

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL PROCESO EROSIVO PRESENTADO EN LA COSTA
DE PLAYA EL YAQUE, ISLA DE MARGARITA,
EDO. NUEVA ESPARTA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs. :

Lavado V., Fabio J.

Matos T., Mario J.

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

TOMO I

Caracas, abril 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DEL PROCESO EROSIVO PRESENTADO EN LA COSTA DE PLAYA EL YAQUE, ISLA DE MARGARITA, EDO. NUEVA ESPARTA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Roberto Savelli Ciatteo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.:

Lavado V., Fabio J.

Matos T., Mario J.

Para optar al Título de
Ingeniero Civil

TOMO I

Caracas, abril 2007

ACTA

El día 04/05/2007 se reunió el jurado formado por los profesores:

ROBERTO SAVELLI

YURI MEDINA

JIMENA ARCAJA

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado:

“Estudio del proceso erosivo presentado en la costa de playa El Yaque Isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta”

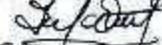
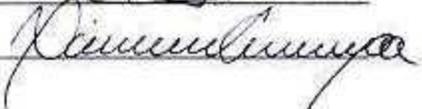
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que el (la, las, los) bachiller(es) hicieron de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. LAVADO V. PABLO J	20	VEINTE
Br. MATOS T. HARIO J	20	VEINTE

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

Dedicatoria

Deseo dedicarle este Trabajo a:

- *Mis Padres, Tíos, Hermanos, familiares y amigos en general.*
- *Especial dedicación a mi Madre, quien siempre estuvo presente para apoyarme en los momentos difíciles de la vida, por impulsarme e incentivarme con mucha paciencia a culminar mis estudios, y por ser tan buena y dedicada a su familia.*
- *A mi hija; quien es el motor para continuar con empeño y que lo tome como ejemplo para su superación*
- *...y, a una persona muy especial en que siempre me colaboró y me mantuvo de pie cuando aún veía oscuro.*

Fabio J. Lavado Valera

Dedicatoria

Dedico esta tesis a todas las personas que con su amor y cariño, me dieron la fortaleza de seguir adelante:

- *A mi amada esposa, Rosa María por ser la fuente de mi inspiración y motivación, quien ha esperado este momento tanto como yo.*
- *A mis queridos Padres, Fanny y Mario, que con mucha paciencia y confianza, nunca dudaron de mí.....por fin.*
- *A mi Tía Ivonne, quien siempre tiene tiempo para aconsejarme y motivarme.*
- *A la Sra. Rosa, "La suegra", que aguanto muchos desordenes en la elaboración de esta Tesis... y a la memoria de Hernando, mi suegro.*
- *A mi Abuela Luisa, a mis Hermanos Kin, Jonathan, Josué y Johans, a mis Cuñadas y Cuñado, quienes de una u otra forma me han ayudado a alcanzar esta meta.*
- *Danielito no me olvide de ti, por distraerme y hacerme reír en las tardes cuando me encontraba embotado.....!!!! a pasea a Maggi!!!!*
- *Y finalmente a Fabio, que con su insistencia y paciencia, logramos alcanzar nuestra meta.....GRADUARNOS.*

A todos muchas gracias...

Mario José Matos

AGRADECIMIENTOS

- *A Dios, el Todopoderoso.* Sin su ayuda nada de esto se habría realizado.
- *Al Profesor Roberto Savelli,* por habernos motivado a realizar éste interesante Trabajo Especial de Grado y facilitarnos los medios y conocimientos para lograrlo.
- *Al Ministerio de Ambiente, la Alcaldía del Municipio Díaz en Margarita,* por facilitarnos la información que se requería para el desarrollo del Trabajo de Grado.
- *A ASOYAQUE,* especialmente al Sr. Dario de La Longa, presidente de ésta asociación por toda la atención y ayuda prestada para hacer mas placentera nuestra estadía.
- *A la Compañía TRANAR,* especialmente al Sr. Jean Piero Argento por facilitarnos material fotográfico requerido para el desarrollo del Trabajo de Grado.
- *Al Profesor Felipe Pérez,* por su valiosa colaboración aportando los equipos necesarios para las mediciones de campo.
- *Al Laboratorio de suelos del IMME,* por habernos permitido el uso de sus instalaciones para la realización de pruebas de laboratorio.
- *A los compañeros* y demás amistades en la Escuela de Ingeniería Civil.
- *A nuestros familiares,* quienes siempre nos apoyaron en todos los ámbitos e impulsaron para alcanzar nuestras metas.
- *Y a todos aquellos,* que de una u otra forma hicieron posible la realización de este Trabajo de Grado.
- *A Rosa María de Matos,* por darnos una ayuda en la elaboración del Trabajo.
- *A Alejandro Lavado,* por su colaboración en el Video de presentación que apoya todo eso.
- *A Clara Valera,* por colaborar y facilitar todo para la realización del trabajo.

Caracas, 20 de Abril de 2007.

Lavado V., Fabio J.

Matos T., Mario J.

**“ESTUDIO DEL PROCESO EROSIVO PRESENTADO EN LA
COSTA DE PLAYA EL YAQUE, ISLA DE MARGARITA, EDO.
NUEVA ESPARTA”**

Tutor Académico: Prof. Roberto Savelli Ciatteo

Trabajo Especial de Grado. Ciudad, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. Año 2007, nº pág. 272.

Palabras Clave: Problemática, Erosión, Costa, Afectación, Alternativas

Resumen. El proceso erosivo de playa El Yaque está caracterizado por lo intenso y lo constante en que se produce. De tal manera que cambia la línea de costa a tal punto que se ven afectados los pobladores de la zona; sus bienes y servicios, como el turismo, el cual es la principal fuente de ingresos económicos del lugar, debido a la pérdida de la berma de la playa y a la transgresión del mar afectando estas estructuras colocadas cercanas a la línea costera.

En un principio, esta playa se caracterizaba por una gran afluencia turística debido a sus bellezas naturales y su pasividad de la playa pero al transcurrir de los años éstas bondades se han alterado por un proceso erosivo considerable el cual está mermando las capacidades de la zona como atractivo natural.

Las condiciones ambientales, naturales y la dinámica costera son los principales actores de la problemática que está padeciendo la zona y sus pobladores son los principales afectados.

Debido a esto, los pobladores establecen una serie de medidas emergentes a través de la construcción de algunas obras hidráulicas a manera temporal para solventar este problema, sin embargo, algunas tuvieron un efecto positivo y otras no.

La investigación requirió la ejecución de visitas de campo para evaluar la situación, la adquisición de información y testimonios de pobladores, los cuales expresaron sus impresiones sobre la problemática, por otra parte se ejecutó una campaña para la toma de data de oleaje, mareas, corrientes marinas locales y sedimentos; todo esto con la finalidad de ser procesado y analizado en laboratorio y en trabajo de escritorio para obtener la base necesaria para realizar éste estudio, de manera de tratar de determinar las posibles causas que pudieran estar originando la pérdida de la playa y ofrecer alternativas posibles de soluciones a corto y mediano plazo.

En el estudio se efectuó un análisis de la evolución de la playa el Yaque con el paso del tiempo, así como la utilización de un modelo de morfología costera para evaluar posibles obras que pudieran estabilizar la línea de costas.

Entre las conclusiones más destacadas está, la evidencia del proceso erosivo presentado y la falta de deposición de arena debido principalmente a la poca capacidad de la playa en transportar sedimentos de manera natural y su origen es mayormente originado por el transporte costero, sin que se considere despreciable el transporte eólico.

Por otro lado, dentro de las soluciones alternativas recomendadas está básicamente la reorganización de los espigones que allí existen o la

colocación de otros, de manera de restituir áreas afectadas por los ya construidos.

Adicionalmente, existe la posibilidad de utilizar una draga cortador que remueva sedimentos de la barra en la Isleta y los deposite en la zona Este (frente al morro) de manera que se distribuya naturalmente por toda la costa a través del tiempo debido el transporte litoral que se presenta en la zona.

INDICE DE CONTENIDO

Índice de Figuras	XVII
Índice de Fotografías.....	XXIII
Índice de Gráficos.....	XXVI
Índice de Tablas.....	XXVII
Glosario de Términos.....	XXIX
Introducción.....	1
CAPITULO I.....	2
1.1- <i>Planteamiento del Problema</i>	2
1.2- <i>Justificación</i>	2
1.3- <i>Línea de Investigación</i>	3
1.4- <i>Objetivos generales y Específicos</i>	4
1.4.1- <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2- <i>Objetivos Específicos</i>	4
CAPITULO II. Marco Teórico.....	5
2.1- <i>Ola y Oleaje</i>	5
2.1.1- <i>Teoría Lineal del Oleaje</i>	9
2.1.2- <i>Origen del Oleaje</i>	9
2.1.2.1- <i>El Viento</i>	9
2.1.2.2- <i>Maremotos</i>	11
2.1.2.3- <i>Volcanes</i>	12
2.1.2.4- <i>Deslizamientos</i>	12
2.1.2.5- <i>Fuerzas Gravitatorias</i>	13
2.1.3- <i>Tipos de Oleaje</i>	14
2.1.3.1.- <i>Según su Energía de Generación u Origen (Carter,1991)</i>	14
2.1.3.1.1.- <i>Olas Marinas o de Viento</i>	14
2.1.3.1.2.- <i>Mar de Fondo o Swell</i>	15

2.1.3.1.3.- Olas de Tormenta o Temporal.....	15
2.1.3.1.4.- Tsunamis.....	16
2.1.3.2.- Según su Frecuencia (<i>Munk, 1951</i>).....	17
2.1.3.2.1.- Olas Capilares. (<i>Capillary Waves</i>).....	17
2.1.3.2.2.- Olas de Gravedad. (<i>Gravity Waves</i>).....	17
2.1.3.2.3.- Olas Infragravitacionales. (<i>Infragravity Waves</i>).....	18
2.1.3.3.-Según su Rompiente o Propiedades Hidrodinámicas.....	18
2.1.3.3.1.- Rompiente de Derrame (<i>Spilling</i>).....	19
2.1.3.3.2.- Rompiente de Vuelco (<i>Plunging</i>).....	20
2.1.3.3.3.- Rompiente Ondulada (<i>Surging</i>).....	21
2.1.3.3.4.- Rompiente de Colapso (<i>Collapsing</i>).....	22
2.1.4.- Clima de Oleaje.....	22
2.1.5.- Derivación del Oleaje.....	26
2.1.5.1.- Transformación.....	27
2.1.5.2.- Refracción.....	29
2.1.5.3.- Difracción.....	31
2.1.5.4.- Reflexión.....	32
2.1.5.5.- Run Up (ascenso).....	33
2.2 Marea.....	34
2.2.1.- Origen de las Mareas.....	34
2.2.2.- Tipos de Marea.....	36
2.2.2.2.- Según su Frecuencia.....	37
2.2.2.2.1.- Mareas Semidiurnas.....	37
2.2.2.2.2.- Mareas Diurnas.....	37
2.2.2.2.3.- Mixtas.....	38
2.2.2.3.- Según la Ubicación de la Luna y el Sol.....	39
2.2.2.3.1.- Mareas Vivas.....	39
2.2.2.3.2.- Mareas Muertas.....	40
2.3.-Corrientes Marinas.....	41

2.3.1.- Tipos de Corrientes Marinas.....	41
2.3.1.1.- Corriente de densidad.....	41
2.3.1.2.- Corriente de Arrastre.....	41
2.3.1.3.- Corriente de Mareas.....	41
2.4- Transporte de Sedimentos.....	42
2.4.1.- Tipos de Transportes.....	43
2.4.1.1.- Transporte Normal a la Costa.....	43
2.4.1.2.- Transporte Litoral.....	44
2.4.2.- Capacidad de Transporte de Sedimentos.....	45
2.4.3.- Cálculo de la Capacidad de Transporte de Sedimentos.....	46
2.4.4.- Morfología Costera.....	48
2.5 Obras de Protección Costera.....	49
2.5.1.- Tipos de Obras y sus Usos.....	49
2.5.1.1.- Espigones Perpendiculares a la Costa.....	50
2.5.1.2.- Espigones Paralelos a la Costa.....	50
2.5.1.3.- Malecones.....	51
2.5.1.4.- Rompeolas.....	52
2.5.1.5.- Restitución de Costa.....	52
2.6 Modelo de Morfología Costera.....	54
2.6.1.- Condiciones de Bordes.....	55
2.6.2.- Calibración	55
2.6.3.- Simulación	56
2.7.- Microscopía Electrónica.....	57
CAPITULO III. Información Básica-Sector El Yaque.....	60
3.1- Ubicación Geográfica.....	61
3.1.1-Ubicación Político Territorial.....	62
3.1.2-Clima.....	62
3.1.3- Características Físico-Naturales del Estado.....	63
3.1.3.1- Vegetación.....	63

