.1.1. DIQUE EN PUNTA REY

Se propone la construcción de un Dique de abrigo de 1450 m de longitud, entre Punta Rey e Isla Rey, y la regeneración de 3 km de playas entre el volcán de lodo y Punta Rey.

El dique se plantea en cuatro secciones diferentes, dependiendo principalmente de la profundidad de emplazamiento de cada uno de los tramos, con el objeto de disminuir los costos del proyecto sin perjudicar la estabilidad de la estructura.

La estructura estaría compuesta por ripio de cantera en su núcleo y escolleras de diversos tamaños en los mantos principal y secundario. El último tramo del dique estaría formado por bloques cúbicos de hormigón, debido fundamentalmente al peso de los elementos necesarios para garantizar la estabilidad y a la escasez de material pétreo con las características necesarias en la zona.

Para la regeneración de las playas se plantea el dragado desde una zona de préstamo y posterior vertido de arenas marinas en la zona de interés, alcanzando un volumen total de 120.000 m³ de arena. En la Figura 6.1 se presenta un esquema de esta alternativa. Igualmente en el anexo de planos, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.

6.1.2. TÓMBOLOS EN ARBOLETES

Formación de Tómbolos mediante la construcción de 7 diques exentos en frente del casco municipal de Arboletes de 100 m de longitud cada uno, a una distancia de 85 m de la línea de costa, y la correspondiente regeneración de las playas abrigadas por estas estructuras.

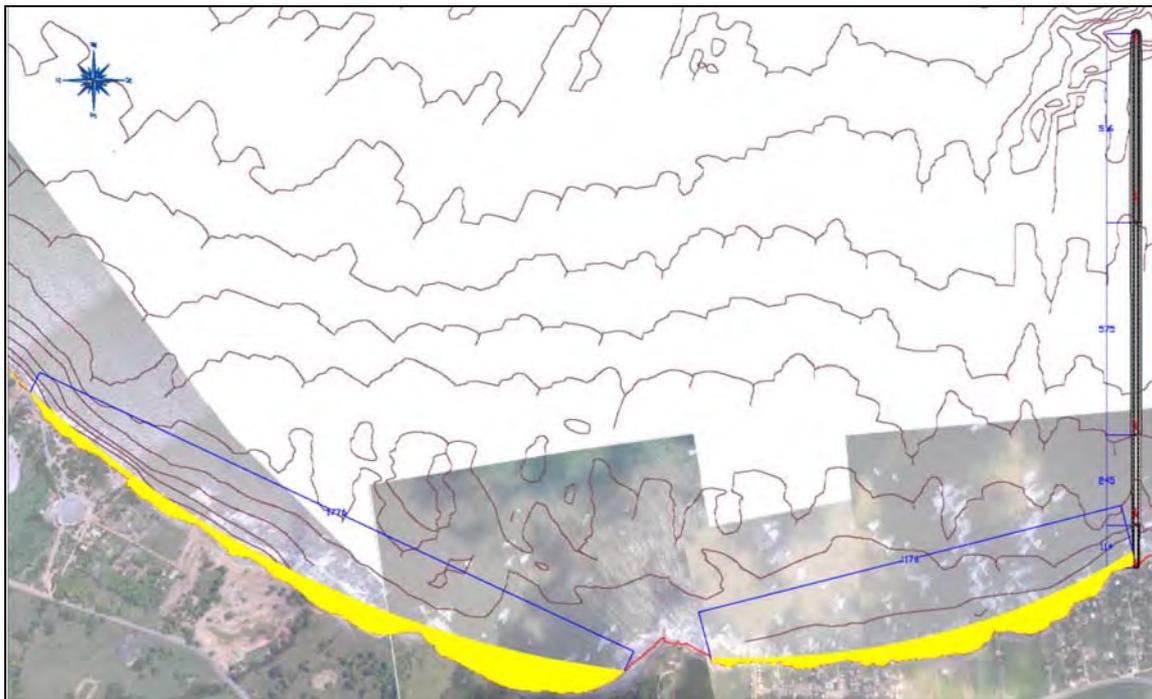


Figura 6.1. Dique de Punta Rey

Las estructuras estarían compuestas por ripio de cantera en su núcleo y escolleras de 500 kg en el manto principal y 650 kg en los morros. De igual forma, para su construcción se hace necesario la ejecución de un terraplén a modo de vial de acceso hasta la estructura exenta (forma de T), compuesto por ripio de cantera, el cual se dejara in situ una vez finalizadas las obras, contribuyendo con la estabilización de las playas y disminuyendo la cantidad de arena necesaria para la formación de las mismas.

Para la regeneración de las playas se plantea el dragado desde una zona de préstamo y posterior vertido de arenas marinas en la zona de interés, alcanzando un volumen total de 100.000 m³ de arena. En la Figura 6.2 se presenta un esquema de esta alternativa.

Igualmente en el anexo de planos, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.

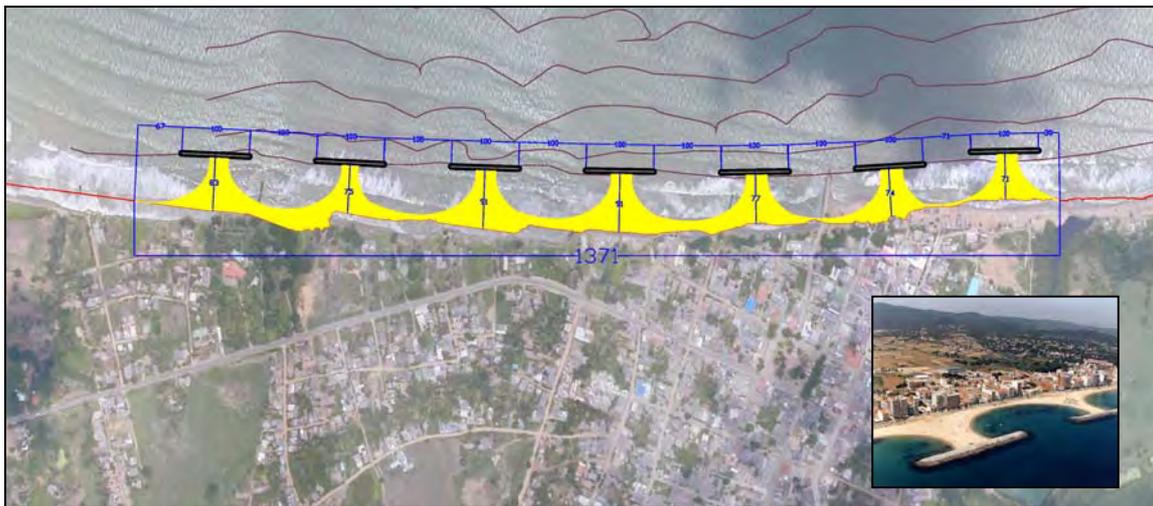


Figura 6.2. Tómbolos en Arboletes

6.1.3. TÓMBOLOS EN VOLCÁN DE LODO

Formación de Tómbolos mediante la construcción de 3 diques exentos en frente del volcán de lodo de 100 m de longitud cada uno, a una distancia de 100 m de la línea de costa, y la correspondiente regeneración de las playas abrigadas por estas estructuras.

Las estructuras estarían compuestas por ripio de cantera en su núcleo y escolleras de 500 kg en el manto principal y 650 kg en los morros. De igual forma, para su construcción se hace necesario la ejecución de un terraplén a modo de vial de acceso hasta la estructura exenta (forma de T), compuesto por ripio de cantera, el cual se dejara in situ una vez finalizadas las obras, contribuyendo con la estabilización de las playas y disminuyendo la cantidad de arena necesaria para la formación de las mismas.

Para la regeneración de las playas se plantea el dragado desde una zona de préstamo y posterior vertido de arenas marinas en la zona de interés, alcanzando un volumen total de 60.000 m³ de arena. En la Figura 6.3 se presenta un esquema de esta alternativa.

Igualmente en el anexo de planos, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.

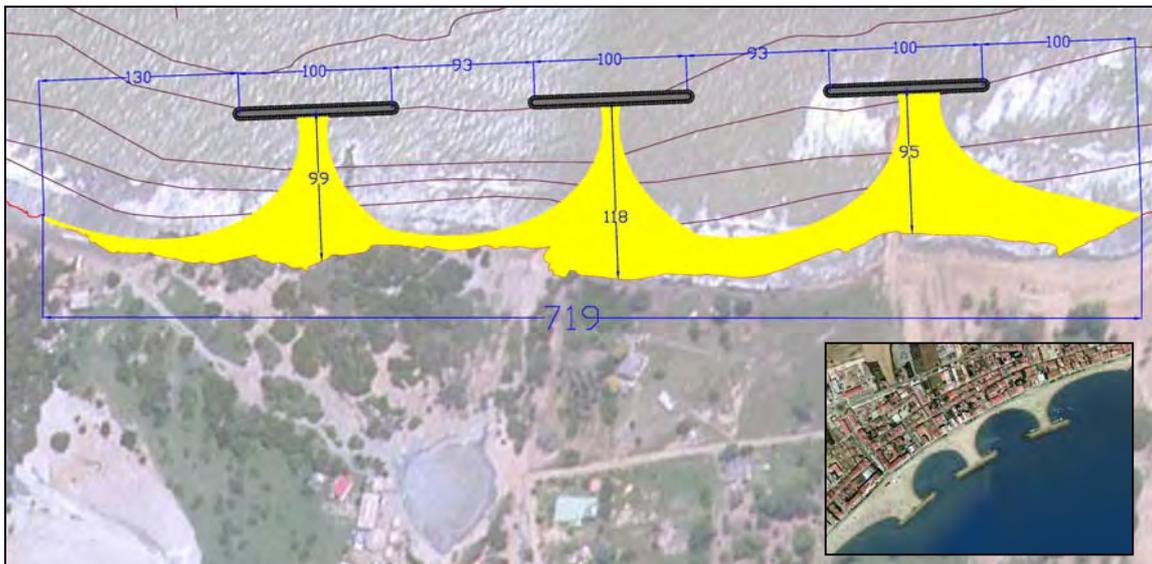


Figura 6.3. Tómbolos en volcán de lodo

6.1.4. ESPOLONES EN ARBOLETES

Se plantea la regeneración de las playas y su estabilización, mediante la implementación de 8 espolones perpendiculares a la línea de costa en frente del casco municipal de Arboletes de 130 m de longitud cada uno, con una distancia de 145 m de separación entre cada uno de ellos y el posterior vertido de arenas para la regeneración de las playas abrigadas por estas obras.

Las estructuras estarían compuestas por ripio de cantera en su núcleo y escolleras de 1 tonelada en el manto principal y 1.25 toneladas en el morro. La cota de coronación sería la +2.50, con un ancho de 9.30 m, y el talud de los diques tendrá una pendiente 3H:2V.

Para la regeneración de las playas se plantea el dragado desde una zona de préstamo y posterior vertido de arenas marinas en la zona de interés, alcanzando un volumen total de 110.000 m³ de arena. En la Figura 6.4 se presenta un esquema de esta alternativa.

Igualmente a manera de anexo, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.