3.1.3.2- Geología.....	64
3.1.3.3- Suelos.....	64
3.1.3.4- Relieve.....	65
3.1.3.5- Hidrografía.....	65
3.1.3.6- Actividad Económica.....	66
3.1.3.7.- Ubicación local.....	67
3.1.3.8.- Descripción de la zona de estudio.....	68
3.2.- <i>Medición de la Línea de Costa</i>	74
3.3.- <i>Batimetría</i>	78
3.3.1- Procedimiento para el Estudio Batimétrico de la zona erosionada en Playa El Yaque.....	78
3.3.1.1- Materiales, Instrumentación y Equipos.....	79
3.3.2.- Procedimiento.....	82
3.3.2.1.- Selección de la zona donde es realizada la batimetría.....	82
3.3.2.2.- Ubicación en campo de los puntos seleccionados.....	84
3.3.2.3.- Registro Batimétrico.....	84
3.3.2.4.- Verificación en campo de los registros obtenidos por el ecosonda.....	87
3.3.2.5.- Procesamiento de los registros obtenidos por el ecosonda.....	89
3.4.- <i>Clima de Oleaje</i>	92
3.4.1.- Análisis de Oleaje.....	95
3.4.2.- Derivación de Oleaje.....	100
3.5- <i>Análisis de Marea</i>	103
3.6- <i>Corrientes Marinas</i>	110
3.6.1- Estudios de las Corrientes Marinas.....	110
3.6.2- Procedimiento de medición en Campo.....	111
3.6.3- Procesamiento de información recabada en Campo.....	113
3.7- <i>Sedimentos</i>	114
3.7.1- Transporte de sedimentos.....	114
3.7.2- Tipo de Sedimentos.....	116

3.7.3- Procesamiento de muestras recogidas en campo	118
3.7.3.1-Granulometría por Tamizado (Procedimiento Básico).....	118
3.7.3.2- Estudios Adicionales Comparativos del tipo de Sedimento.....	120
3.7.3.2.1- Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	120
3.8- Vientos.....	123
CAPITULO IV. Morfología Costera-Sector El Yaque.....	128
4.1- <i>Evolución Histórica de la Costa de Playa El Yaque.....</i>	128
4.1.1- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1972-1980.....	131
4.1.2- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1980-1986.....	134
4.1.3- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1986-1996.....	134
4.1.4- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1996-2000.....	137
4.1.5- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2000-2003.....	140
4.1.6- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2003-2004.....	146
4.1.7- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2004-2005.....	158
4.1.8- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2005-2006.....	168
4.2- <i>Relación Erosión-Sedimentación o Tasas de Sedimentación.....</i>	173
4.3- <i>Otras variables que afectan la morfología de la Costa en Playa El Yaque.....</i>	179
4.3.1- Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2005-2006.....	179
4.3.2- Influencia de la barra de arena frente al morro (efecto de Difracción).....	188
4.3.3- Influencia del viento sobre la zona de estudio.....	197
4.3.4- Influencia de la Thalassia sobre la zona de Estudio.....	206
4.3.5- Influencia de las Tormentas.....	209

4.4- Comparación del aporte a la playa de sedimento vía Litoral con el aporte de sedimento vía Eólica	216
4.5- Determinación del origen de sedimento.....	217
CAPITULO V. Simulación de la Costa a Través de un Modelo matemático.....	221
5.1 Introducción.....	221
5.2- Modelo Unidimensional de Morfología Costera GENESIS95.....	222
5.2.1- Descripción del modelo.....	216
5.3- Geometría.....	227
5.4- Condiciones de Borde del Modelo.....	229
5.4.1- Clima de Oleaje.....	229
5.4.2- Derivación de oleaje.....	230
5.4.3-Otros Parámetros.....	231
5.5-Calibración del Modelo.....	232
5.5.1- Variables calibradas en el Modelo.....	233
5.5.1.1-VARIABLES referentes al Transporte de Sedimento.....	233
5.6- Simulaciones del Comportamiento de la Costa.....	234
5.6.1- Simulación 2005-2006 con Mini-Espigones.....	234
5.6.2- Simulación Marzo 2006-Diciembre 2006 sin Mini-Espigones y Muelle Turístico Nuevo.....	238
5.7- Escenarios.....	241
5.7.1- Evolución de la Costa a 14 años.....	241
5.7.1.1.- Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 sin Mini-Espigones y Muelle Turístico Nuevo.....	241
5.7.1.2.- Evolución de las Obras sin incluir Obras nuevas.....	244
5.7.1.2.1.- Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con 50% de permeabilidad en Muelle – Espigón y Muelle Turístico Nuevo.....	245
5.7.1.3- Evolución de la Costa utilizando obras o medidas de estabilización.....	246
5.7.1.3.1.- Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con inclusión de Espigón nuevo entre las dos estructuras básicas.....	247

5.7.1.3.2.- Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con Traslado del Muelle- Espigón a 100 m hacia el Oeste.....	249
5.7.1.3.3.- Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con rompeolas separado de la costa en el punto donde se encuentra la thalassia.....	251
5.8.- Consideraciones del modelo.....	253
5.9.- Soluciones Adicionales.....	254
5.9.1.- Restitución de Playa mediante relleno de material de préstamo	254
5.9.1.1.- Remoción mediante dragado del sedimento que obstruye Boca Nueva en la laguna Las Marites.....	258
5.9.2. Operación de By Pass en la parte final de la barra donde se acentúa la erosión para mantener la zona Central de la playa estable.....	263
Conclusiones.....	268
Recomendaciones.....	272
Referencias Bibliográficas.....	274
TOMO II. Anexos.....	275

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

Figura 2.1. Movimientos de La partícula en la ola.....	6
Figura 2.2. Movimiento real de La partícula en la ola.....	6
Figura 2.3. Propagación del oleaje.....	7
Figura 2.4. Partes de una ola.....	7
Figura 2.5. Formación del oleaje a partir del viento.....	10
Figura 2.6. Acción del viento.....	11
Figura 2.7. Clasificación del oleaje según su frecuencia.....	18
Figura 2.8. Rompiente tipo <i>Spilling</i>	20
Figura 2.9. Rompiente tipo <i>Plunging</i>	21
Figura 2.10. Rompiente tipo <i>Surfing</i>	21
Figura 2.11. Clasificación del oleaje según su tipo de Rompiente.....	22
Figura 2.12. Sensor de efecto <i>Doppler</i>	23
Figura 2.13. Boya de oleaje.....	24
Figura 2.14. Tramos costeros por zonas según <i>Hidromet</i>	26
Figura 2.15. Aproximación del oleaje a la costa.....	27
Figura 2.16. Aproximación del oleaje y transformación.....	28
Figura 2.17. Efecto de Refracción.....	29
Figura 2.18. Fenómeno de difracción y refracción.....	31
Figura 2.19. Run-Up de oleaje.....	33
Figura 2.20. Distribución de las fuerzas de las Mareas.....	35
Figura 2.21. Gráfica de evolución de la marea y nomenclaturas.....	36
Figura 2.22. Gráfica de evolución de la marea semidiurnas.....	37
Figura 2.23. Gráfica de evolución de las mareas diurnas.....	38
Figura 2.24. Gráfica de evolución de la marea mixta.....	38
Figura 2.25. Influencia del Sol y la Luna en las Mareas Vivas.....	39
Figura 2.26. Influencia del Sol y la Luna en las Mareas Muertas.....	40

Figura 2.27. Balance de Volúmenes en Transporte normal	44
Figura 2.28. Comportamiento de la costa asociado al transporte litoral.....	45
Figura 2.29. Espigón perpendicular a la Costa.....	50
Figura 2.30. Espigón paralelo a la Costa.....	51
Figura 2.31. Rompeolas para protección de oleaje.....	52
Figura 2.32. Glóbulo Rojo y Blanco visto desde un Microscopio Electrónico.....	59

CAPITULO III

Figura 3.1 Ubicación geográfica.....	61
Figura 3.2 – Vegetación.....	63
Figura 3.3 Recurso hídrico.....	66
Figura 3.4. Ubicación de la zona de estudio.....	67
Figura 3.5. Punto inicial y final del recorrido de la línea costera medido con GPS.....	75
Figura 3.6. Diferentes líneas de costas medidas.....	76
Figura 3.7. Puntos comunes del recorrido de la línea costera medido con GPS	76
Figura 3.8. Área de medición Batimétrica.....	78
Figura 3.9. Panel de Funciones del Ecosonda	80
Figura 3.10. Plano Batimétrico de la zona de Estudio.....	82
Figura 3.11. Medidas de la embarcación.....	85
Figura 3.12. Esquema de la emisión de la onda del emisor.....	85
Figura 3.13. Reflexión de la señal e Imagen gráfica del Ecosonda	86
Figura 3.14. Perfiles batimétricos registrados por el ecosonda	88
Figura 3.15. Detalle de la información del registro batimétrico.....	89
Figura 3.16. Ángulos máximos de inclinación del sensor del Ecosonda.....	90
Figura 3.17. Tramos costeros identificados por <i>HIDROMET</i>	93
Figura 3.18. Ángulos de incidencia del oleaje.....	95
Figura 3.19. Muestra de oleaje en aguas Intermedias.....	97
Figura 3.20. Muestra de oleaje en aguas Someras.....	97
Figura 3.21. Área de la zona de Estudio de <i>Global Waves Statistics</i>	98

Figura 3.22. Marea en medición batimétrica en playa El Yaque.....	104
Figura 3.23. Vista de la Grafica de Mareas generada por programa WINXTIDE32.....	106
Figura 3.24. Ubicación física de los mareógrafos cercanos a la Zona de estudio.....	109
Figura 3.25. Colocación de bastones flotadores.....	112
Figura 3.26. Dispersion de los bastones flotadores.....	112
Figura 3.27. Posición de los bastones flotadores. Fuente.....	112
Figura 3.28. Plano de puntos de toma de muestras.....	116
Figura 3.29. Dirección de los vientos de la estación Pta. de Piedras.....	124
Figura 3.30. Dirección del Viento según estación meteorológica de Pta. de Piedras y lo observado en campo en playa El Yaque.....	125
 CAPITULO IV	
Figura 4.1. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque año 1972	129
Figura 4.2. Erosión y sedimentación comparativa de la línea de costa de playa El Yaque. Periodo 1972-1980	130
Figura 4.3. Línea de Costa de la zona de playa. El Yaque. Año:1980.	132
Figura 4.4. Línea de Costa de la zona de playa. El Yaque. Año:1986	132
Figura 4.5. Modificación de la línea de costa de playa El Yaque Comparación de Fotografías aéreas años 1980 y 1986.....	133
Figura 4.6. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Año:1993.....	135
Figura 4.7. Vista de la Línea de Costa desde El Morro. El Yaque. Año:1996....	135
Figura 4.8. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Año:1996.....	136
Figura 4.9. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas Año: 1996 y línea de costa 1986.....	137
Figura 4.10. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque Año 1997.....	138
Figura 4.11. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque Año 1998.....	138
Figura 4.12. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas Año:1996 y 2000	139
Figura 4.13. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque. Año:2001	141
Figura 4.14. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque. Año:2002	141
Figura 4.15. Recuperación y Erosión desde el lado Este al Oeste de la Playa. El Yaque. Año:2002.....	144

Figura 4.16. Ubicación de mini-espigones en Sector Central y Oeste El Yaque. Año:2002	145
Figura 4.17. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque Año: 2000 y 2003.....	146
Figura 4.18. Ubicación de espigones sector Playa El Yaque Año: Septiembre -2003.....	149
Figura 4.19. Detalle constructivo de espigón año: Septiembre-2003.....	149
Figura 4.20. Recuperación Línea de Costa sector Oeste El Yaque. Año: Septiembre-2003.....	150
Figura 4.21. Recuperación Línea de Costa sector Este El Yaque. Año: Septiembre-2003.....	151
Figura 4.22. Recuperación lado Oeste de la playa Espigón N° 2 El Yaque. Año: Septiembre 2003.....	151
Figura 4.23. Efecto de sedimentación al Este del espigón N° 3 El Yaque Año: 2003 y 2004.....	153
Figura 4.24. Representación gráfica del efecto producido por el espigón.....	155
Figura 4.25. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas . Año: 2003 y 2004.....	158
Figura 4.26. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.Año:2004 y 2005...	159
Figura 4.27. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.Año: Noviembre 2004.....	162
Figura 4.28. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Año:Mayo 2005...	162
Figura 4.29. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Año: Junio 2005	164
Figura 4.30. Parte posterior del Muelle - Espigón hacia Espigón N° 2 Año: 2005.....	164
Figura 4.31. Costa de la zona Central de playa El Yaque. Año: Junio 2005.....	165
Figura 4.32. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas Año: 2005 y 2006.....	168
Figura 4.33. Zonas de erosión y sedimentación de la zona de playa El Yaque. Año: 2006.....	172
Figura 4.34. Movimientos de las corrientes Boca Victoria Las Marites. Año: Julio 2005.....	181
Figura 4.35. Líneas de corrientes Boca Victoria a playa El Yaque. Año: 2005.	183
Figura 4.36. Área de descarga de efluentes de Los Bagres Año: 2005.....	184
Figura 4.37 Zona de formación de ripples al Este de la playa El Yaque. Año: Enero 2004.	187
Figura 4.38. Zonas de erosión y sedimentación de la zona de playa El Yaque. Año: 2006.....	189

Figura 4.39. Área de estudio El Yaque. Año: 2006.....	189
Figura 4.40. Zona difracción de oleaje Playa El Yaque.....	190
Figura 4.41 Vista de planta del montículo de Arena. Año: 2006.....	193
Figura 4.42. Difracción de oleaje dirección Este. Año: 2006.....	194
Figura 4.43. Difracción de oleaje dirección Sur Este. Año: 2006.....	195
Figura 4.44. Difracción de oleaje dirección Sur. Año: 2006.....	196
Figura 4.45. Difracción de oleaje dirección Sur - Oeste. Año: 2006.....	196
Figura 4.46. Direcciones de los vientos en la zona.....	198
Figura 4.47. Trazas de sedimento fino en suspensión al Este y lengüeta de playa El Yaque.....	202
Figura 4.48. Posibles formas de transporte de sedimento hacia el morro.....	203
Figura 4.49. Posibles áreas de movimiento de sedimento eólico en la zona....	204
Figura 4.50. Zona de formación de Thalassia al Este de la playa El Yaque.....	206
Figura 4.51. Pluma de sedimento y pérdida de praderas de Thalassia. El Yaque. Año: 1980-1996.....	208
Figura 4.52. Área de acción del Huracán Iván. Año: Septiembre 2004.....	210
Figura 4.53. Comparación de Fotografías de la Línea de Costa de la zona Este antes y después del paso del Huracán Iván. Año: Septiembre 2004.....	210
Figura 4.54. Área de acción de la Tormenta Emily. Año: Julio 2005.....	211
Figura 4.55. Comparación de la línea de costa año 2005 y la generada por el paso del Tormenta Emily. Año: Julio 2005.....	211
Figura 4.56. Línea de costa zona Este luego de la acción del Tormenta Emily. Año: Julio 2005.....	212
Figura 4.57. Efectos producidos por el oleaje en el paso de Tormenta Emily Año: Julio 2005.....	213
Figura 4.58. Daños producidos por acción del oleaje de la Tormenta Emily. Año: Julio 2005.....	214
Figura 4.59. Puntos de ubicación de las muestras comunes en % en peso de sus elementos bases.....	220

CAPITULO V

Figura 5.1. Diferentes líneas de costa medidas en campo de la zona de estudio.....	227
Figura 5.2. Líneas de de costa utilizadas en el simulador.....	227
Figura 5.3. Costa inicial simulada 2005-2006.....	236

Figura 5.4. Costa intermedia simulada 2005-2006.....	236
Figura 5.5. Costa final simulada 2005-2006.....	237
Figura 5.6. Costa inicial simulada Marzo 2006.....	238
Figura 5.7. Costa intermedia simulada Junio 2006.....	239
Figura 5.8. Costa final simulada Diciembre 2006.....	239
Figura 5.9. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Marzo – Diciembre 2006.....	240
Figura 5.10. Costa inicial simulada Diciembre 2006.....	242
Figura 5.11. Costa intermedia simulada Diciembre 2010.....	242
Figura 5.12. Costa final simulada Diciembre 2020.....	243
Figura 5.13. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020.....	244
Figura 5.14. Costa final simulada Diciembre 2020 con permeabilidad.....	245
Figura 5.15. Resultado del análisis del GENESIS95 en Superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con espigones permeables al 50%.....	246
Figura 5.16. Costa final simulada Diciembre 2020 con espigón intermedio....	247
Figura 5.17. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con espigón intermedio entre las estructuras básicas.....	248
Figura 5.18. Costa inicial simulada Diciembre 2020 con Muelle-Espigón movido	249
Figura 5.19. Costa final simulada Diciembre 2020 con Muelle-Espigón movido	249
Figura 5.20. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con el traslado del Muelle-Espigón 100 m hacia la zona Este.....	250
Figura 5.21. Costa inicial simulada Diciembre 2020 con rompeolas paralelo	251
Figura 5.22. Costa final simulada Diciembre 2020 con rompeolas paralelo	251
Figura 5.23. Resultado del análisis del GENESIS95 en Superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con rompeolas paralelos a la costa ubicados en la zona de <i>Thalassia</i>	252
Figura 5.24. Vista de planta del área donde se realizaría la restitución.....	255
Figura 5.25. Vista de planta de las áreas donde se tomaría material de préstamo y se realizaría el relleno.....	256
Figura 5.25. Vista de planta y lateral de las áreas donde se tomaría material de préstamo por By-Pass y se realizaría el relleno.....	264

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

CAPITULO III

Fotografía 3.1. El Turismo, principal actividad comercial.....	66
Fotografía 3.2. Formación El Morro (El Yaque)	68
Fotografía 3.3. Estratificación rocosa de El Morro (parte baja)	69
Fotografía 3.4. Formación rocosa de El Morro (El Yaque)	69
Fotografía 3.5. Tipos de rocas. M- 70 Arenisca calcárea y M-71 Caliza.....	70
Fotografía 3.6. Medición de la Thalassia.....	72
Fotografía 3.7. Foto Submarina. Pradera de Thalassia cercana a la orilla de la lengüeta de arena - El Yaque	72
Fotografía 3.8. Foto Submarina. Ecosistema marino de la laguna de Las Marites.....	73
Fotografía 3.9. Ecosonda ST 440-A y Cables.....	84
Fotografía 3.10. Regla de Marea colocada en costado de espigón de madera.....	108
Fotografía 3.11. Fabricación de bastones de polietileno para medir corrientes	110
Fotografía 3.12. Diferentes instrumentos fabricados y utilizados para la medición.....	111
Fotografía 3.13. Draga fabricada para las tomas de sedimentos Submarinas.....	117
Fotografía 3.14. Preparación de las muestras.....	118
Fotografía 3.15. Pesado de las muestras.....	118
Fotografía 3.16. Horno para secado de las muestras.....	118
Fotografía 3.17. Separado de las muestras.....	119
Fotografía 3.18. Tamizado de las Muestras.....	119
Fotografía 3.19. Pesado en laboratorio de las muestras.....	120
Fotografía 3.20. Representación de las diferentes muestras de sedimentos de playa El Yaque.....	121
Fotografía 3.21. Colocación de muestras de sedimentos en el Microscopio Electrónico de Barrido.....	121
Fotografía 3.22. Representación del grafico por computadora de los elementos que conforman las muestras de sedimentos de playa El Yaque.....	122

Fotografía 3.24. Viento proveniente de la dirección E.....	126
Fotografía 3.25. Representación de vientos en diferentes direcciones E y SW respectivamente.....	126
 CAPITULO IV	
Fotografía 4.1. Vista de la Línea de Costa desde la playa lado Oeste. Año:2002.....	142
Fotografía 4.2. Vista de la Línea de Costa desde la playa lado Este. Año:2002.....	142
Fotografía 4.3. Sacos de arena para mini-espigones.....	143
Fotografía 4.4. Mini-espigones de sacos de arena sector El Yaque.....	143
Fotografía 4.5. Erosión de Línea de Costa lado Este El Yaque. Año: Julio- 2003.....	147
Fotografía 4.6. Daños por erosión de arboleda sector Oeste. El Yaque. Año: Julio-2003.....	147
Fotografía 4.7. Daños por erosión en caminería sector Este. El Yaque. Año: Julio-2003.....	148
Fotografía 4.8. Efecto erosivo lado Este de la playa Espigón N° 3. El Yaque. Año: Noviembre 2003.....	152
Fotografía 4.9. Efecto de retención de sedimentos Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004.....	154
Fotografía 4.10. Efecto erosión al Oeste del Espigón N° 3 El Yaque. Año: Noviembre 2003.....	154
Fotografía 4.11. Efecto erosivo lado Oeste de la playa Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004.....	155
Fotografía 4.12. Lado Oeste del Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004....	156
Fotografía 4.13. Efecto erosivo lado Oeste de la playa en base del Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004.	156
Fotografía 4.14. Efecto erosivo lado Oeste de la playa en base de Espigón N° 3 El Yaque. Año: Febrero 2004.....	157
Fotografía 4.15. Efecto erosivo lado Oeste de la playa por efecto de palmeras cercanas a la orilla. El Yaque. Año: Febrero 2004.....	157
Fotografía 4.16. Destrucción parcial del Muelle Turístico de playa El Yaque por efecto del oleaje y la falta de sujeción a la costa. Año: 2004.....	160

Fotografía 4.17. Reconstrucción del muelle Turístico de playa El Yaque. Año: 2004 y 2005.....	160
Fotografía 4.18. Reconstrucción de Espigón N° 3 en playa El Yaque. Año: Mayo 2005.	161
Fotografía 4.20. Línea de Costa de la playa vista desde la zona Central hacia Muelle –Espigón El Yaque. Año: 2005.....	165
Fotografía 4.21. Estado en que se encuentra Espigón N° 2 Año: 2004.....	166
Fotografía 4.22. Línea de Costa de la zona Oeste de playa El Yaque (lengüeta Occidental).Año: 2005.....	166
Fotografía 4.23. Línea de Costa de la zona central hacia Muelle Turístico de playa El Yaque. Año: junio 2005.	167
Fotografía 4.24. Línea de Costa actual de la zona central de playa El Yaque. Año: 2006.....	169
Fotografía 4.25. Obras de protección a infraestructuras turísticas ubicadas en la orilla de playa El Yaque. Año: 2006.....	169
Fotografía 4.26. Línea de Costa actual de la zona central de playa El Yaque. Año: 2006.....	170
Fotografía 4.27. Erosión de la Línea de Costa de playa El Yaque debido al Nuevo Muelle Turístico Año: 2006.....	171
Fotografía 4.28. Prolongación de Línea de Costa de la zona de playa El Yaque en la lengüeta Año: 2006.....	171
Fotografía 4.30. Ripples de cresta recta y cresta sinusoidal en playa El Yaque.....	187
Fotografía 4.31. Área de estudio El Yaque. Año: 2006.....	192
Fotografía 4.32. Suelo presente en la zona.....	203
Fotografía 4.33. Vegetación predominante en la zona.....	203
Fotografía 4.34. Zona de edificaciones hoteleras al Este de la playa El Yaque. Año: Enero Diciembre 2006.	205
Fotografía 4.35. Afectación de estructuras cercanas a la costa por acción del oleaje de la Tormenta Emily. Año: julio 2005.....	215
Fotografía 4.36. Modificación de la línea de costa en la lengüeta por efecto del oleaje de la Tormenta Emily.....	215

CAPITULO V

Fotografía 5.1. Draga cortadora modelo Series 670 y 1170 “DRAGON” en diferentes ambientes.....	259
--	-----

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acreción: acumulación de sedimento (playa), depositado por proceso natural de flujo continuo.

Amplitud: medida de la mitad de la onda sinusoidal que describe una onda.

Aluvionales:(*aluvión*).- Referente al material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente en planicies por una corriente de agua.

Barra: un conjunto de arena, grava u otro material no consolidado el cual se sumerge (por lo menos en marea alta) y especialmente en la boca de un río o Estuario y comúnmente se extiende a corta distancia de la playa.

Batimetría: Procedimiento de medir profundidades con respecto al fondo del mar, ríos o lagos. También se le denomina a así a los resultados proveniente de ésta.

Berma: Meseta casi horizontal en la cara de la playa que representa el ancho de la playa y formada por las deposiciones de arena por efecto del oleaje o por efecto mecánico a través de la restitución de playa.

Coluviales:(*coluvial*).- Deposición lateral de materiales cuyo recorrido y transporte es reducido.

Erosión: proceso en el cual existe pérdida de material por arrastre de sedimento debido a las corrientes de mareas, litorales o el viento.

Edáficos: son los factores ambientales determinados por las características del suelo y sus condiciones físicas, químicas y biológicas.

Perfil: una línea perpendicular tomada seccionando transversalmente el contorno de la playa. Puede ser medido desde la cara de la berma hacia costa afuera.

Premontano: piso altitudinal entre 500 y 1 200 m sobre el nivel del mar que corresponde a la provincia térmica subtropical.

Vegetación Rala: escasa, diseminada, poco densa.

Sedimentación: proceso en el cual el material solido se deposita por efecto de las corrientes litorales o por efecto del viento.