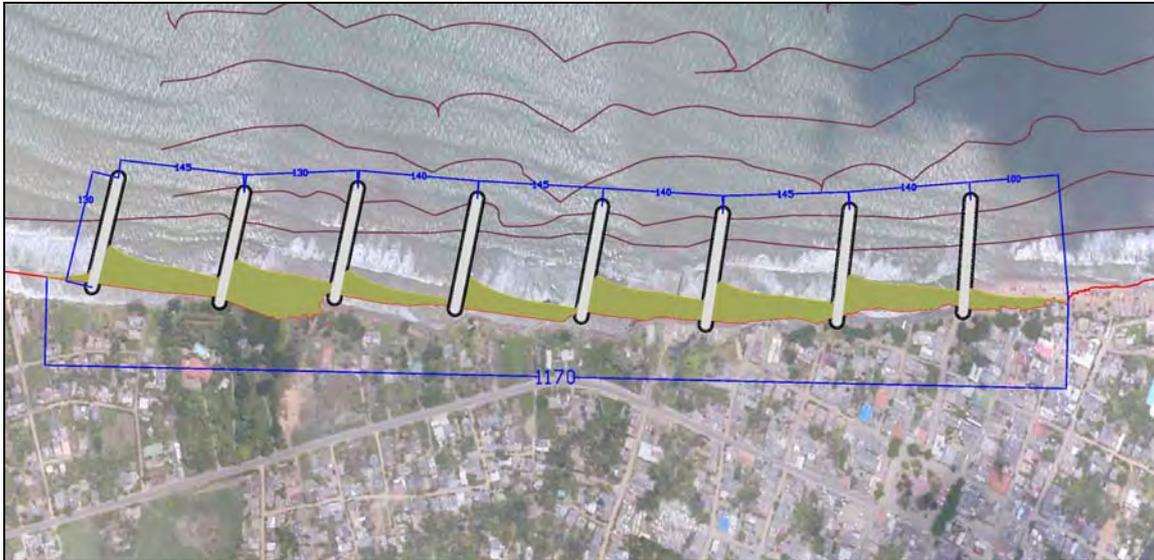


Figura 6.4. Espolones en Arboletes

6.1.5. ESPOLONES EN VOLCÁN DE LODO

Se plantea la regeneración de las playas y su estabilización, mediante la implementación de 4 espolones perpendiculares a la línea de costa en frente del Volcán de lodo, al igual que en el casco urbano de Arboletes, de 130 m de longitud cada uno, con una distancia de 120 m de separación entre cada uno de ellos y el posterior vertido de arenas para la regeneración de las playas abrigadas por estas obras.

Las estructuras estarían compuestas por ripio de cantera en su núcleo y escolleras de 0.5 tonelada en el manto principal y 0.65 toneladas en el morro. La cota de coronación sería la +2.00, con un ancho de 8.70 m, y el talud de los diques tendrá una pendiente 3H:2V.

Para la regeneración de las playas se plantea el dragado desde una zona de préstamo y posterior vertido de arenas marinas en la zona de interés, alcanzando un volumen total de 65.000 m³ de arena. En la Figura 6.5 se presenta un esquema de esta alternativa.

Igualmente a manera de anexo, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.

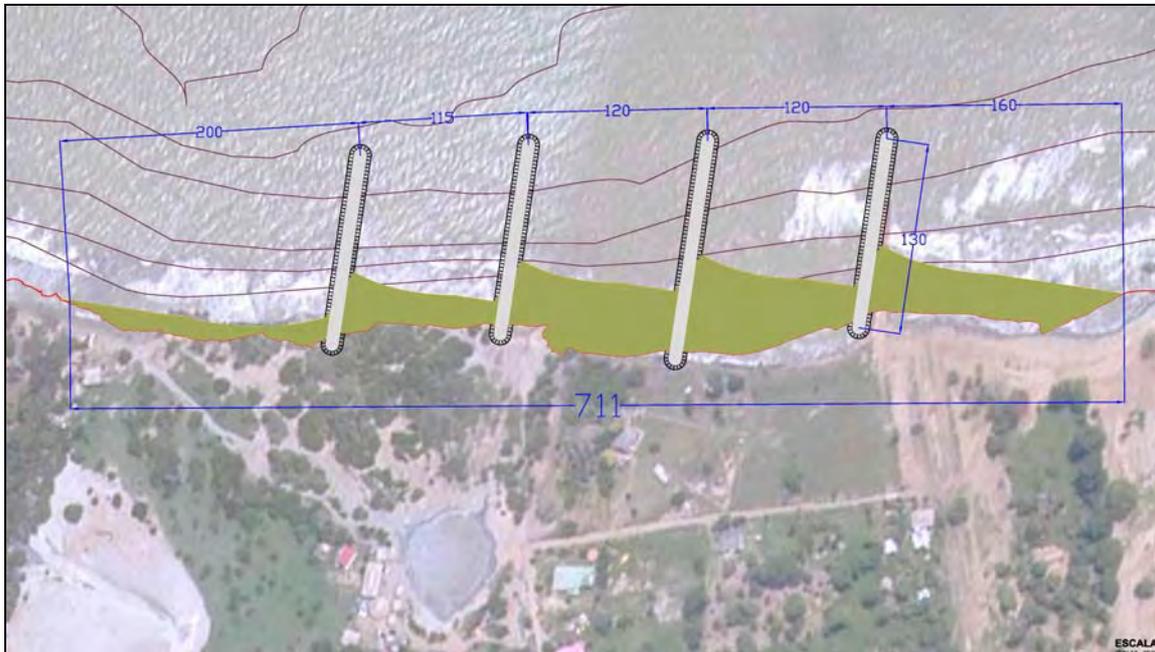


Figura 6.5. Espolones en volcán de lodo

6.1.6. PASEO MARÍTIMO EN PUNTA REY

Otra alternativa que puede ser implementada para combatir el avance de la erosión costera son las obras de protección longitudinal, paralelas a la línea de costa para detener su retroceso. Se basan básicamente en generar una superficie de contacto con el mar, capas de soportar la acción del oleaje y las corrientes producidas por este, garantizando así el no retroceso de la línea de costa definida en el proyecto. Es importante destacar el importante papel que juegan los diferentes elementos de las estructuras planteadas, ya que cada uno de ellos contribuye a generar las condiciones de filtro necesarias, para que la parte más fina del talud no se erosione al filtrarse por los diferentes intersticios entre las capas de la estructura de protección.

La alternativa aquí planteada considera la infraestructura necesaria para garantizar la estabilidad de los taludes, y susceptible de ser posteriormente adecuada como paseo

marítimo, dotándola de los elementos básicos necesarios para prestar este servicio a los usuarios.

Las obras se basan en una protección longitudinal de 825 m en el sector de Punta Rey, conformada por un talud 3H:2V de material granular compuesto por un núcleo de ripio de cantera y un manto de escollera de 350 kg. El espacio resultante entre el talud actual y la estructura deberá ser llenado con material de relleno seleccionado, garantizando así la condición de filtro y evitando la posible socavación del trasdos de la estructura.

En la Figura 6.6 se presenta un esquema de esta alternativa. Igualmente en el anexo de planos, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.



Figura 6.6. Paseo marítimo de Punta Rey

6.1.7. PASEO MARÍTIMO EN MINUTO DE DIOS

Al igual que en Punta Rey, las obras se basan en una protección longitudinal en este caso de 480 m en frente de la población de Minuto de Dios, conformada por un talud 3H:2V de material granular compuesto por un núcleo de ripio de cantera y un manto de escollera de 350 kg. El espacio resultante entre el talud actual y la estructura deberá ser llenado con material de relleno seleccionado, garantizando así la condición de filtro y evitando la posible socavación del trasdos de la estructura.

En la Figura 6.7 se presenta un esquema de esta alternativa. Igualmente en el anexo de planos, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.



Figura 6.7. Paseo marítimo de Minuto de Dios

6.1.8. TÓMBOLOS Y PASEO MARÍTIMO EN ARBOLETES

Esta alternativa se fundamenta en la combinación de dos de las alternativas anteriormente descritas, buscando optimizar de manera eficiente la superficie de playa y la protección de la línea de costa frente a la erosión.

La distribución espacial que aquí se presenta es solamente un ejemplo de las múltiples combinaciones que podrían resultar, al mezclar los tómbolos y los paseos marítimos en frente del casco urbano del municipio de Arboletes. En caso de ser seleccionada esta alternativa como solución, debería ser estudiada y consensuada con las diferentes

entidades competentes, para definir la configuración en planta, más adecuada a las necesidades de la comunidad.

En la Figura 6.8 se presenta un esquema de esta alternativa. Igualmente en el anexo de planos, se encuentran consignados los planos correspondientes a la planta general y las secciones tipo de los prediseños de esta alternativa.

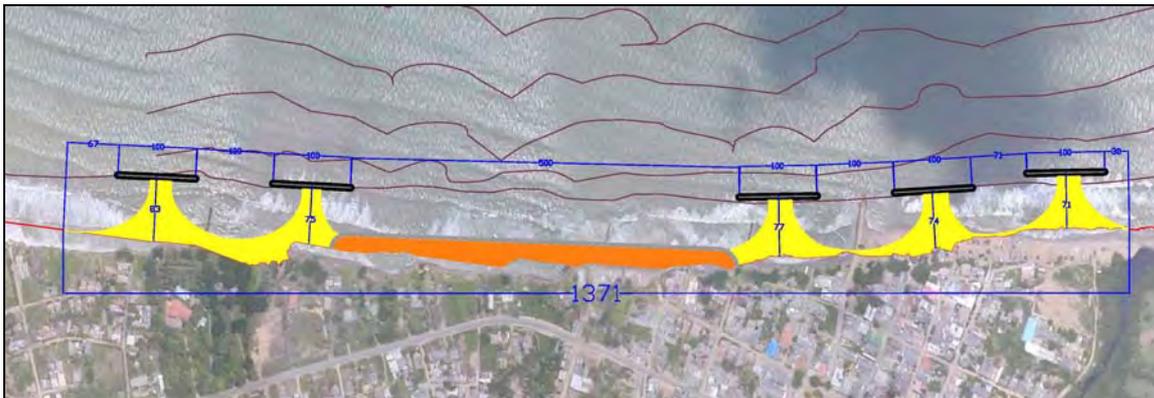


Figura 6.8. Tómbolos y paseo marítimo en Arboletes

6.2. DIMENSIONAMIENTO DE LAS OBRAS

Cada una de las alternativas que aquí se presentan, han sido previamente predimensionadas para garantizar la estabilidad estructural de las mismas. En concreto, se ha llevado a cabo la obtención de los pesos necesarios de los materiales que componen las estructuras.

6.2.1. DETERMINACIÓN DEL OLEAJE DE DISEÑO

Para llevar a cabo el dimensionamiento es necesario obtener previamente el oleaje de diseño de la estructura en estudio.

Oleaje extremal en aguas profundas

Para la determinación de los períodos de retorno con los cuales cuantificar las acciones (básicamente oleaje) necesarias en el dimensionamiento, se han seguido las

recomendaciones que la ROM 0.2-90 efectúa en sus apartados 2.2 y 3.2.3.1. (Recomendaciones para Obras Marítimas -Acciones en los proyectos de obras marítimas y portuarias – Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente de España y Puertos del Estado).

En dichas recomendaciones se establece que en el caso que las acciones procedan de datos estadísticos (como ocurre con el oleaje) el valor de la acción de cálculo será el obtenido a partir de un cierto período de retorno, R. Dicho período de retorno estará asociado a una cierta probabilidad de presentación o riesgo (E) durante el intervalo de tiempo asociado a dicho proyecto, conocido también como vida útil de la obra (Lf) mediante la expresión:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{L_f}$$

Las obras previstas en este proyecto constructivo corresponden a una infraestructura de carácter general con un nivel de seguridad 1, por lo que la vida útil asociada será, según la Tabla 6.1

$$L_f = 25 \text{ años}$$

El valor de la vida útil de la obra Lf se obtiene según lo especificado en la Tabla 6.1. Por lo que respecta al riesgo E su valor se obtiene según lo especificado en la tabla 6.2.

La posibilidad de pérdidas humanas en caso de destrucción de la obra puede considerarse reducida, mientras que la repercusión económica en caso de inutilización de la obra se ha tomado como baja.

De este modo en caso de considerar como criterio de diseño el Riesgo de Inicio de Averías como corresponde a estructuras en talud, se obtiene un período de retorno:

$$R = 36,57 \text{ años}$$

Tabla 6.1. Vida útil de las obras marítimas

Tipo de obra o instalación	Nivel de seguridad		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
De carácter general (G)	25	50	100
De carácter industrial específico (I)	10	25	50

Vidas útiles mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo (años)
Tabla 2.2.1.1 de la ROM 0.2-90

Infraestructura de carácter general (G): aquellas no ligadas a la explotación de una instalación industrial o un yacimiento

Infraestructura de carácter industrial específico (I): aquellas ligadas a la explotación de una instalación industrial o un yacimiento

Nivel de seguridad 1: Obras e instalaciones de interés o auxiliar.

Riesgo pequeño de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.

Por ejemplo: regeneración de playas, puertos deportivos, emisarios, pavimentos...

Nivel de seguridad 2: Obras e instalaciones de interés general

Riesgo moderado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.

Por ejemplo: grandes puertos, emisarios de grandes ciudades...

Nivel de seguridad 3: Obras contra inundaciones o de carácter supranacional.

Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.

Por ejemplo: defensa de núcleos urbanos o bienes industriales...

Tabla 6.2. Riesgo en el diseño de obras marítimas

		POSIB DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		Reducida	Esperable
a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA (Índice $r = \text{Coste pérdidas}/\text{Inversión}$)	Baja	0,50	0,30
	Media	0,30	0,20
	Alta	0,25	0,15
b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL			
		POSIB DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		Reducida	Esperable
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA (Índice $r = \text{Coste pérdidas}/\text{Inversión}$)	Baja	0,20	0,15
	Media	0,15	0,10
	Alta	0,10	0,05
<p>Riesgos máximos admisibles para la determinación, a partir de datos estadísticos, de valores característicos de cargas variables para fase de servicio y condiciones extremas Tabla 3.2.3.1.2. de la ROM 0.2-90</p>			
<p>Riesgo de iniciación de averías (IA): en obras flexibles, semirrígidas o de rotura en general reparable (daños menores a un nivel prefijado función del tipo estructural)</p> <p>Riesgo de destrucción total (D): en obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación</p> <p>Repercusión económica en caso de inutilización de la obra: se define por el índice $r = \text{Coste de pérdidas directas e indirectas} / \text{Inversión}$. Si $r=5$ la repercusión es baja y si $r > 20$ la repercusión es alta</p>			

En el Capítulo de Caracterización Hidrodinámica, se efectúa un análisis de los regímenes medio y extremal del oleaje en la zona. Con base en las correlaciones establecidas, se puede obtener la altura de ola significativa asociada, para cada dirección, al período de retorno de cálculo.

Oleaje extremal a pie de obra

Para determinar el oleaje extremal a pie de obra u oleaje de cálculo, se hace uso de los resultados de las propagaciones realizadas desde aguas profundas hasta la zona de interés mediante modelos numéricos.

De este modo se obtiene la altura de ola significativa de diseño a pie de obra, mostradas para cada caso a continuación, en la que se consideran los coeficientes de propagación asociados a los oleajes de aguas profundas:

Tabla 6.3. Características del oleaje extremal a pie de obra

Caso	Estructura	Hso	Kr _{obra}	Hs _{obra}	Hs _{rotura}
01	Dique de Punta Rey – Sección 1 (0 - 2 m)	6.60	0.197	1.30	1.60
02	Dique de Punta Rey – Sección 2 (2 - 3 m)	6.60	0.227	1.50	2.35
03	Dique de Punta Rey – Sección 3 (3 - 4 m)	6.60	0.242	1.60	2.72
04	Dique de Punta Rey – Sección 4 (4 - 4 m)	6.60	0.303	2.00	3.09
05	Dique de Punta Rey – Morro	6.60	0.303	2.00	3.09
06	Diques exentos casco urbano Arboletes	6.60	0.220	1.45	1.60
07	Diques exentos volcán de lodo	6.60	0.182	1.20	1.50
08	Espolones perpendiculares Arboletes	6.60	0.227	1.50	1.97
09	Espolones perpendiculares volcán de lodo	6.60	0.197	1.30	1.60
10	Paseos marítimos	6.60	0.091	0.60	1.00

Limitación por fondo

Una vez obtenido el oleaje de diseño o de cálculo se ha de comprobar su compatibilidad con el fondo, es decir la limitación que imponen los procesos de rotura al oleaje incidente, a medida que disminuye el calado en la zona de rompientes; para lo cual se utiliza la formulación de Goda (1975). En la tabla 6.3 se ha tenido en cuenta la limitación por fondo para la determinación del oleaje de diseño.

$$H_s = 0.17 L_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi d_0}{L_0} \left(1 + 15 \tan^4 \beta \right) \right] \right\}$$

6.2.2. Dimensionamiento de las obras

La 2a Comisión sobre oleaje de la PIANC (1976) presentó la siguiente expresión general adimensional para el dimensionamiento de los mantos de los diques en talud.

$$\frac{W \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3}{H_{\text{cálculo}}^3 \cdot \rho_s} = f(\alpha)$$

Siendo ρ_s la densidad del material del cual están constituidos los bloques de protección, ρ_w la densidad del agua, $H_{\text{cálculo}}$ la altura de ola de diseño, W el peso de los bloques de protección y $f(\alpha)$ una función que depende del ángulo del talud, del tipo de bloques y de su disposición geométrica. Dicha expresión se puede describir como

$$W = \frac{\rho_s \cdot H_{\text{cálculo}}^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cdot N_s^3} = \frac{\rho_s \cdot H_{\text{cálculo}}^3}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 K_D \cdot \cot \alpha}$$

siendo

N_s el número de estabilidad,

K_D el coeficiente de estabilidad

α el ángulo que forma el talud con la horizontal.

En el caso de que el manto exterior esté formado por bloques paralelepípedicos existen varias formulaciones para la obtención de los parámetros que intervienen en la expresión de cálculo: la de Hudson (1974) y la de Van der Meer (1988).

La formulación de Hudson es la más antigua y sencilla ya que establece un valor fijo para KD igual a 7.8. Frente a su simplicidad esta formulación presenta una serie de inconvenientes entre los que se puede citar:

- Potenciales efectos de escala ya que la escala de los ensayos a partir de la cual se dedujo era pequeña
- El uso solamente de oleaje regular
- La no inclusión del período del oleaje o la duración de la tormenta
- La no descripción de un nivel de daños
- El uso exclusivo de estructuras no rebasables con núcleo permeable

Es válida para diques con cualquier pendiente y manto exterior formado por dos capas de bloques y va asociada a un nivel de daños $D = 0-5 \%$. El peso específico escogido para el hormigón de los bloques es $2,3 \text{ T/m}^3$. Al realizar los cálculos ha de utilizarse la altura de ola significativa $H1/10$.

La formulación de Van der Meer (1988) es más reciente y permite tener en cuenta algunos factores que la de Hudson obvia, tales como el período del oleaje, la duración del temporal de diseño o el nivel de daños asociado, si bien resulta válida solamente para diques con talud $1V:1,5H$ y con un manto exterior formado por dos capas de bloques cúbicos ($a \times a \times a$). Aún así puede obtenerse el valor del peso de los bloques para un talud de pendiente distinta a partir del peso para una pendiente $1:1,5$ deducido por la formulación de Van der Meer considerando la relación $W_{\alpha} = W_{1,5} \cdot (1,5 / \cotg \alpha)$ que se basa en considerar que el coeficiente de estabilidad KD es independiente del talud (Hudson).

La formulación de Van der Meer define N_s como:

$$N_s = (6,7 \cdot N_o^{0,4} / N^{0,3} + 1,0) \cdot S_z^{-0,1}$$

donde:

N_o es el nivel de daños definido como el número de bloques desplazado.

N es el número de olas a las cuales estará sometido el dique durante la tormenta de cálculo

Sz es el peralte de la ola definido como $Sz = 2\pi Hs / gTz^2$

Van der Meer establece $No = 0$ como el nivel de daños denominado "iniciación de averías" y $No = 2$ como la "iniciación de rotura o fallo". Al realizar los cálculos ha de utilizarse la altura de ola significativa Hs .

El abanico de daños No estudiado abarca desde el 0 hasta el 2. Por lo que respecta al número de olas N se ha escogido un valor que garantice una duración del temporal de diseño característica de esta zona. Consecuentemente se ha escogido un valor de $N = 3000$ al cual le corresponde una duración de temporal entre 5 y 10 horas en función del período. Asimismo se ha estudiado el intervalo de períodos entre el valor mínimo y máximo calculados para cada caso.

Los cálculos se han realizado para cada zona considerando el rango de profundidades de cada una y tomando la altura de ola Hs en rotura presente en cada profundidad.

Para el dimensionamiento del manto exterior de diques resulta conveniente utilizar el criterio de daños conocido como "iniciación de averías". Si se escoge este criterio de daños ($No = 0$) los bloques deberían tener un peso muy elevado.

Esto es debido a que la definición que otorga Van der Meer a la "iniciación de averías" para bloques cúbicos no es consistente con la dada para escolleras, siendo en el primer caso mucho más estricta. En efecto la iniciación de averías en escolleras se produce según Van der Meer para $Sd = 2$ (si $\cot\alpha < 3,0$) y según Losada et al. para $Sd = 1,5 - 2,5$, es decir, se admite un pequeño desplazamiento de los bloques. Sin embargo en bloques cúbicos la iniciación de averías se produce para $D = 0$ %, es decir, no se permite desplazamiento alguno de los bloques. No es de extrañar, por tanto, el peso tan elevado para los bloques si se pretenden diseñar siguiendo este criterio. Por otra parte Losada et al. aplican el mismo criterio de iniciación de averías tanto a escolleras naturales como a bloques paralelepípedicos, es decir, permitiendo cierto movimiento, lo cual reafirma la consideración de que el nivel de "iniciación de averías" propuesto por Van der Meer es

demasiado estricto. Dado que el nivel de daños de Hudson ($D = 5\%$) está muy próximo al de "iniciación de rotura" de Van der Meer, se escogerá para el dimensionamiento en el caso de utilización de bloques de hormigón un nivel de daños inferior. En nuestro caso se ha tomado como nivel de daños para el dimensionamiento $No = 0,5$.