INDICE DE GRÁFICOS

CAPITULO III

Gráfica 3.1. Perfil Batimétrico Promedio.....	92
Gráfica 3.2. .Altura de Oleaje vs Número de Horas por día en Pta. De Piedras	105
Gráfica 3.3. Mareas generada por programa WINXTIDE32 en mareógrafo Porlamar.....	107

CAPITULO IV

Gráfico 4.1. Proceso erosivo y sedimentario por períodos de la playa El Yaque.....	174
Gráfico 4.2. Proceso erosivo y sedimentario anual de la playa El Yaque.....	175
Gráfico 4.3. Diferencia entre el proceso erosivo y sedimentario de playa El Yaque.....	178
Gráfica 4.4. Aforo del perfil transversal Boca Victoria - Las Marites. Año: Julio 2005.....	181
Gráfico 4.5. Área libre de Thalassia a de la playa El Yaque.....	207

CAPITULO V

Gráfica 5.1. Perfil transversal original y de relleno del área donde se realizaría la restitución.....	257
--	-----

INDICE DE TABLAS

CAPITULO III

Tabla 3.1. Coordenadas de algunos Puntos Comunes y sus diferencias en distancias del recorrido de las líneas costeras medidas con GPS.....	77
Tabla 3.2. Equipos utilizados para la medición batimétrica.....	81
Tabla 3.3. Coordenadas del los Perfiles Batimétricos.....	83
Tabla 3.4. Tabla de Clima de Oleaje – HIDROMET.....	94
Tabla 3.5. Datos de Oleaje.....	98
Tabla 3.6. Datos de Oleaje provenientes del <i>Global Wave Statistics Online</i> , área 47.....	99
Tabla 3.7 Resumen de resultados obtenidos en Zona Rompiente.....	102
Tabla 3.8 .Reporte de los datos de Marea predominante en la zona para el momento del estudio del programa <i>WXTIDE32</i>	106
Tabla 3.9. Comparación de alturas de marea en diferentes puntos medidos en Margarita	108
Tabla 3.10. Coordenadas iniciales de los diferentes recorridos.....	113
Tabla 3.11. Velocidades de los diferentes bastones en los recorridos.....	114
Tabla 3.12. Transporte Parcial y Total del Sedimento.....	116
Tabla 3.14. Velocidades promedios de viento.Datos de estación meteorológica en el aeropuerto	127

CAPITULO IV

Tabla 4.1. Conformación de las obras provisionales de madera.....	150
Tabla 4.2. . Balance anual de áreas sedimentadas-erosionadas en la zona....	173
Tabla 4.3. . Velocidades de los vientos en la zona.....	198
Tabla 4.4. Rata de transporte eólico.....	199
Tabla 4.5. Capacidad de transporte eólico anual para vientos a 15 km/h promedio	200
Tabla 4.6. Capacidad de transporte eólico anual para vientos a 27 km/h promedio.....	201
Tabla4.7. Aporte y transporte litoral anual.....	216
Tabla4.8. Aporte y transporte eólico anual para vientos a 15 km/h Sostenidos.....	216

Tabla 4.9. Comparativa de % en peso en Ca y Si del sedimento..... 218

Tabla 4.10. Comparativa de % en peso misma proporción en Ca y Si del sedimento..... 219

CAPITULO V

Tabla 5.1. Valores característicos del proceso de restitución en función de los dos modelos de dragas tipos..... 261

Tabla 5.2. Cuadro de caudal de Bombeo y horas de trabajo diario por el sistema By Pass..... 266

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo especial de grado responde a la necesidad de realizar una investigación de la problemática presentada en la zona de El Yaque, Isla de Margarita- Edo. Nueva Esparta, donde está sucediendo un fenómeno de retracción de la línea de costa debido a un proceso erosivo considerable, que coloca en situación de riesgo la infraestructura turística de la zona.

Este estudio se concentra en el análisis de la dinámica costera en función de la capacidad de transporte de sedimentos de la playa debido a las condiciones de oleaje, marea y corrientes marinas locales.

También, analiza las consecuencias del transporte de sedimento eólico y su relación con las áreas que comprenden el contorno de la playa y zonas aledañas, igualmente estudia la influencia del monumento natural de la laguna Las Marites sobre toda la zona, en función a la boca que se mantiene activa y a la planta de tratamiento los Bagres cuyas descargas se realizan en áreas cercanas a la zona en estudio.

Por otro lado, se realiza un análisis histórico de la zona a través de fotografías, imágenes y mediciones comparativas para determinar el proceso evolutivo de la costa y su relación con la problemática actual.

Cabe destacar que para poder dar las recomendaciones al respecto se realiza la simulación de la costa con proyección a 14 años para tener una idea general de lo que pudiese suceder con respecto a los cambios de la línea costera cuando se agregan o retiran obras hidráulicas.

CAPÍTULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años se ha visto un retroceso considerable en la línea costera de la zona denominada playa El Yaque- Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta de tal manera que en los últimos 10 años, de acuerdo a evaluaciones técnicas realizadas por el Ing. Roberto Savelli, la playa ha retrocedido unos 40 metros, es decir, una erosión aproximada de 4,00 metros por año; esto como consecuencia de un proceso erosivo acelerado e inusual que se presenta en sus costas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Debido al peligro latente de posibles daños severos en la infraestructura existente en la zona, los habitantes, en especial propietarios de hoteles para uso recreacional y turístico, tomaron como medida emergente la colocación de elementos constructivos como espigones que sin un aval técnico previo que lo sustentara causaron un proceso acelerado de la erosión que se estaba dando aparentemente de manera natural, lo cual ha modificado la morfología de la playa. Por otra parte, a principio del año 2005, se colocó un espigón que actualmente esta protegiendo gran parte de los hoteles ubicados a lo largo de la playa, el cual está produciendo un efecto erosivo considerable hacia el lado Oeste.

1.3 LINEA DE INVESTIGACIÓN

Ante los constantes y acelerados cambios en la línea costera de playa El Yaque que ha producido un retroceso significativo de ésta y afecta las instalaciones no permanentes como construcciones rurales, caminerías y vegetación, se considera necesario realizar un estudio de la zona, en particular del proceso erosivo de la costa donde fueron erigidos estos desarrollos constructivos, para evaluar si es posible que el movimiento de sedimentos a lo largo de la costa (transporte litoral) no se esté produciendo de manera constante. Adicionalmente, realizar un estudio del oleaje, corrientes marinas, mareas y de manera general, el posible efecto en la deposición de sedimentos en la costa debido a la descarga proveniente de la laguna Las Marites por la inclusión de una planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en la parte Noreste de la playa El Yaque.

Se realiza una propuesta que consiste en evaluar la morfodinámica costera haciendo comparación de ortofotos y mapas geográficos de la zona a lo largo de un período definido de tiempo, realizar mediciones batimétricas, estudiar el clima y patrón de oleaje, mareas y transporte de sedimentos en la costa para determinar si la falta de deposición está propiciando la aceleración del proceso erosivo en la zona.

La culminación de este estudio está en la identificación de los posibles problemas y sus soluciones o medidas requeridas que a futuro implementarían el correctivo adecuado al problema. Esto sería corroborado por un modelo matemático que permite simular las formas de la costa debida a la implementación de obras que permitan deposición de sedimento en las partes afectadas de la costa en estudio.

1.4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

1.4.1. Generales:

1.4.1.1- Analizar las posibles causas del proceso erosivo en la costa de Playa El Yaque en la Isla de Margarita.

1.4.1.2- Determinar las posibles medidas correctivas y obras que permitan estabilizar la costa.

1.4.2. Específicos:

1.4.2.1- Evaluar la morfodinámica de la costa.

1.4.2.2- Evaluar el clima y patrón de oleaje, marea y transporte de sedimentos en la costa de Playa el Yaque.

1.4.2.3- Analizar la posible influencia del caudal efluente descargado por la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en la laguna Las Martes.

1.4.2.4- Aplicar un modelo matemático de morfología costera para reproducir las condiciones actuales de deposición de sedimento y erosión en la costa.

1.4.2.5- Recomendar las posibles obras y medidas a ser implementadas para estabilizar la costa mediante la aplicación de un modelo matemático de morfología costera.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Las costas están influenciadas por una serie de factores que definen su forma y dinámica, elementos como: oleaje, marea, corrientes, transporte de sedimentos son los más predominantes en el cambio de las costas.

A continuación se realiza un análisis de cada uno de estos parámetros determinando su importancia para la formación y estabilización de la zona costera.

2.1.- OLA Y OLEAJE

Las olas son oscilaciones periódicas, formadas por crestas y depresiones que se desplazan horizontalmente sobre la superficie del mar, formadas a partir de una perturbación o de la fricción entre el aire y el mar son responsables del transporte de energía.

Oleaje es el grupo sucesivo de olas que se forman en aguas profundas, que tienen una dirección y una velocidad, y se desplazan a lo largo del mar, hasta llegar a aguas poco profundas o a las costas.

Cada partícula u objeto que se encuentre flotando sobre la superficie del mar, realiza un movimiento circular, en el cual las partículas pasan por el mismo lugar cada vez que se realiza una oscilación. Se trata de un movimiento de vaivén con una componente vertical, de arriba a abajo, y otra longitudinal, en la dirección de propagación de la onda.

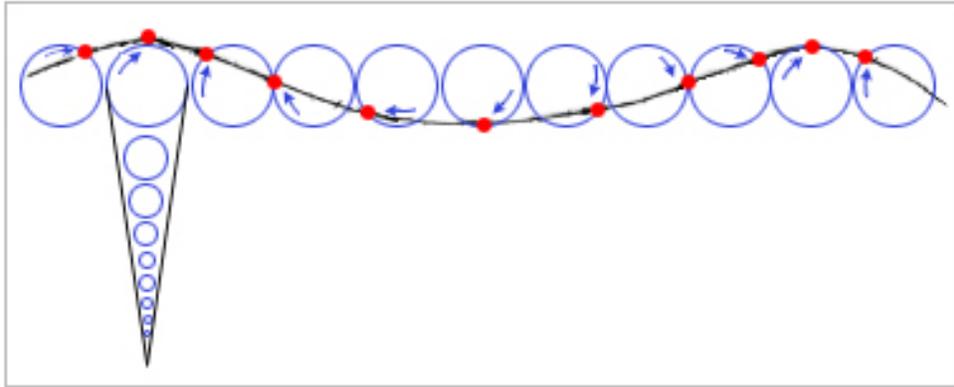


Figura 2.1. Movimientos de La partícula en la ola.

Fuente: http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/6d02.html.

El primer movimiento es producto de la oscilación de la onda en el medio, que como se puede ver en la en la *Figura 2.1*, es un movimiento circular. El segundo es la propagación de la onda con una dirección y velocidad, que en este caso llamaremos velocidad de onda.

En realidad se produce un pequeño desplazamiento neto del agua en la dirección de propagación, dado que en cada oscilación una partícula de agua no retorna exactamente al mismo punto, sino a otro ligeramente más adelantado, por esta razón se producen corrientes superficiales (*ver Figura 2.2*).

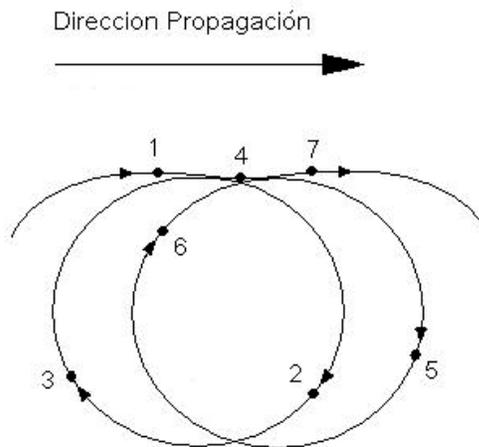


Figura 2.2. Movimiento real de la partícula en la ola.

Fuente: PROPIA

La metodología para realizar el estudio de las olas, consiste en dividir el área de propagación del oleaje en dos partes: i) Olas de aguas profundas (que no están influenciadas por el fondo del mar) y ii) Olas Costeras, de aguas poco profundas o someras, en las cuales su movimiento se ve afectado por efecto del fondo del mar (ver Figura 2.3). Por ser un movimiento oscilatorio podemos caracterizar una ola de la siguiente manera:

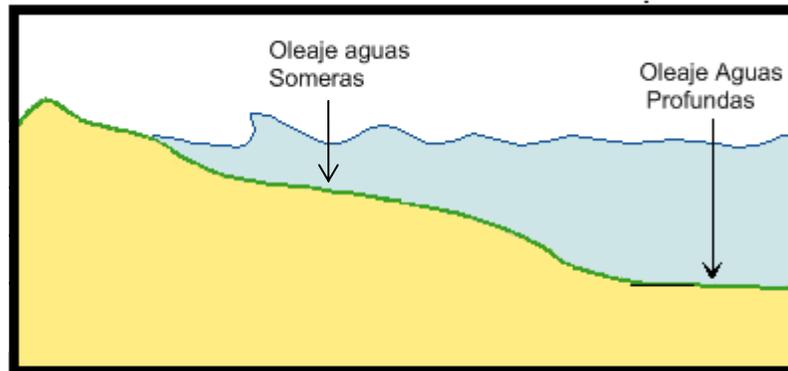


Figura 2.3. Propagación del oleaje. Fuente: PROPIA

La parte más alta de una ola es su cresta, y la parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas se llama valle. A la distancia entre dos crestas se le denomina longitud de onda (L) y a la diferencia de altura entre una cresta y un valle se le llama altura de la ola (H). (Ver Figura 2.4).