A modo de ejemplo en la Figura 6.9 y Figura 6.10 se presentan los resultados obtenidos para el tramo 3 del dique de Punta Rey, donde se puede observar la variación del peso de los elementos del manto principal de escoleras, respecto al periodo medio y la altura significativa de ola, obtenidos a partir de la formulación de Van der Meer.

Finalmente en la tabla 6.4 se presentan los pesos de cada uno de los elementos del manto principal de cada una de las estructuras analizadas:

Tabla 6.4. Características de los mantos principales de cada una de las alternativas analizadas

Caso	Estructura	W (t)	Material	Densidad (t/m3)
01	Dique de Punta Rey – Sección 1 (0 - 2 m)	0.50	Escollera	2.65
02	Dique de Punta Rey – Sección 2 (2 - 3 m)	1.00	Escollera	2.65
03	Dique de Punta Rey – Sección 3 (3 - 4 m)	1.15	Escollera	2.65
04	Dique de Punta Rey – Sección 4 (4 - 4 m)	3.20	B.C.H	2.30
05	Dique de Punta Rey – Morro	4.80	B.C.H	2.30
06	Diques exentos casco urbano Arboletes	0.50	Escollera	2.65
07	Diques exentos volcán de lodo	0.50	Escollera	2.65
08	Espolones perpendiculares Arboletes	1.00	Escollera	2.65
09	Espolones perpendiculares volcán de lodo	0.50	Escollera	2.65
10	Paseos marítimos	0.35	Escollera	2.65

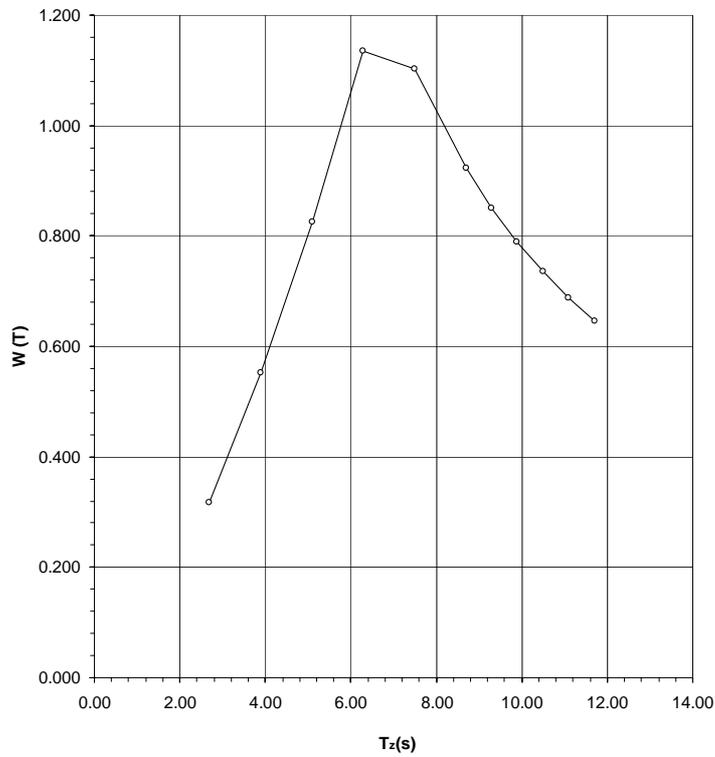


Figura 6.9. Variación del peso W en función del periodo medio T_p

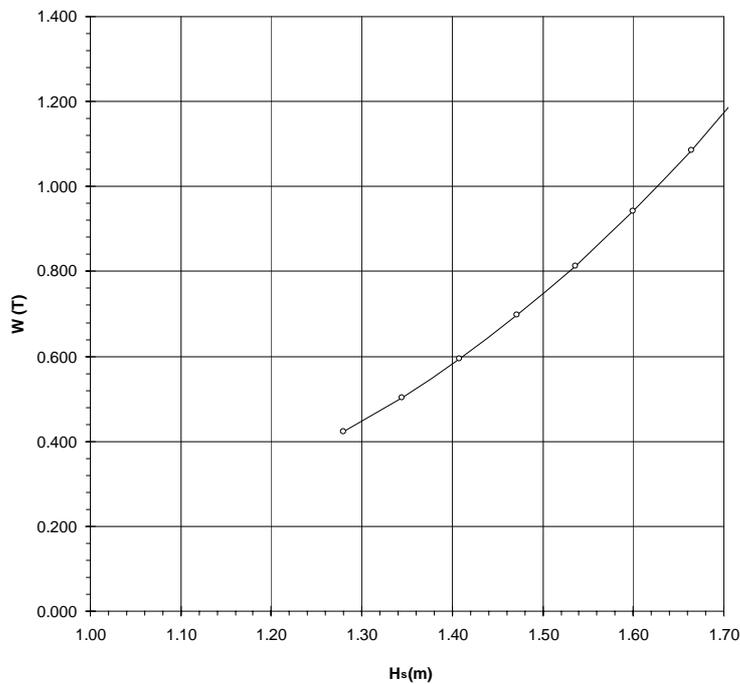


Figura 6.10. Variación del peso W en función de la altura significativa de ola H_s

6.3. INFLUENCIA SOBRE LA DINÁMICA LITORAL

Para ver la influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno, se han propagado dos casos de oleaje, un oleaje típico del régimen extremal (que coincide con la altura de ola significativa de 15 años de período de retorno) y un oleaje característico de la rama alta del régimen medio, lográndose así, un análisis en el corto y largo plazo respectivamente:

Caso 1: Norte, $H_s = 6$ m, $T_p = 10$ s

Caso 2: Norte, $H_s = 3$ m, $T_p = 9$ s

Cabe resaltar que las alternativas basadas en la conformación de paseos marítimos, no tienen influencia sobre la dinámica litoral, ya que al tratarse de una obra longitudinal en la zona de ascenso y descenso, que pretende defender los taludes de los efectos erosivos del oleaje, interviene única y exclusivamente en el cumplimiento de los objetivos planteados, sin causar una retención externa de los sedimentos transportados por la deriva litoral, garantizando únicamente la estabilidad de la línea de costa, sin modificar el oleaje incidente ni las corrientes asociadas a los procesos de rotura de éste.

6.3.1. SITUACIÓN ACTUAL

Para analizar la influencia de las obras sobre la dinámica litoral, se hace necesario caracterizar la situación en la que se encuentra la zona de interés, y de esta forma, mediante la comparación de las diferentes variables que intervienen en la dinámica litoral, se puede proceder a evaluar la influencia de cada una de las actuaciones propuestas.

En los capítulos anteriores se ha presentado un completo análisis de la hidrodinámica de la zona de estudio y la dinámica litoral reinante en la zona. Se ha caracterizado el clima marítimo y propagado el oleaje desde profundidades indefinidas, hasta la zona de interés, analizando los sistemas de corrientes en playas y la dinámica litoral en todo el dominio.

A continuación se presenta un análisis local de las diferentes variables que intervienen directamente en los procesos, como son el oleaje y los sistemas de corrientes, para la zona comprendida entre Punta Rey y la población de Arboletes, y sus zonas de influencia.

Oleaje

Para analizar el oleaje en esta zona, se ha realizado un estudio de propagación del oleaje en una malla de detalle, propagando desde profundidades indefinidas hasta la zona de interés, los dos casos de oleaje extremal y de clima medio mencionados anteriormente.

La Figura 6.11 y Figura 6.12 muestran respectivamente, la altura de ola significativa y los vectores de oleaje para los casos 1 y 2. Se puede observar que hay dos zonas de difracción, Punta Rey y la isla localizada frente a ésta. Si bien esta isla tiene un efecto de abrigo sobre buena parte del tramo analizado, la zona de mayor abrigo se encuentra a unos 500 m al norte del Volcán de Lodo (Figura 6.11). Precisamente entre esta zona y Punta Rey es donde el oleaje incide con mayor oblicuidad, alcanzando incluso ángulos de 25° con respecto a la línea de costa (Figura 6.12). Cabe resaltar que la energía del oleaje incidente en esta zona esta dominada por los procesos de rotura, siendo esta zona altamente disipativa.

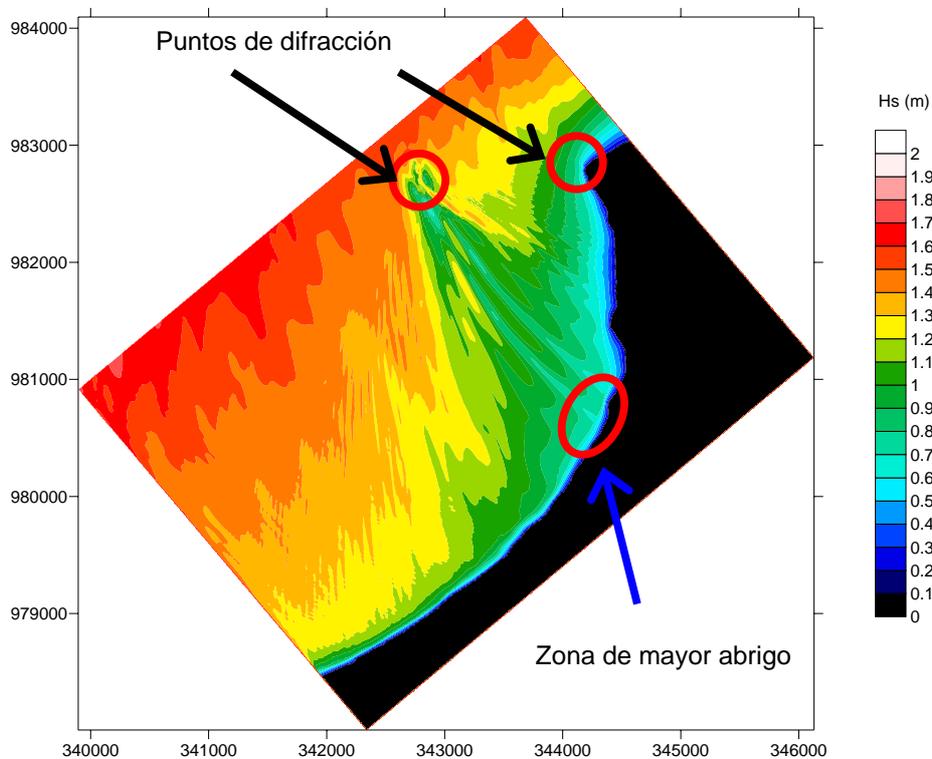


Figura 6.11. Altura de ola significativa. Situación actual

Sistemas de corrientes en playas

La gran oblicuidad con la que incide el oleaje sobre la zona de arboletes genera corrientes de oleaje mucho mayores que en otros puntos del litoral (Figura 11), a causa del espacio que se ha generado entre ambas zonas de difracción, suficiente para que el oleaje se propague hacia la costa sin verse afectado por los contornos. En general, las corrientes debidas al oleaje siguen una trayectoria Norte-Sur durante casi todo el año en el tramo Punta Rey-Volcán de Lodo y NE-SW en el tramo Volcán de Lodo-Arboletes. Las corrientes que se observan en cercanías de isla Rey son producto de la rotura del oleaje.

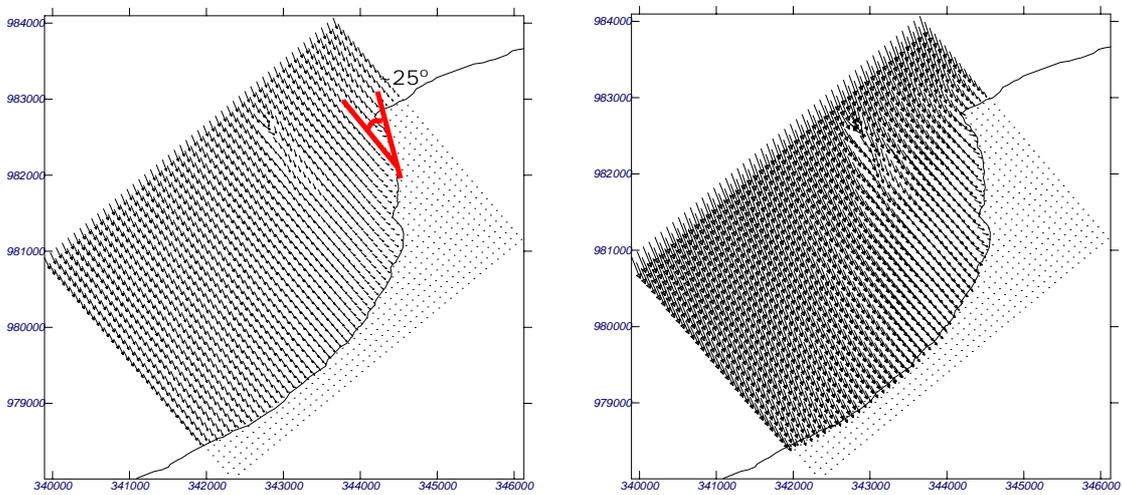


Figura 6.12. Vectores de oleaje para los casos 1 y 2. Situación actual

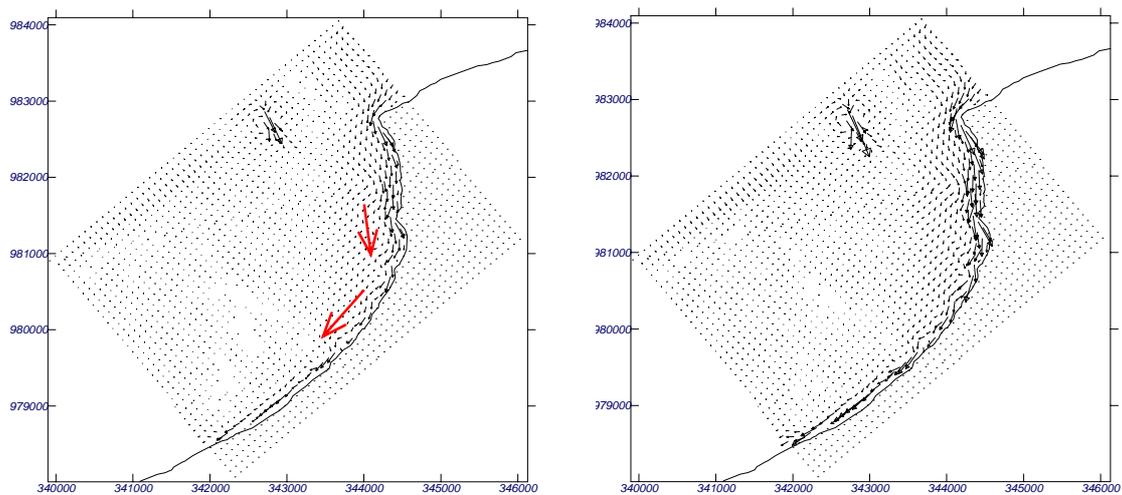


Figura 6.13. Corrientes de oleaje para los casos 1 y 2. Situación actual

6.3.2. DIQUE EN PUNTA REY

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de oleaje y corrientes de oleaje considerando la alternativa del dique de abrigo entre Punta Rey y la isla que se localiza frente a ésta.

Oleaje

Como era de esperarse, el dique propuesto entre Punta Rey y la isla localizada frente a ésta implica una barrera para el oleaje incidente, provocando la rotura y difracción del oleaje. Sin embargo, el punto de difracción que supone la presencia de la isla no se modifica, pues el morro del dique está imbricado en ella. Como consecuencia de esto, se genera una zona de abrigo bastante amplia entre Punta Rey y Volcán de Lodo. No obstante, las playas del casco urbano de Arboletes no alcanzan a sentir la disminución de la altura de ola por efecto de esta obra. Estos resultados se observan en la Figura 6.14 y Figura 6.15, resultados de la altura de ola significativa y los vectores de oleaje, respectivamente. Los vectores de la Figura 6.15 muestran cómo el oleaje intenta ponerse paralelo a la línea de costa con la presencia del dique de abrigo.

Sistemas de corrientes en playas

La Figura 6.16 muestra los sistemas de corrientes producidas por el oleaje con la presencia del dique. Nótese que se forma un bucle circulatorio al norte de la obra, como consecuencia del cruce de los trenes de oleaje que inciden en la playa y a lo largo del dique. El gradiente longitudinal de altura de ola producido por la difracción del oleaje y el abrigo que el dique produce, generan un sistema de corrientes que contrarresta la tendencia sur-oeste de las corrientes de la zona, unido a la transferencia lateral de cantidad de movimiento, generando una zona de calma en la zona abrigada, donde alcanzan a verse todavía corrientes pero de muy escasa magnitud hacia el Sur. Mayores son las corrientes que se generan longitudinalmente al dique en su zona norte, como consecuencia de la rotura del oleaje en esa zona.

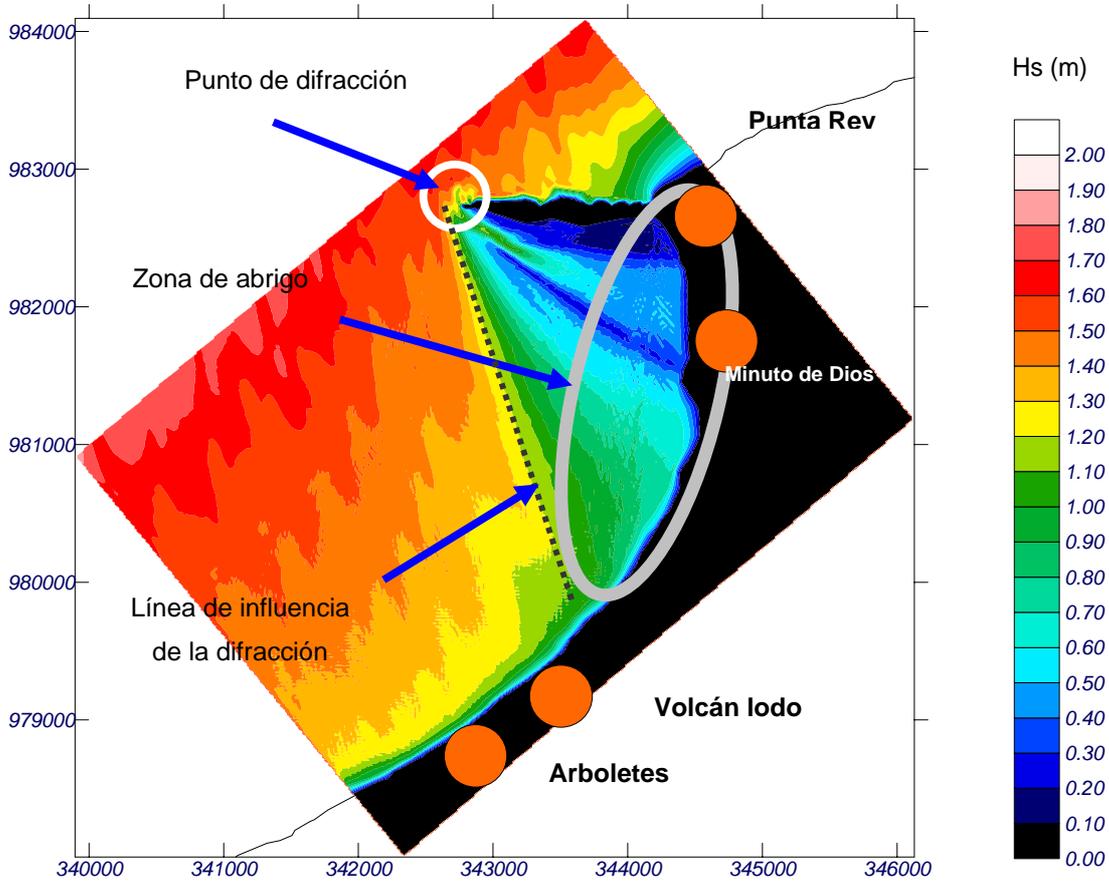


Figura 6.14. Altura de ola significativa para la alternativa del Dique.

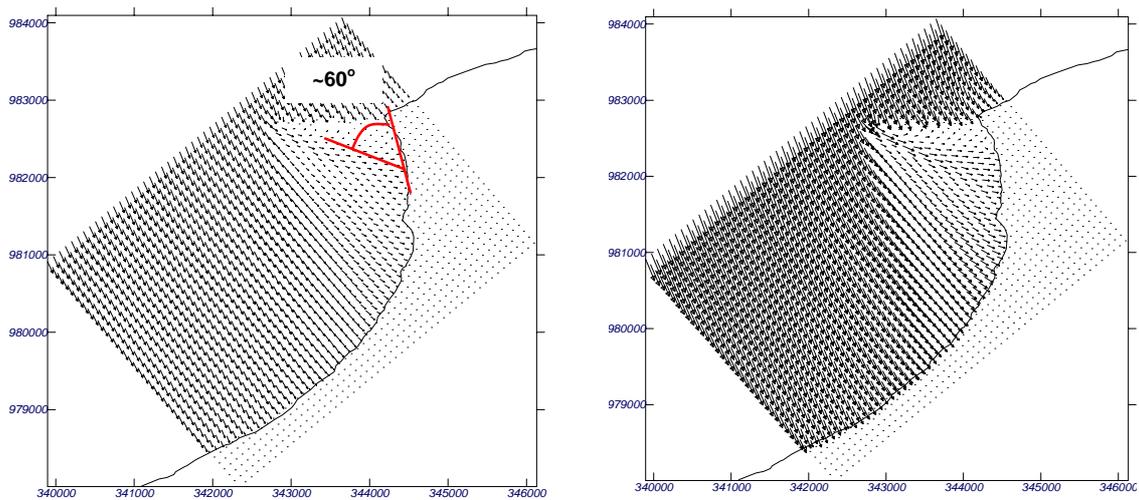


Figura 6.15. Vectores de oleaje para los casos 1 y 2. Alternativa Dique

Influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno

Estas observaciones pueden verse más claramente en la Figura 6.17, en donde se muestra la diferencia de altura de ola significativa entre la situación actual y la alternativa del dique de abrigo. Las mayores diferencias se aprecian cuanto mayor es el abrigo del dique, esto es, más cerca de Punta Rey y Minuto de Dios. En general, la construcción de un dique de 1450 m de longitud en Punta Rey garantizaría la estabilidad de las playas y la línea de costa entre Punta Rey y las cercanías del volcán de Iodo, debido fundamentalmente al gradiente de altura de ola producido por la difracción del oleaje sobre la estructura generando una zona de sombra frente al oleaje incidente. De igual forma, la estructura actuaría como una barrera para el transporte litoral, que viaja con dirección SW, generando una zona de acumulación al Noreste de la obra, haciéndose necesaria la planificación de una campaña periódica de by-pass de arenas desde la zona de acumulación, hacia las playas de Arboletes.