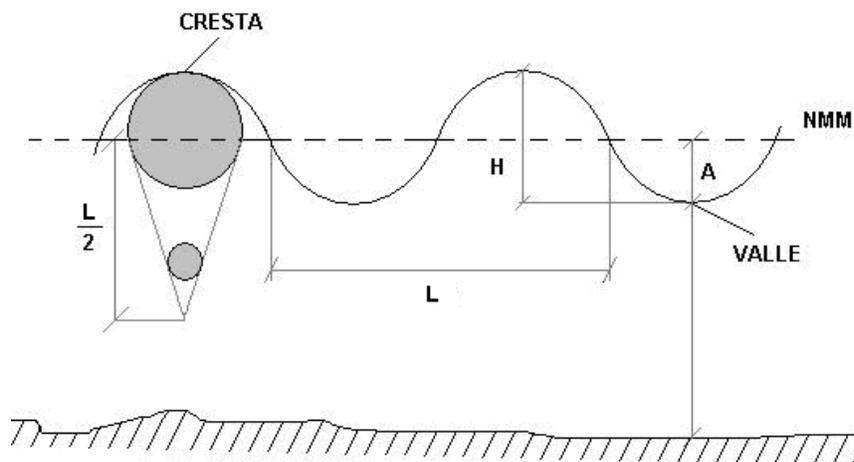


Figura 2.4. Partes de una ola

La amplitud (A) es la distancia que la partícula se aparta de su posición media en una dirección perpendicular a la de la propagación. La amplitud es la mitad de la altura y se determina mediante la expresión.

$$A = \frac{H}{2} \quad A \text{ expresada en (m)} \quad (11.1)$$

La pendiente (δ) es el cociente de la altura y la longitud de onda, con esta expresión se puede establecer una relación de tamaño para las olas.

$$\delta = \frac{H}{L} \quad \delta \text{ adimensional} \quad (11.2)$$

Donde:

Olas pequeñas: si H/L menor que 1/100

Olas moderadas: si 1/100 menor H/L menor 1/25

Olas grandes: si 1/25 menor H/L menor 1/7

Se llama período (T) al tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto.

La velocidad de onda (también llamada velocidad de fase o celeridad), es decir la velocidad de propagación, se calcula dividiendo la longitud de onda por el período.

$$C = \frac{L}{T} \quad C \text{ expresada en (m/s)} \quad (11.3)$$

2.1.1.- Teoría Lineal del Oleaje

La teoría lineal de oleaje, fue formulada en 1845 por Georges Airy en Inglaterra, la cual ha sido la de mayor utilización en la Ingeniería de Costas. Las hipótesis básicas de esta teoría son que el fluido es incompresible, ideal, originalmente en reposo y puesto en movimiento por fuerzas normales, el fondo del mar es un plano horizontal, impermeable, el oleaje es periódico y bidimensional, y su altura es muy pequeña en comparación con su longitud ó con la profundidad del mar. Esta teoría se base entonces en la esquematización y simplificación de la ola de forma lineal; por otra parte se considera que el periodo de la ola es constante y que no existe perdida de energía, cuando se estudia la transformación y la refracción del oleaje.

2.1.2.- Origen del Oleaje

2.1.2.1.- El Viento

Existen varios factores que pueden originar el oleaje, siendo el principal factor la acción del viento sobre la superficie del mar, basta que exista una ligera brisa, para que se generen pequeñas ondulaciones, la diferencia de presión entre el lado expuesto al viento y el lado protegido de la cresta del oleaje, hace crecer aún más la altura de la ola (efecto de protección). (Ver Figura 2.5.)

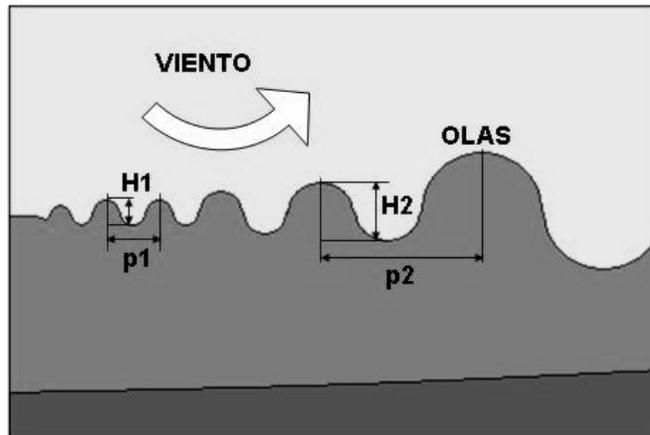


Figura 2.5. Formación del oleaje a partir del viento
Fuente: PROPIA

De este modo las olas grandes acumulan cada vez más energía y continúan creciendo en altura, longitud y periodo hasta valores máximos que dependen de la velocidad del viento, longitud de la superficie, tiempo que ha estado soplando y profundidad del agua.

Se dice que un oleaje está totalmente desarrollado, cuando el viento no puede hacer crecer más las alturas de las olas; en general, vientos fuertes de larga duración producen olas altas con longitudes de onda y períodos grandes (ver Figura 2.6). Así, conforme la superficie del agua recibe más y más energía, las olas se hacen más altas y más largas, y viajan con velocidades de onda cada vez mayores. Este mecanismo de generación de olas parece funcionar cuando: a) la velocidad del viento es mayor que la de las olas; b) la velocidad del viento es mayor de 1 m/s; y c) las olas son lo bastante altas como para que se produzca el efecto de protección. Es un resultado experimental, que el efecto de protección es máximo cuando la velocidad del viento es aproximadamente el triple de la de las olas. En el océano abierto la mayor parte de las olas generadas por el viento tienen una inclinación entre 0,03 y 0,06 grados. En general la ola será tanto más inclinada cuanto mayor sea la diferencia entre la velocidad del viento y la de la ola.

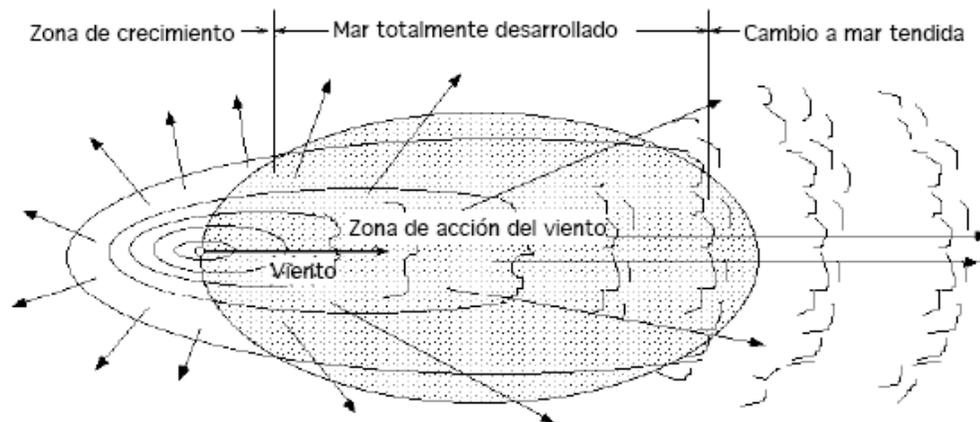


Figura 2.6. Acción del viento

Fuente: http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/6d02.html.

2.1.2.2.- Maremotos

Se pueden formar olas debido a un maremoto, deslizamientos de grandes magnitudes o explosiones volcánicas en el mar, produciendo un grupo de olas de gran energía y dimensiones formidables denominadas Tsunamis (de *Tsu*: puerto, y *Nami*: ola), que se producen cuando alguno de estos fenómenos extraordinarios desplazan verticalmente una gran masa de agua. En el caso de tsunamis provocados por maremotos se les denomina tsunamis tectónicos, en estos se pueden presentar dos situaciones, una es que en el centro de la perturbación se hunda el fondo, o por el contrario que éste se levante explosivamente, en ambos casos el movimiento provoca una ola única, de dimensiones formidables, que avanza a gran velocidad.

2.1.2.3.- Volcanes

Aunque es relativamente infrecuente, las erupciones volcánicas violentas también pueden generar perturbaciones importantes, capaz de desplazar grandes volúmenes de agua y generar tsunamis extremadamente destructivos, principalmente en zonas próximas a la erupción. En este caso, las ondas son generadas por el desplazamiento repentino del agua a causa de la explosión volcánica o bien de un deslizamiento de una ladera del terreno. Las ondas también se crean como consecuencia de una explosión seguida por el colapso de la cámara magmática.

2.1.2.4.- Deslizamientos

Al igual que en la superficie terrestre, en el fondo marino se producen deslizamientos y flujos de material en laderas inestables. Tales eventos se producen como consecuencia de la inestabilidad y derrumbamiento masivo de material en pendientes submarinas, a veces generados por movimientos sísmicos. De hecho, la mayor parte de estos fenómenos se sospecha están causados por terremotos violentos.

Por lo general, la energía de las ondas de un tsunami provocado por un deslizamiento submarino suele ir disipándose según se desplaza desde su origen a través del océano. De todos modos, curioso resulta el hecho de que el mayor tsunami jamás observado se desencadenó el 9 de julio de 1958 a consecuencia de un deslizamiento de este tipo en Lituya Bay (Alaska), producido por un terremoto, alcanzando la onda resultante una altura inicial de 520 metros y que rápidamente disminuiría, aunque causando cuantiosos daños.

2.1.2.5.- Fuerzas Gravitatorias.

Otra de las causas que perturban el equilibrio de la superficie del mar haciendo que en ella se produzcan olas, son las fuerzas gravitatorias de los astros cómo el Sol y la Luna, estas fuerzas producen olas de larga longitud y periodo, que se conocen con el nombre de marea. Esta atracción que ejercen el Sol y la Luna sobre las masas de agua en la Tierra, provoca una oscilación constante del nivel del mar debido a la rotación de la Tierra alrededor del Sol y de la Luna alrededor de la Tierra.

Existen, por lo tanto, mareas causadas tanto por el Sol como por la Luna, siendo la atracción causada por la Luna mayor que la del Sol. Este ciclo se repite en periodos de 12 horas (mareas semi-diurnas), de 24 horas (diurnas) y mixtas la combinación de los dos ciclos.

Para explicar por qué se produce este fenómeno tenemos que remontarnos a la Ley de la Gravitación Universal de Newton que establece que la fuerza que ejerce una partícula puntual con masa m_1 sobre otra con masa m_2 es directamente proporcional al producto de las masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. En otras palabras, las fuerzas que originan las mareas dependen de la distancia a la que estén los astros y a su masa. Por eso el Sol con su enorme masa y la Luna por su proximidad son los que ejercen esa atracción gravitatoria. Si no hubiera ningún astro alrededor de la Tierra, el nivel de agua no se alteraría.

2.1.3.- Tipos de Oleaje

El oleaje como ya se explico puede ser originado por diferentes factores, y puede tener distintos tamaños y duraciones, por estas razones, diferentes autores han querido clasificar el oleaje sin ponerse de acuerdo en

una única clasificación, de esta forma podemos clasificar el oleaje atendiendo los siguientes factores

2.1.3.1.- Según su Energía de Generación u Origen. (Carter, 1991)

2.1.3.1.1.- Olas Marinas o de Viento

Son aquellas que se forman a partir del viento, cuyo roce con la superficie del mar produce un arrastre, dando lugar a pequeñas formaciones como arrugas en la superficie, de sólo unos milímetros de altura y hasta 1,7 cm de longitud de onda. Cuando la superficie comienza a perturbarse, el efecto de fricción se intensifica, la diferencia de presión entre el lado expuesto al viento y su lado protegido hace crecer aún más la altura de la ola (efecto de protección) y las pequeñas arrugas iniciales dan paso a olas más grandes. Cuanto mayor es la altura de la ola, mayor es la cantidad de energía que pueden extraer del viento, de forma que se produce una realimentación positiva. La altura de este tipo de olas depende de tres parámetros del viento, que son: velocidad, persistencia en el tiempo y, por último, la estabilidad de dirección.