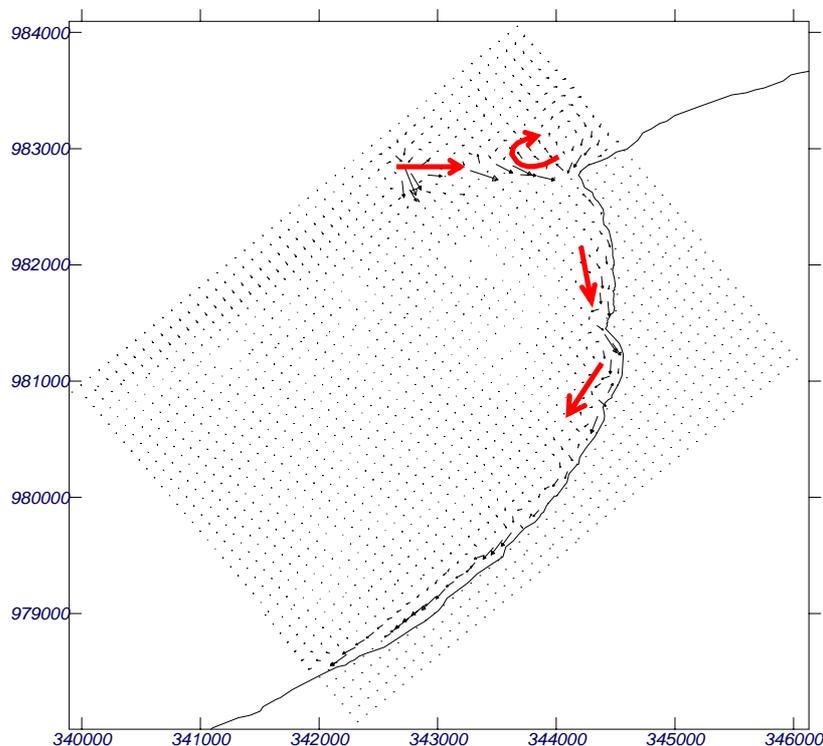


Figura 6.16. Corrientes de oleaje para la alternativa del Dique en Punta Rey

El dique propuesto para Punta Rey esta diseñado como una estructura de protección costera, y como tal, tanto sus dimensiones, cota de coronación y forma en planta han sido pensadas para tal efecto. Si se analiza detalladamente se puede presentar la posibilidad del aprovechamiento múltiple de dicho elemento, tanto como estructura de protección costera, como dique de abrigo para la actividad portuaria, ya sea pesquera, comercial o recreativa (turismo), ya que sus dimensiones y calados pueden ser aprovechados para tales fines. Por lo tanto, es importante recordar el carácter para el cual ha sido diseñado en primera instancia y si en un hipotético caso se quisiese ampliar el espectro de explotación de dicha estructura, debe considerarse un redimensionamiento tanto en planta como en sección que optimicen y garanticen su funcionamiento para los fines específicos que se decidan adoptar.

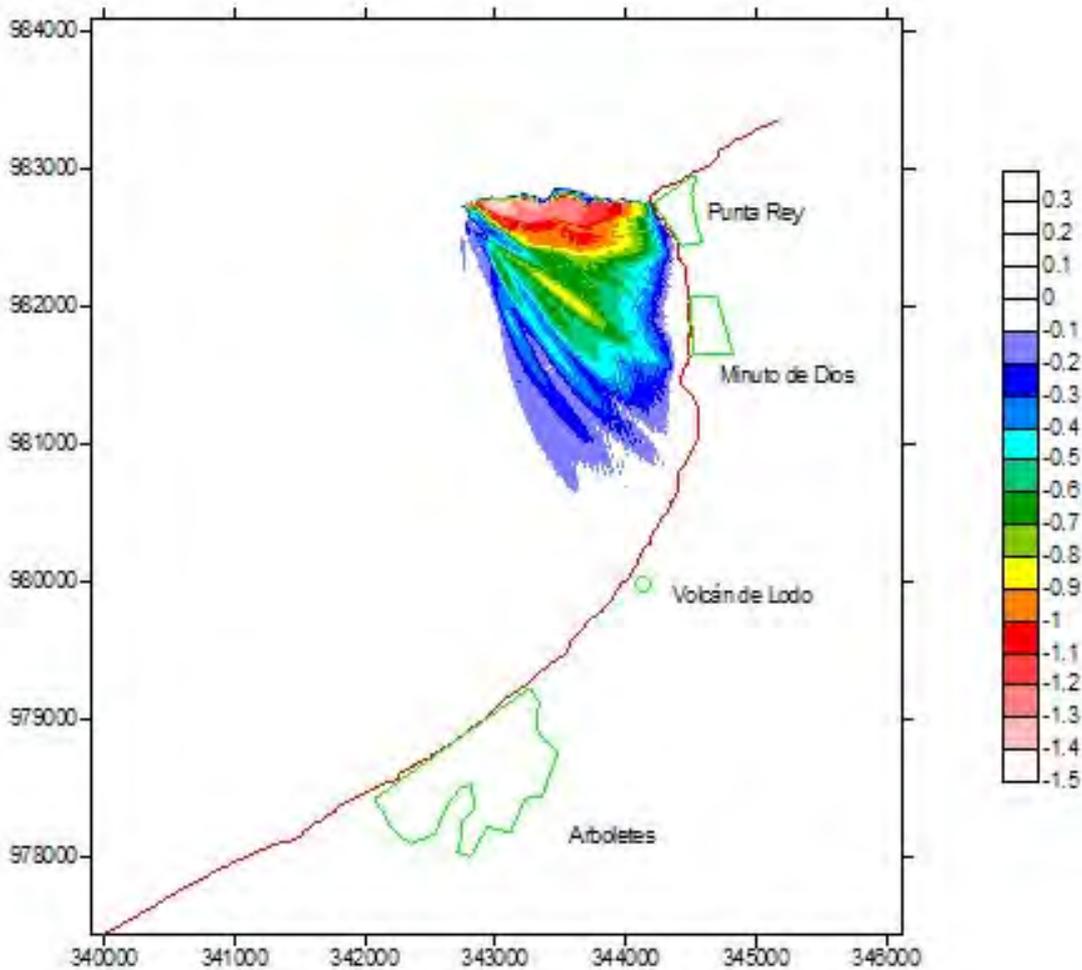


Figura 6.17. Diferencia de Hs para el caso 1. Alternativa Dique

6.3.3. DIQUES EXENTOS (TÓMBOLOS) Ó PERPENDICULARES A LA LÍNEA DE COSTA (ESPOLONES), EN ARBOLETES Y VOLCÁN DE LODO

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de oleaje y corrientes de oleaje considerando la alternativa de los diques exentos frente al casco urbano de Arboletes y Volcán de Lodo para la formación de Tómbolos. De manera análoga, los resultados aquí presentados se pueden considerar igualmente validos para la situación de la alternativa de espolones, ya que la interferencia con el flujo medio de energía que presentan estos y las corrientes asociadas, son a los efectos, prácticamente similares debido fundamentalmente a su configuración y ubicación.

Oleaje

Los diques exentos se localizan aproximadamente en la batimétrica -2.0 m, a una distancia media de 100 m de la línea de costa. Esto hace que la influencia de estas obras sobre la dinámica litoral tenga un carácter muy local. Las Figura 6.18 y Figura 6.20 muestran, respectivamente, los resultados de altura de ola significativa y vectores de oleaje para los casos simulados.

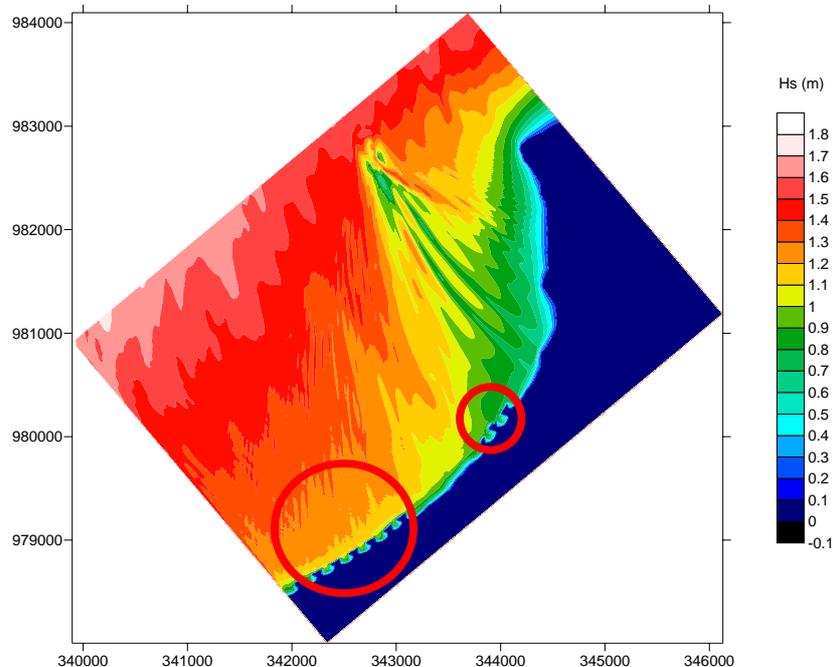


Figura 6.18. Altura de ola significativa para la alternativa de diques exentos

Nótese que en comparación con la situación actual (Figura 6.11), en la situación con diques exentos y tómbolos se observan los mismos patrones de oleaje regional, con sus respectivos puntos de difracción y las mismas zonas de abrigo, y salvo las zonas específicas donde se localizan las obras, muy cerca de la playa, la altura y dirección de propagación del oleaje no varía entre ambas situaciones.

Como era de esperarse, incluso el ángulo de incidencia del oleaje sigue siendo muy oblicuo con respecto a la línea de costa entre Punta Rey y Volcán de Lodo, pero muy localmente, influenciado por los diques exentos, el oleaje se difracta en cada uno de los extremos de los diques, propiciando un gradiente longitudinal de altura de ola que converge hacia el interior de la zona abrigada por las estructuras. Como puede verse en la Figura 6.19, este proceso es muy local y no se ve reflejado en ningún otro punto del resto del dominio.

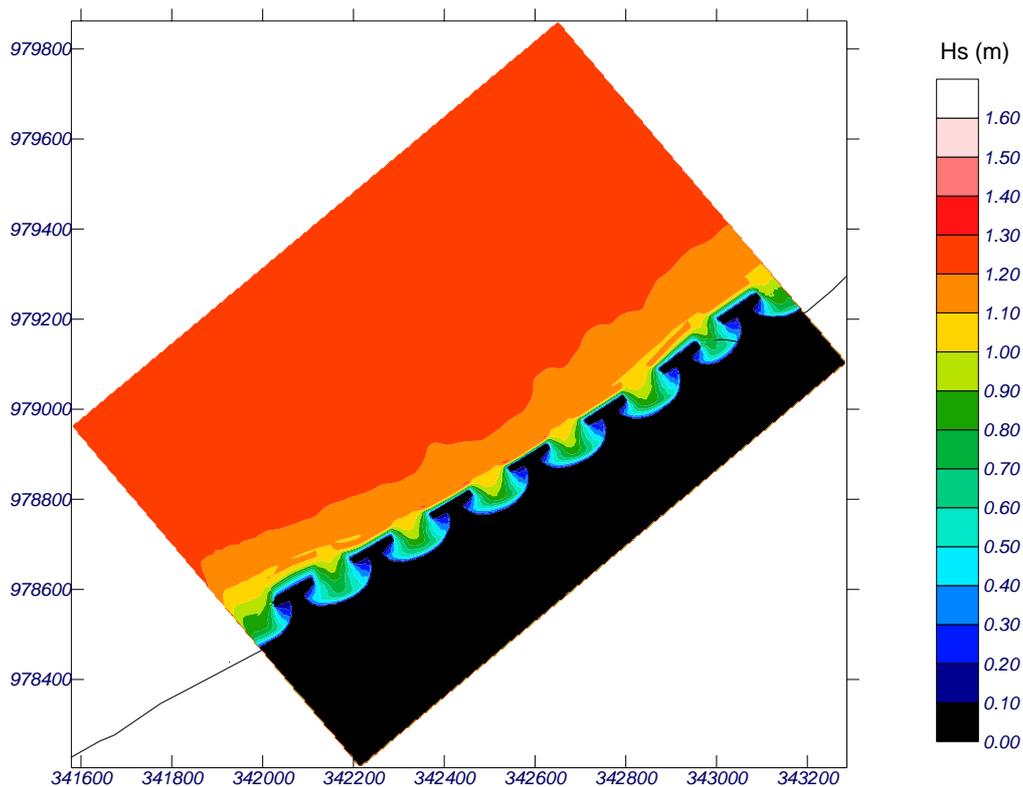


Figura 6.19. Zoom en el diagrama de altura de ola significativa en los diques exentos

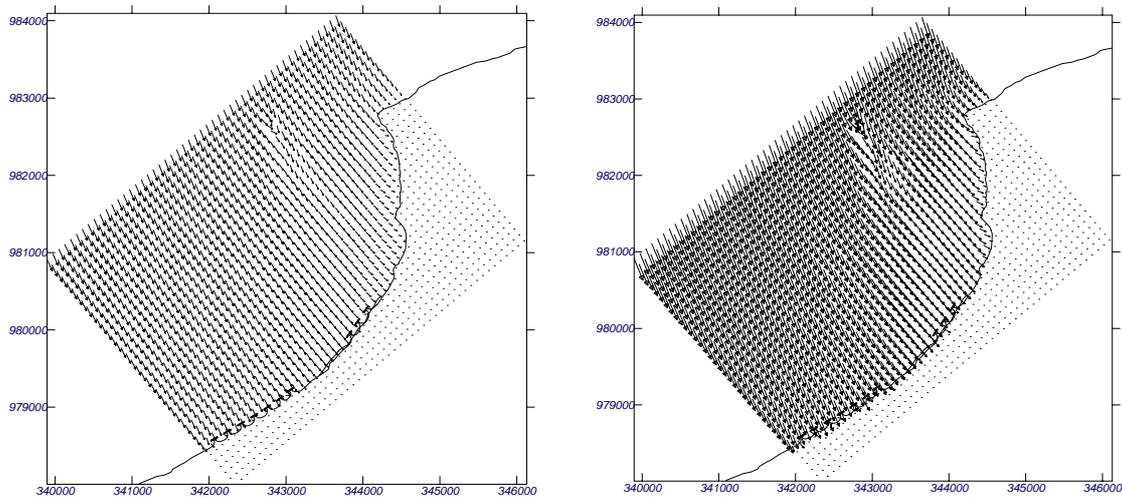


Figura 6.20. Vectores de oleaje para los casos 1 y 2. Alternativa diques exentos

Sistemas de corrientes en playas

Como ya se expuso anteriormente, el gradiente de altura producido por la difracción del oleaje en los morros de las estructuras genera un sistema de corrientes hacia el interior de las zonas abrigadas por las estructuras, causando un sistema circulatorio en el interior del tómbolo.

Adicionalmente, a nivel regional, se puede observar como el sistema de corrientes longitudinales con orientación NE-SW se separan de la línea de costa en cercanías de las estructuras, debido fundamentalmente a los cambios locales de altura de ola, producidos por la presencia de las estructuras y las playas asociadas a estas que han modificado la configuración batimétrica. (Figura 6.21)

Influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno

Las obras planteadas no generan ningún tipo de influencia en la dinámica litoral del entorno a nivel regional, ya que su influencia es muy localizada, generando un sistema circulatorio de corrientes que permiten garantizar la estabilidad de las playas protegidas por las estructuras, generando un sistema aislado en equilibrio estático.

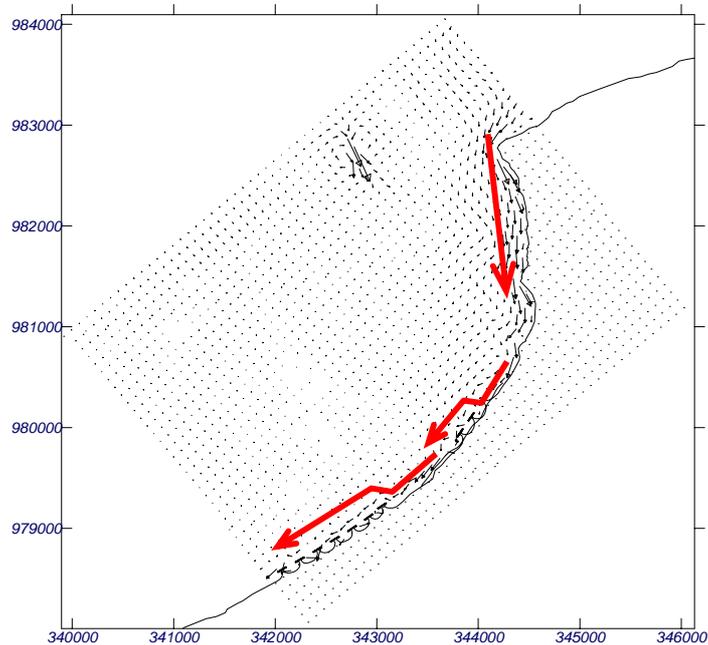


Figura 6.21. Corrientes de oleaje para la alternativa de diques exentos

Todas estas conclusiones se ven más claramente en la 0. Esta figura muestra la diferencia de altura de ola significativa entre la situación actual y la alternativa de los diques exentos frente a Volcán de Lodo y frente al casco urbano de Arboletes. Nótese que las mayores diferencias se observan entre los diques exentos y las playas regeneradas.

Las alternativas planteadas buscan establecer sistemas cerrados de equilibrio estático, ya sea mediante la implementación de tómbolos o playas encajadas, partiendo de la premisa de colmatación del sistema, de forma tal, que no se conviertan en un nuevo elemento de afección a la dinámica litoral de la zona, garantizando que el flujo sedimentario que pasa por los contornos de las actuaciones, no se vea afectado de ninguna manera por las nuevas estructuras.

El conjunto estructura-playa esta diseñado de tal manera, que los perfiles de las playas regeneradas estarán en el umbral del equilibrio, de tal forma que si un grano de arena procedente del exterior entrase en éste, inmediatamente se presentaría un desequilibrio tal que el mismo sistema lo sacaría al exterior, debido a la colmatación sedimentaria con

la cual ha sido diseñado. De esta forma se puede garantizar que las alternativas presentadas no influirán en el detrimento del litoral aguas abajo.

Finalmente cabe resaltar que la alternativa mas conveniente desde el punto de vista de los resultados, impacto sobre la dinámica litoral, impacto ambiental y costos resulta ser la opción de los Tómbolos, no obstante todas las alternativas han sido estudiadas a fondo y se presentara un apartado donde se reflejen los resultados de cada una de las alternativas en el documento final.

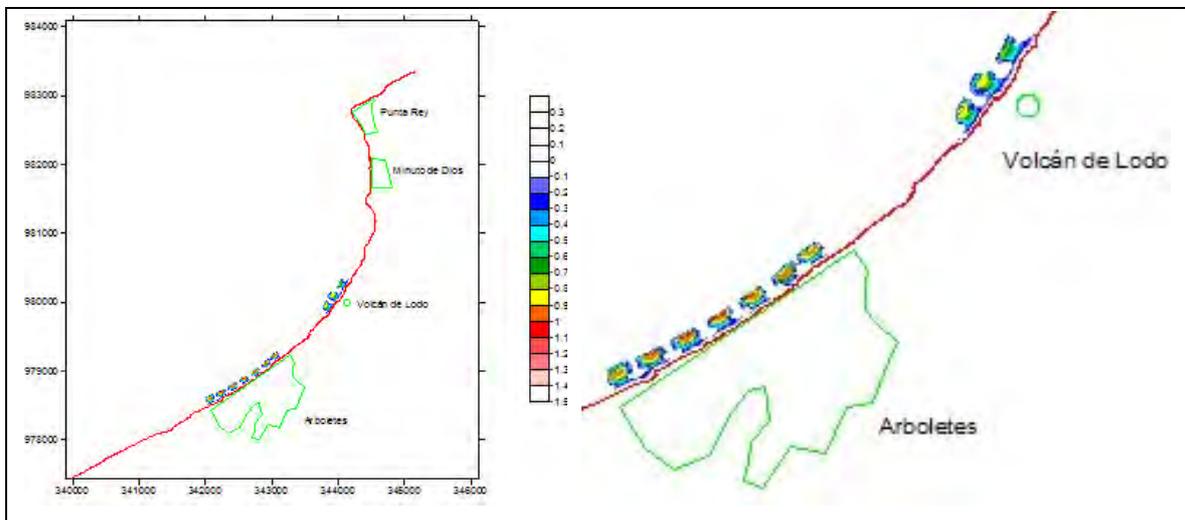


Figura 6.22. Diferencia de Hs para el caso 1. Alternativa diques exentos

6.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las diferentes alternativas planteadas de manera combinada, buscando optimizar de la mejor manera los resultados que se pueden obtener con cada una de ellas. En general se evalúa el grado de protección contra los procesos erosivos, la influencia sobre la dinámica litoral, el grado de sensibilidad estructural ante la respuesta del terreno, la garantía o no de dotar a la zona de playas y los costos.