Una vez puestas en marcha, las olas que se desplazan sobre aguas profundas disipan su energía muy lentamente, de forma que alcanzan regiones muy separadas de su lugar de formación. Existen varios mecanismos por medio del cual este tipo de olas pueden disipar energía, como: convertirse en una corriente superficial, o en un desplazamiento en masa, de un gran volumen de agua hasta una profundidad considerable, o por la fricción con el aire, en una inversión del fenómeno que las puso en marcha, también se puede perder energía si una velocidad excesiva del viento provoca la ruptura de las crestas. Por último, la energía termina por disiparse por interacción con la corteza sólida, cuando el fondo es poco profundo o cuando finalmente las olas se estrellan con la costa.

2.1.3.1.2.- Mar de Fondo o Swell

Cuando cesa el viento, las olas siguen alejándose de su zona de origen. Una vez fuera de ella, se modifican haciéndose más regulares. Estas olas largas y regulares observadas fuera de la zona de origen se llaman "*Mar de Fondo o de Leva*".

Este fenómeno consiste en el aumento anormal de la altura del oleaje, el cual es ocasionado por el efecto de fricción entre la superficie del mar y el viento, el cual puede ser intensificado con el paso de sistemas atmosféricos de mal tiempo (bajas presiones) que empujan las aguas oceánicas hacia la costa causando fuerte oleaje. El tamaño de las olas formadas depende de la velocidad y el tiempo que persista el viento en el área de generación. Luego que el viento cesa y el oleaje esta formado pueden desplazarse decenas, o incluso centenas de kilómetros desde su zona de origen hasta las costas, según la dirección del viento sin ser mantenidas por éste.

La incidencia de los efectos de este fenómeno sobre cualquier tipo de embarcación es mucho más fuerte en las áreas costeras ya que la altura de la ola aumenta en la medida que encuentre cambios en el nivel de la línea de costa. También se causan daños en la costa, provocando inundaciones en sectores aledaños a las playas y originando además diferentes grados de erosión, que algunas veces ocasiona daños en las construcciones cercanas tales como estructuras de muelles menores y viviendas que por su ubicación se expongan a los efectos directos del fenómeno.

2.1.3.1.3.- Olas de Tormenta o Temporal

Las tormentas marinas son perturbaciones atmosféricas, formadas por un sistema compuesto principalmente por aglomerados de nubes de tipo (*Cumulonimbos*), las cuales alteran las condiciones atmosféricas de los lugares que encuentran a su paso. Una sola nube de este tipo puede

producir vientos fuertes, lluvias intensas acompañadas de tormentas eléctricas y como consecuencias de éstas se derivan, alteraciones del estado del mar y reducción de la visibilidad. Estas perturbaciones atmosféricas pueden formar olas y transportarlas gracias a los vientos y cambios de presión originados por el sistema de tormenta.

La energía y rapidez del avance, en los trenes de olas sobre las rompientes, interrumpe transitoriamente el flujo de retorno de agua al mar provocando un aumento de su nivel en la costa y una invasión en zonas más alejadas del borde de costa tierra adentro. Puede llegar a ser un oleaje muy destructivo, si a los efectos del temporal se suman otros como, mareas de tormenta (*Tide Storms*) u ondulaciones debidas a diferencias en las presiones atmosféricas (*Surge Storms*). Son olas con longitud de onda y periodo largos, de gran altura: desde arboladas (6 a 9m) a enormes (mayores de 14m).

2.1.3.1.4.- Tsunamis

Como ya se explico con anterioridad un Tsunami son olas de un tamaño extraordinario que pueden ser originados por terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos submarinos o superficiales de gran tamaño que descarguen escombros a la superficie del agua, o inclusive aunque menos probables colisiones de meteoritos de gran tamaño contra los cuerpos de agua, los cuales desplazan grandes masas de agua a gran profundidad y origina olas en la superficie con amplitud pequeña (alrededor de 1 m) y gran longitud de onda (50 a 200 Km.); pueden desplazarse grandes distancias (centenas de Km.) y a grandes velocidades (hasta 800 Km./h). En alta mar apenas es perceptible el fenómeno, sin embargo, al llegar a la costa sufre una notable transformación cuando disminuye la profundidad, esa energía acumulada debe concentrarse en un volumen de agua mucho menor, lo cual implica mayor altura, pasando de 60-150 cm. a 15-30 m.

Este tipo de olas es muy diferente a las que se pueden originar por una tormenta, debido a la gran energía que se necesita para producirlas, por ejemplo un terremoto producido en un fondo oceánico a 5 Km. de profundidad necesitará remover toda la columna de agua desde el fondo hasta la superficie para poder generar un Tsunami. El desplazamiento vertical puede ser tan solo de unos centímetros pero si se produce a la suficiente profundidad la velocidad será muy alta y la energía transmitida a la onda será enorme.

Los Tsunamis son mas frecuentes en el Océano Pacífico, debido a que en él se encuentra la zona más activa del planeta, el cinturón de fuego. Por ello, es el único océano con un sistema de alertas verdaderamente eficaz.

2.1.3.2.- Según su Frecuencia (Munk, 1951)

2.1.3.2.1.- Olas Capilares. (*Capillary Waves*)

Estas olas tienen forma de pequeñas rizaduras en forma de V, son generadas por la tensión superficial del agua y raramente exceden 2 mm en altura y 20 mm en longitud. Estas se deben al roce entre las láminas de aire y agua en la misma fuente del viento.

2.1.3.2.2.- Olas de Gravedad. (*Gravity Waves*)

Estas olas son las más importantes para los investigadores litorales, generadas por la transferencia de energía desde el viento al agua y controladas por la masa movilizada. Su longitud de onda es superior a 20mm y pueden alcanzar los 1000 m de longitud y 50 m de altura. Incluyen a las olas marinas, de *Swell* y traslación o surf.

2.1.3.2.3.- Olas Infragravitacionales. (*Infragravity Waves*)

Resultan de la interacción entre olas, tienen baja altura y períodos largos, haciéndose dificultosa su detección. Sin embargo, ellas son de considerable importancia para procesos costeros.

Esta clasificación se puede ver en la *Figura 2.7*, para una mejor comprensión.

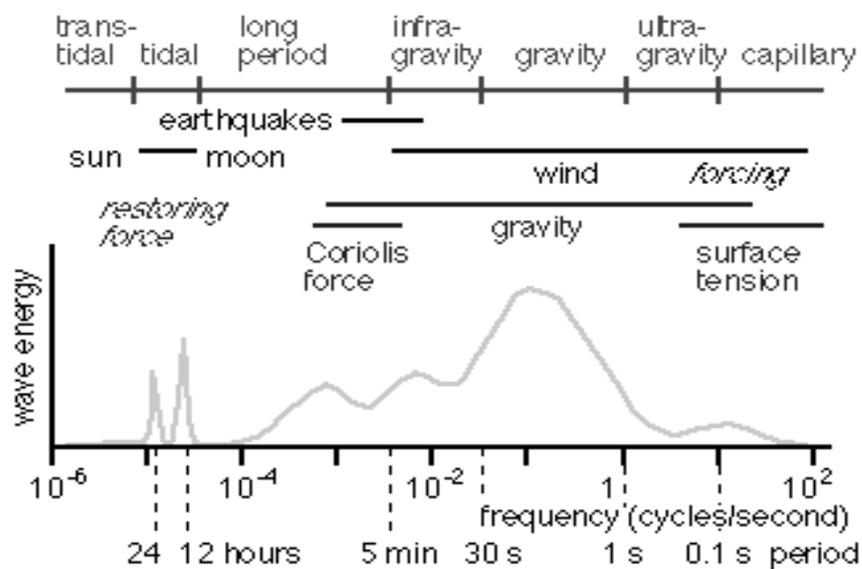


Figura 2.7. Clasificación del oleaje según su frecuencia

Fuente: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/figures/fig9b2.html>

2.1.3.3.-Según su Rompiente o Propiedades Hidrodinámicas

Esta clasificación considera al oleaje en su punto de rompiente, y la transferencia energética desde la oscilación al desplazamiento o translación, con la consiguiente movilización de material (Galvin, 1968). A veces lo denominan oleaje de translación, rompiente, surf, etc., y puede ser clasificado de la siguiente manera: rompiente de derrame, vuelco, ondulada y colapso.

Para describir el tipo de rompiente de una playa existe un parámetro denominado parámetro de rompiente (Battjes 1974), el cual es definido cómo la relación siguiente:

$$\zeta = \frac{m}{\sqrt{\frac{H_b}{L_o}}} \quad \text{Siendo } \alpha \text{ el ángulo de la pendiente de la playa, } m = \tan \alpha \quad (11.4)$$

Donde:

m = Pendiente de la playa en la zona intermareal.

H_b = Altura de la ola en la rompiente en metros.

L_o = Longitud de la ola en aguas profundas en metros.

2.1.3.3.1.- Rompiente de Derrame (*Spilling*)

La rompiente del tipo *Spilling* o de derrame se da preferentemente en situaciones de oleaje peraltado propagándose sobre playas con poca pendiente. Las crestas de las olas se van haciendo cada vez más agudas, hasta que se hacen inestables y se derraman hacia abajo por las mismas pendientes frontales de las olas (*ver Figura 2.8*). Esta rotura es gradual sobre la zona de rompientes y el decaimiento de la altura es aproximadamente uniforme, no se puede hablar exclusivamente de un punto de rotura debido a que la ola se atenúa progresivamente, pasando de un moviendo oscilatorio a

un movimiento de traslación del agua, pueden presentarse rupturas encadenadas. Esto se cumple cuando su parámetro de rompiente, $\zeta \leq 0,4$.

Rompiente tipo Spilling

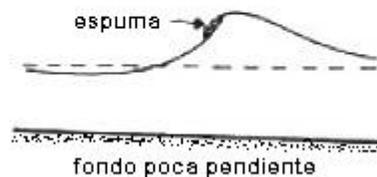


Figura 2.8. Rompiente tipo Spilling

Fuente: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/figures/fig9b2.html>

2.1.3.3.2.- Rompiente de Vuelco (*Plunging*)

Este tipo de rompiente ocurre con olas poco peraltadas propagándose sobre playas relativamente inclinadas. La cara frontal de la ola se hace casi vertical, las crestas se adelantan con respecto a su base, perdiendo sustentación y curvándose hacia el frente hasta que finalmente se precipita (ver Figura 2.9). El proceso de este tipo de rompiente produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire. La reducción de la altura de la ola durante la rotura se produce rápida y drásticamente. Las olas reformadas son usualmente de menos de una tercera parte de la altura de la ola en la rompiente y suelen romper de nuevo muy cerca de la línea de costa. Esto se cumple cuando su parámetro de rompiente es $0,4 < \zeta \leq 2$.

Rompiente tipo Plunging

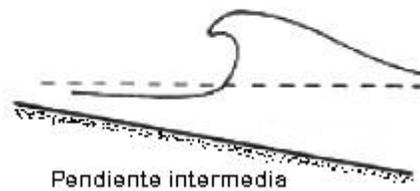


Figura 2.9. Rompiente tipo Plunging

Fuente: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/figures/fig9b2.html>

2.1.3.3.3.- Rompiente Ondulada (*Surging*)

La rompiente de tipo *Surging* o ondulada ocurre en playas con pendientes altas. Este tipo de rompiente comienza a desarrollarse de una forma similar a la de tipo *Plunging*, donde su cara frontal se hace muy vertical, pero con la particularidad por lo que la cresta se colapsa y desaparece (ver *Figura 2.10*). Con este tipo de rompiente, generalmente la zona de surf es muy estrecha. Esto se cumple cuando su parámetro de rompiente $\zeta > 2$.

Rompiente tipo Surging

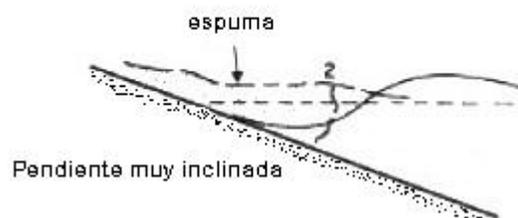


Figura 2.10. Rompiente tipo Surging

Fuente: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/figures/fig9b2.html>

2.1.3.3.4.- Rompiente de Colapso (*Collapsing*)

La rompiente de colapso, es un cuarto tipo de rompiente la cual es intermedia entre la tipo de vuelco y la ondulada. De hecho, los tipos de rompiente tienen una gradación continua, por lo que en ocasiones es difícil aplicar la clasificación.