Esta evaluación es el resultado de la reunión interinstitucional del Comité Técnico Nacional sobre la problemática de erosión en Arboletes, para el análisis de las alternativas de solución propuestas como resultado del estudio de la DIMAR, el día 4 Noviembre de 2005, en la sala de juntas de la Dirección General Marítima

La nomenclatura utilizada en los cuadros que se presentan a continuación es la siguiente:

PR: Arboletes VL: Volcán de Lodo MD: Minuto de Dios PR: Punta Rey

ALTERNATIVA		VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO
ID	NOMBRE			
1	Diques exentos ARB y VL + Paseo marítimo en PR y MD	<p>Genera zonas de playa para garantizar el flujo turístico actual.</p> <p>La influencia de los diques exentos en la dinámica litoral es de carácter local.</p> <p>Protegería a la población de PR y de MD de la erosión costera.</p> <p>Los paseos marítimos no tienen repercusiones en la dinámica litoral.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Es una alternativa medianamente barata.</p>	<p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p>	\$ 10,023,972,394

ALTERNATIVA		VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO
ID	NOMBRE			
2	Espolones ARB y VL + Paseo marítimo en PR y MD	<p>Genera zonas de playa para garantizar el flujo turístico actual.</p> <p>Protegería a la población de PR y de MD de la erosión costera.</p> <p>Los paseos marítimos no tienen repercusiones en la dinámica litoral.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Es una alternativa medianamente barata.</p>	<p>La influencia de los espolones es de carácter regional.</p> <p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p>	\$ 10,405,310,362

ALTERNATIVA		VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO
ID	NOMBRE			
3.1	SúperdiQue + Regeneración de playas + Diques exentos en ARB + By-pass	<p>Genera una zona de abrigo entre Punta Rey y Volcán de Lodo.</p> <p>Genera zonas de playa en todas las zonas críticas.</p> <p>Proporciona una zona de apoyo de la playa de Los CórdobaS.</p> <p>Podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero.</p>	<p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p> <p>Es una alternativa muy costosa.</p>	\$ 24,423,395,833
3.2	SúperdiQue + Regeneración de playas + Espolones en ARB + By-pass	<p>Genera una zona de abrigo entre Punta Rey y Volcán de Lodo.</p> <p>Genera zonas de playa en todas las zonas críticas.</p> <p>Proporciona una zona de apoyo de la playa de Los CórdobaS.</p> <p>Podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero.</p>	<p>La influencia de los espolones es de carácter regional.</p> <p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p> <p>Es una alternativa muy costosa.</p>	\$ 23,350,709,782
3.3	SúperdiQue + Regeneración de playas + Paseo marítimo en ARB + By-pass	<p>Genera una zona de abrigo entre Punta Rey y Volcán de Lodo.</p> <p>Genera zonas de playa en PR, MD y VL para garantizar el flujo turístico</p> <p>Proporciona una zona de apoyo de la playa de Los CórdobaS.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Podría servir de base para la construcción de un puerto pesquero en</p> <p>La influencia en la dinámica litoral del entorno es de carácter local.</p>	<p>Es necesario un gran volumen de material para poder desarrollarla.</p> <p>Es una alternativa muy costosa.</p> <p>Deja a ARB sin playa.</p>	\$ 18,730,709,782

ALTERNATIVA		VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO
ID	NOMBRE			
4	Paseo marítimo en PR, MD, VL y ARB	<p>La influencia de las obras en la dinámica litoral del entorno es nula.</p> <p>Proporcionaría un lugar de esparcimiento a la comunidad.</p> <p>Se necesita poco material para llevarla a cabo.</p> <p>Es una alternativa muy barata.</p>	<p>Deja a todos los cascos urbanos sin playa.</p>	\$ 3,432,277,800

Es de aclarar que para la estimación de los costos aquí presentados se supuso que en la zona se podía encontrar el material necesario para la construcción de las obras. Como se podrá concluir, estos son altamente dependientes de los costos unitarios utilizados, que varían constantemente, y de la existencia de dichos materiales para su construcción. En caso de que cualquiera de estos dos aspectos varíe (precios unitarios y disponibilidad de materiales), el presupuesto estimado variará en la misma medida.

Una vez analizados los seis grupos de alternativas, se ha concluido que solamente el grupo 1 y 4 son viables desde el punto de vista técnico, económico y funcional, y por tanto será en base a estas dos alternativas, que se procederá a realizar los diseños definitivos para las actuaciones planteadas.

CAPITULO 7
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C.A. 2002. Análisis del nivel del mar en la zona costera colombiana. En: INVEMAR, 2001. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. Santa Marta, Colombia, Informe técnico N 4.
- Anexo D, Condiciones Generales Climáticas Oceanográficas y Geomorfológicas, Golfo de Urabá. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 1991.
- ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. 1988. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Publicación especial, INGEOMINAS, Segunda edición, 17-27.
- Banton, J.D. (2002). Parametric Models and Methods of Hindcast Analysis for Hurricane Waves. IHE/Alkyon. MSc. Thesis Report.
- Bases Científicas para el Manejo Integral de la Zona Costera para el Golfo de Morrosquillo. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH. 1997.
- Birkemeier, W.A. 1985. Field data on seaward limit of profile change. J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol 111, pp.598-602.
- Boletín Científico CIOH No 11, artículo Estudio Geológico e Hidrológico del Golfo de Urabá. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 1993
- Boletín Científico CIOH No 11, artículo La Percepción Remota Aplicada para Determinar la Circulación de las Aguas Superficiales del Golfo de Urabá y Las Variaciones de su Línea de Costa. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 1992
- Boletín Científico CIOH No 13, artículo Análisis de Ingeniería para la Protección de Costas. Caso de Estudio: Defensa del litoral en el Apostadero Naval de Turbo. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 1993

- Boletín Científico CIOH No 22, en impresión, artículo Clasificación e Identificación de las Componentes de Marea del Caribe Colombiano. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 2004.
- Calverly, M.J., Szabo, D., Cardone, V.J., Orelup, E.A. & Parsons, M.J. (2002). Wave climate study of the Caribbean Sea. Proceedings of 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting.
- Carta Batimétrica COL 011 CANAL DE PANAMA A BARRANQUILLA elaborada por el CIOH, escala 1:750.000 de 1993.
- Carta Batimétrica COL 618 GOLFO DE MORROSQUILLO elaborada por el CIOH, escala 1:50.000 de 1993.
- Carta Batimétrica COL 411 PUNTA GIGANTON A ISLA FUERTE elaborada por el CIOH, escala 1:100.000 de 1993.
- Carta Batimétrica COL 412 GOLFO DE URABA elaborada por el CIOH, escala 1:100.000 de 1997.
- Condiciones Meteorológicas y Oceanográficas del Golfo de Urabá. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, Universidad EAFIT. 2000
- Cooper, C.K. (1988). Parametric Models of Hurricane-Generated Winds, Waves and Currents in Deep Water. Proceedings of 20th Annual OTC, Houston, Texas, USA. pp 475-484.
- Correa I.D. 1990. Inventario de Erosión y Acreción Litoral (1793-1990) entre Los Morros y Galerazamba, Departamento de Bolívar, Colombia. En: Hermelin M. (ed.) Memorias del Primer Seminario Andino de Geología Ambiental-I Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Agid Report No. 13
- CORPOURABÁ-UNIVERSIDAD NACIONAL. 1998. Informe Final sobre la “Evaluación de Zonas de Erosión Crítica en el Litoral Caribe Antioqueño”. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín. 1999p.
- Dirección General de Puertos de España. (1991). Estudio sobre las observaciones visuales de barcos en ruta del N.C..D.C. Programa de Clima Marítimo. Publicación No. 46.
- Dean, R.G. 1991. Equilibrium beach profiles: Characteristics and application. J. Of Coastal Research, Vol. 7, pp. 53-84.

- Duque-Caro, H. 1984. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú – San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. Boletín Geológico INGEOMINAS. 27, (2) 1-29.
- Estudio Oceanográfico Recuperación Playas Sector La Perdiz – Pto Viejo, Golfo de Morrosquillo. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH. 1994.
- Goda, Y. (1988). On the Methodology of Selecting Design Wave Height. Proceedings of the 21st International Conference in Coastal Engineering. pp. 899-913.
- González H., Nuñez, A. y G. Paris. 1988. Mapa Geológico de Colombia, Memoria explicativa, Ingeominas, 8 – 11
- González, M. 1995. Morfología de playas en equilibrio. Planta y perfil. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Hsu, S.A., Martin Jr, M.F., Blanchard, B.W. (2000). An evaluation of the USACE's deep water wave prediction techniques under hurricane conditions during Georges in 1998. Journal of Coastal Research. Vol. 16, No. 3. pp. 823–829.
- INVEMAR. 2002. NCCSAP, Colombia: Definición de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la Zonas Costeras colombianas (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. Informe Técnico No. 4. Evaluación de Impactos, Efectos y Respuestas del Sistema Natural. Santa Marta. Colombia. 107 p + anexos.
- Inventario del uso Actual del Suelo Rural y Urbano, Municipio de Santiago de Tolú. Hernández y Compañía Gobernación de Sucre.
- Laboratorio de ensayos hidráulicos de las Flores, Obras de protección costera y muelle para embarcaciones menores, Puerto Escondido – Cordoba. Barranquilla, Diciembre de 1995.
- La Platee – Forme Continentale Caraibe de Colombia. (Du débouche du Magdalena au golfe de Morrosquillo). Tesis doctoral, George Vernet. Universidad de Bordeaux. 1985
- Molina, A., Molina, C. y P. Chevillot. 1992. La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. Boletín Científico CIOH, Cartagena - Colombia. 11, 43-58.

- Page, W. 1986. Geología sísmica y sismicidad del Noroeste de Colombia. ISA-INTEGRAL-WOODWARD CLYDE CONSULTANTS. Versión española por Rodrigo Alvarez, Ingeniería e Hidrosistemas IEH Ltda.156p.
- Palacio, H y Restrepo, A. 1999. "Influencia de la evolución del delta del río Sinú en los procesos morfodinámicos del litoral caribe Antioqueño". TDG Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Plan de Acción Integral – Proyecto Golfo de Morrosquillo Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 1994.
- Proyecto, Censo Franja Litoral Caribe 1998 – Golfo de Morrosquillo. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. 1998.
- Posibilidades de Reconstrucción de Punta Arboletes (Límites entre los departamentos de Antioquia y Córdoba). INVEMAR. Marzo de 2004.
- Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Caribe Colombianaza. IDEAM, 2005
- Ramírez J.E. 1959. El Volcán de lodo de Galerazamba. Rev. de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, físicas y Naturales. V 10 (41), 301-314. 27
- Robertson, K. 1989. Evolución reciente del delta del Río Sinú, Colombia. Cours International d'Océanographie Côtière en Région Caraïbe, Bull. IGBA, Bordeaux, 45, 305-312.
- USACE. 1984. Shore Protection Manual. U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center (CERC), Vicksburg, Mississippi, 2 vols.
- Verificación Condiciones Oceanográficas del Golfo de Morrosquillo. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, ECOPETROL. 1993.
- Vernet, G. 1985. La Plate-forme Continentale Caraïbe de Colombie (du débouché du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sédimentation. Thèse de Doctorat d'état, Université Bordeaux 1. France, 378 p.