En general, la rompiente tipo *Spilling* tienden a ocurrir en playas con una pendiente muy suave y con olas muy peraltadas: la rompiente tipo *Plunging* tiende a ocurrir en playas con una pendiente mayor y olas con peralte medio y la rompiente tipo *Surging* ocurre en playas con una pendiente muy pronunciada y olas con poco peralte. En la *Figura 2.11* podemos observar la clasificación según su rompiente

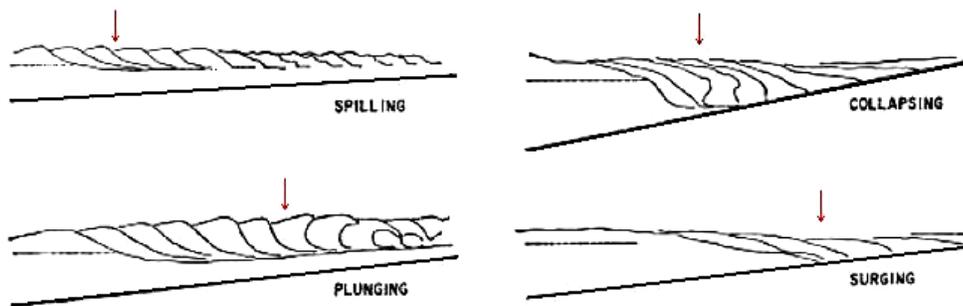


Figura 2.11. Clasificación del oleaje según su tipo de Rompiente

Fuente: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/figures/fig9b2.html>

2.1.4.- Clima de Oleaje

El estudio de los procesos costeros, así como el diseño de cualquier obra marítima, y su construcción, requieren la correcta caracterización de las fuerzas hidrodinámicas actuantes, por tal motivo es necesaria la recopilación de información del oleaje predominante en la zona. Se entiende entonces por

clima de oleaje a la distribución anual de alturas y períodos significativos de las olas en cada dirección, que afectan a una región determinada.

Existen diferentes fuentes de datos de clima de oleaje, sobre las que se pueden realizar un análisis, estas fuentes pueden agruparse de la siguiente manera:

- i) Datos instrumentales,
- ii) Datos visuales
- iii) Datos procedentes de simulaciones numéricas.

Los datos instrumentales son adquiridos por sensores especialmente diseñados y ubicados para medir la altura del oleaje, estos pueden ser, mecánicos como escandallas, flotadores mecánicos, o electrónicos como boyas de oleaje (ver Figura 2.13), sensores de presión, sensores de efecto Doppler (ver Figura 2.12), sensores acústicos, entre otros. Estos instrumentos pueden ser ubicados en los lugares específicos donde se desea conocer el clima de oleaje, o pueden formar parte de una gran red de adquisición de datos o vigilancia, como es el caso de los países ubicados en el océano pacífico, donde existe una red de vigilancia contra tsunamis. La ventaja de estos sensores reside en la calidad y continuo seguimiento de los datos que proporciona, ya que trabajan con autonomía y en tiempo real.



Figura 2.12. Sensor de efecto Doppler



Figura 2.13. Boya de oleaje

Los datos visuales provienen principalmente de observaciones realizadas por barcos comerciales en rutas a lo largo de todo el mundo, reclutados por organizaciones como la *World Meteorological Organization (WMO)* en su programa de observación voluntaria *VOS (Voluntary Observation Ship)*, o la *British Maritime Technology (BMT)* en su programa *Global Wave Statistics*, estos datos son obtenidos de forma sistemática desde hace mas de 50 años, de tal manera que un observador recoge información sobre mar de viento local (*SEA*), mar de fondo (*SWELL*), altura del oleaje, su periodo, su dirección en un lugar determinado, temperatura superficial, entre otras. Sin embargo en algunas ocasiones la información visual puede ser sesgada, no quedando suficientemente bien representados para los episodios de mayor contenido energético, puesto que las embarcaciones tienden a evitar la acción de grandes temporales por el consiguiente peligro que esto representa para la navegación.

Los datos procedentes de simulaciones numéricas, son utilizados cuando no es posible encontrar información ni visual ni instrumental, o bien

alguna de ellas se encuentra incompleta (no existe información sobre la direccionalidad o existen grandes lagunas entre registros). En este contexto, el método tradicional para reunir datos históricos de olas, ha consistido en realizar predicciones de olas basadas en información histórica de vientos (cartas sinópticas de superficie o estaciones meteorológicas), por un período no menor a 10 años, el ejemplo para Venezuela es el estudio realizado por el *INSTITUTO NACIONAL DE PUERTOS e HIDROMET* llamado “*ESTIMACION DEL REGIMEN DEL OLEAJE EN LAS COSTAS VENEZOLANAS*” (1977). En esta publicación se describe el clima de oleaje de las costas venezolanas así como también se dan datos de oleaje cotidiano, oleaje de mar de fondo, oleaje generado por huracanes, dividiendo la costa en 10 tramos diferentes, estos datos fueron obtenidos por estimación numérica y estadísticas, partiendo de datos de vientos de 10 años de data. (Ver *Figura 2.14*).

Las variables a considerar en la predicción del oleaje son la intensidad del viento, la duración del evento y la extensión del área afectada, ya que tienen asociadas una altura y un período de ola propio para cada condición en particular, posteriormente, mediante técnicas de refracción, y un sistema numérico adecuado se evalúan las condiciones de oleaje en el punto de interés. El problema de este tipo de datos es la necesidad de calibrar los modelos utilizados, deben ser contrastados con mediciones simultáneas de olas hechas en terreno, de esta manera, los valores pronosticados pueden corregirse según el grado de correlación obtenido en el estudio de calibración.

TRAMOS COSTEROS IDENTIFICADOS POR ZONAS - HIDROMET

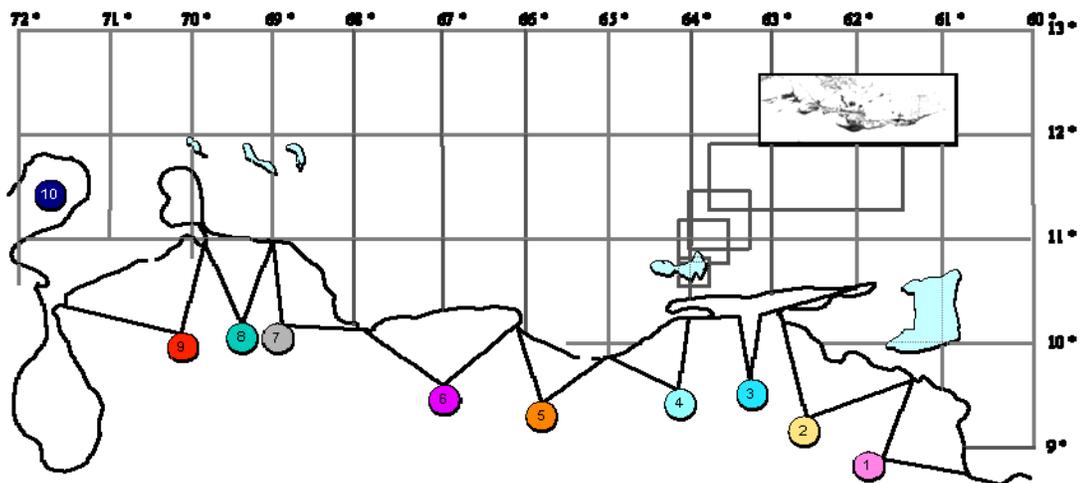


Figura 2.14. Tramos costeros por zonas según Hidromet.
Fuente de información: Hidromet (1977)

2.1.5.- Derivación del Oleaje

En su movimiento de aproximación hacia la costa desde aguas profundas hacia aguas poco profundas, las olas sufren cambios en su estructura debido a varios factores, que las modifican cambiando su dirección, altura y periodo, estas variables están consideradas en los cálculos de derivación de oleaje.

2.1.5.1.- Transformación

En el proceso de aproximación del oleaje a las costas, este sufre una transformación en su longitud y altura debido a la variación de la profundidad del fondo marino, esto es lo que se conoce como la transformación del oleaje de aguas profundas a aguas poco profundas o someras. Esto sucede debido a que cuando se origina la ola el agua comienza a oscilar y sus partículas de responden a esta oscilación moviéndose en órbitas circulares, formando un cono vertical de orbitas circulares, cuyos diámetros decrecen con la profundidad, el cual llamaremos base de la ola, que tendrá una altura de $L/2$. (Ver figura 2.15).

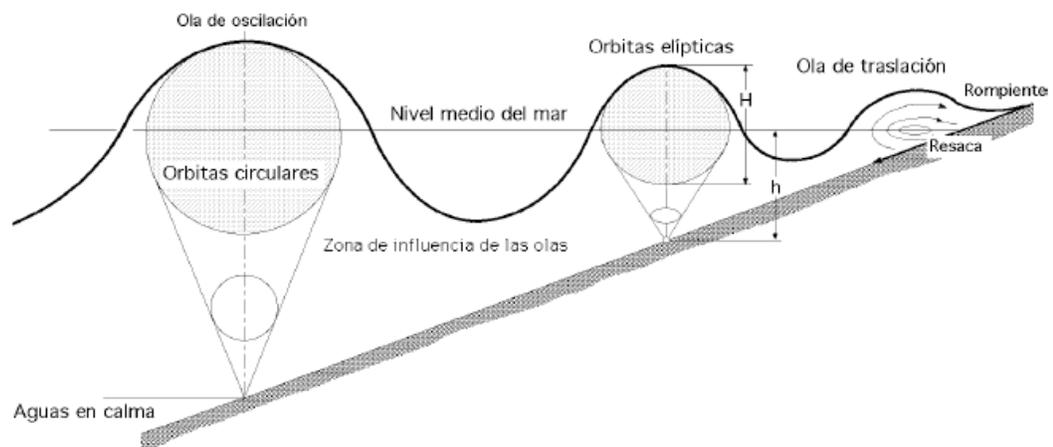


Figura 2.15. Aproximación del oleaje a la costa.

Fuente: http://www.gea.usm.cl/archivos/energia_pfd_energia_olas.pdf

Cuando las olas se trasladan en la zona de aguas profundas, estas se propagan sin ser afectadas por el fondo marino, esto sucede por que la profundidad del fondo es mayor que la mitad de la longitud de onda $h > L/2$. Cuando entran en una región de aguas intermedias, las olas comienzan a afectarse por el fondo marino, debido a que la relación $L/2$ se empieza a igualar a la profundidad h , en este momento la velocidad que trae la onda

comienza a disminuir, por efecto de la fricción de la base de la ola con el fondo, su longitud de onda comienza a acortarse y su amplitud comienza a aumentar, por efecto de la energía acumulada, transformándose la ola según el perfil que tenga el relieve marino. Y finalmente tenemos el caso cuando $h < L/20$ donde consideramos que la ola llega a aguas poco profundas, siendo esta la zona donde rompe y libera su energía contra la costa.

Para el estudio de la transformación del oleaje se procede primeramente a dividir el mar en tres sectores que permite, de una forma sencilla, la determinación de las características del oleaje según su ubicación. (Ver Figura 2.16).

- Cuando la profundidad $h > L/2$, la onda está en aguas profundas.
- Cuando $L/20 < h < L/2$, la onda pertenece a aguas intermedias.
- Cuando $h \leq L/20$, la onda está en aguas poco profundas.

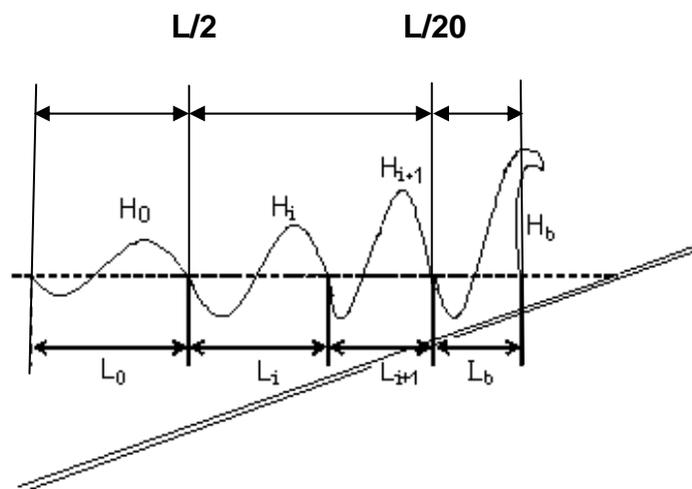


Figura 2.16. Aproximación del oleaje y transformación

2.1.5.2.- Refracción

La refracción es el cambio de dirección que experimenta un tren de oleaje por efecto del fondo marino; en su aproximación a la costa, el tren de olas se ve afectado por un fenómeno de transformación de oleaje ($h = L/2$), el cual hace disminuir la velocidad de propagación al extremo de menor profundidad, por su parte el otro extremo al avanzar a una velocidad mayor, se ve en la necesidad de hacer girar el frente de propagación (ver Figura 2.17); el resultado es que la ola al acercarse a la playa tiende a adaptar su forma a las curvas de nivel del fondo del mar, que generalmente son paralelas al borde de la línea de costa, es por este motivo que se puede apreciar que la dirección de propagación es perpendicular al borde de la playa.

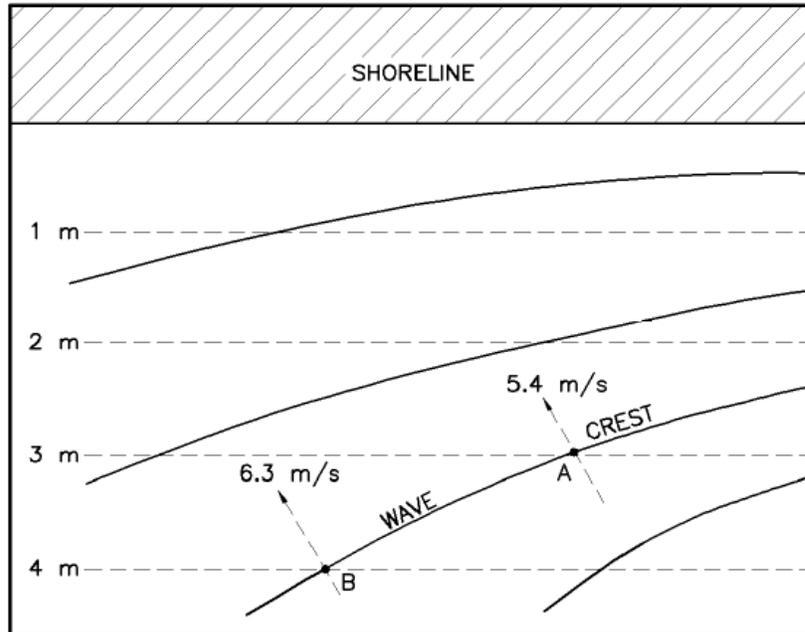


Figura 2.17. Efecto de Refracción. Fuente: CEM

El fenómeno de refracción obedece a la ley de *Snell*, que para batimetría recta y paralela, es:

$$\frac{\text{Sen}\beta}{\text{Sen}\beta_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{L}{L_0} \quad \text{adimensional} \quad (11.5)$$

Siendo β el ángulo comprendido entre el frente de la ola y la curva de nivel del fondo, en la zona en cuestión y β_0 el ángulo comprendido entre el frente de la ola y la curva de nivel del fondo a la profundidad ($h = L/2$).

El fenómeno de refracción sólo afecta a la altura del oleaje y a su dirección de propagación. Cuando la ola continúa su camino hacia la costa y la profundidad del agua disminuye, la ola modifica su velocidad y longitud de onda.

En zonas de poca profundidad ($h < L/2$), la altura H de la ola se puede poner de la siguiente manera:

$$H = K_s \cdot K_r \cdot H_0 \quad H \text{ en m} \quad (11.6)$$

En la que H_0 es la altura de la ola en aguas profundas, K_s es un coeficiente para aguas poco profundas y K_r es el coeficiente de refracción; de la fórmula de energía del oleaje y de la teoría de *Snell*, podemos decir que:

$$K_r = \sqrt{\frac{\text{Cos}\beta_0}{\text{Cos}\beta}} \quad K_r: \text{adimensional} \quad (11.7)$$

2.1.5.3.- Difracción

La difracción es el fenómeno de transferencia lateral de energía del oleaje debido a una barrera u obstáculo, que interrumpe o deja pasar parte del tren de oleaje, permitiendo la aparición de pequeños sistemas de olas en las aguas protegidas por la barrera. La barrera puede ser del tipo natural (*Islas*) ó construido por el hombre (*Espigón*). Cuando la ola pasa al otro lado de la barrera, el frente de olas adopta una forma circular (*ver Figura 2.18*), entrando en una zona de calma por detrás de la barrera, disminuyendo su altura en esa zona, mientras que la celeridad y la longitud λ de la ola no se modifican, la energía del oleaje se reduce al dispersarse en esta área, la cual es denominada “zona de sombra”.

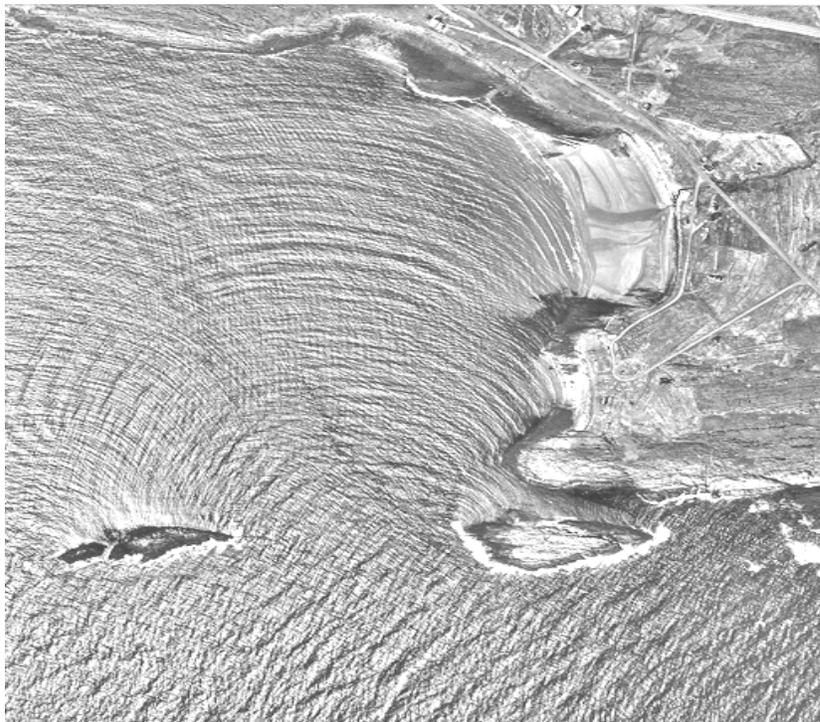


Figura 2.18. Fenómeno de difracción y refracción. Fuente: Anónima

Este fenómeno se puede caracterizar mediante el coeficiente de difracción K_d , que permite calcular la altura H_d de la ola en la zona de difracción, y se puede expresar de la siguiente manera:

$$K_d = \frac{H_d}{H} \quad K_d: \text{adimensional} \quad (11.8)$$

Siendo H la altura del oleaje antes de llegar a la barrera. Es de gran importancia el cálculo de la altura de oleaje por difracción, cuando se va a diseñar un puerto o un muelle donde se vea afectada la navegación por este fenómeno.

2.1.5.4.- Reflexión

El fenómeno de reflexión se presenta, cuando un tren de olas choca contra un obstáculo sin romper, como por ejemplo la pared vertical de un acantilado; una parte de la energía que la ola entrega cuando choca, es devuelta al mar, es decir que rebota, y el resto de la energía es disipada por el obstáculo.

Los principios básicos que rigen a este fenómeno en el campo de la óptica son los mismos que rigen al oleaje que choca contra un obstáculo, por lo que podemos decir que el ángulo de incidencia y el ángulo reflejado son iguales. De igual manera se comprueba que la cantidad de energía reflejada depende de la pendiente de la barrera, ya que si la barrera es muy plana como una playa, la mayor parte de la energía se disipará en la rompiente, obstáculos más verticales reflejarán mejor la energía de la ola; si la aproximación logra ser normal al obstáculo se pueden generar olas estacionarias que pueden llegar a tener el doble de la altura.

El coeficiente de reflexión K_{rf} se puede expresar de la siguiente manera:

$$K_{rf} = \frac{H_{rf}}{H} \quad \text{Kfr: adimensional} \quad (11.9)$$

2.1.5.5.- Run Up (ascenso).

El Run up o remonte del oleaje (Ru), se define como la cota que puede alcanzar el oleaje al incidir sobre una estructura o playa, medida respecto el nivel medio del mar (NMM). Como norma general, la caracterización vertical de cualquier parámetro hidrodinámico se encuentra siempre referida al nivel medio del mar, debido a las fluctuaciones existentes en el nivel medio del mar, tanto por la propia acción del oleaje (wave set-up) como por la acción de agentes externos (presión atmosférica, viento, etc).

En el caso de estructuras costeras el *Run up* determina la cota de coronación máxima que debe alcanzar la estructura para que esta no sea rebasada.

Para su cálculo se siguen dos tipos de aproximaciones: i) o bien se asume que el proceso es regular o bien ii) se asume una irregularidad del fenómeno oleaje y por tanto del parámetro hidrodinámico en si. En ambos casos la predicción se basa en relaciones empíricas, resultado de una gran variedad de ensayos realizados en canales de oleaje. (Ver Figura 2.19).

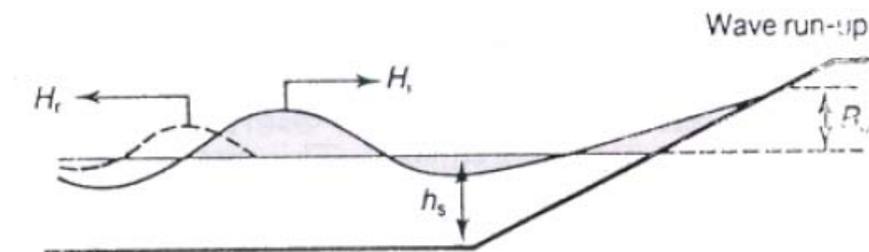


Figura 2.19. Run-Up de oleaje.

Fuente: <http://assig-camins.upc.es/op/omc/Olas%20-%20Estructuras.pdf>

2.2.- MAREA

Se le llama marea a los movimientos periódicos de ascenso y descenso de todas las aguas oceánicas, las aguas del mar abierto, los golfos y las bahías. Para poder desarrollarse, las mareas necesitan grandes extensiones marinas; en los mares cerrados o pequeños, así como en las lagunas, los desplazamientos del nivel del agua son pequeños y las mareas alcanzan poca altura, en cambio hay puertos en los que la marea son tan fuertes que la navegación esta condicionada a su ritmo, hasta tal punto que los barcos solo pueden entrar y salir cuando sube la marea.

2.2.1.- Origen de las Mareas

Estos movimientos se deben a la atracción gravitatoria que ejercen, la Luna y el Sol sobre la Tierra, provocando una oscilación constante del nivel del mar debido a la rotación de la Tierra alrededor del Sol y de la Luna alrededor de la Tierra. Las fuerzas actuantes son muy pequeñas siendo la fuerza de atracción de la Luna la que se ejerce en mayor proporción, comparada con la del Sol, cuya fuerza de atracción es casi la mitad de la correspondiente a la Luna.

La influencia de la fuerza de gravedad de la Luna sobre las mareas es mayor, por estar mucho más cerca de la Tierra que el Sol, además de las fuerzas de gravedad, de la Luna, el Sol y la de la misma Tierra, las masas de agua, así como todo en la Tierra, están expuestas, a la fuerza centrífuga (hacia fuera de la Tierra) como resultado del movimiento de rotación de la Tierra. El nivel de marea que se produce es, por tanto, el resultado de la combinación de estas dos fuerzas (centrífuga + gravitatoria).

El agua en el lado de la Tierra más cercana a la Luna, es atraída por la fuerza gravitatoria de la Luna, contrarrestando levemente la fuerza de

gravidad de la Tierra, y logrando un incremento en el nivel del mar. A su vez del lado opuesto de la Tierra, la Luna no es capaz de generar una fuerza centrípeta suficiente para mantener la masa del agua en una órbita con velocidad igual al del centro de la tierra, y por tanto tiene un defecto de aceleración con respecto al centro de la tierra, que hace que tiendan a quedarse rezagadas con respecto a esta, el efecto es que pareciera que existe una aceleración que expulsa el agua al lado opuesto donde se encuentra la luna. (Ver Figura 2.20).

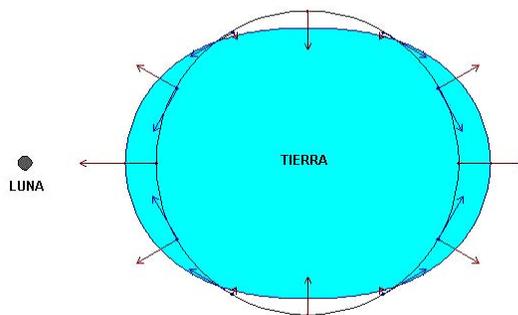


Figura 2.20. Distribución de las fuerzas de las Mareas

Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

Así, cuando la Luna está justamente encima de un punto dado de la Tierra, la combinación de estas fuerzas hace que el agua se eleve (Creciente) sobre su nivel normal. Esto se conoce como marea alta o pleamar (PM). La cresta de onda situada bajo la Luna se llama marea directa, y la del lado diametralmente opuesto de la Tierra se llama marea opuesta. En ambas crestas, prevalece la condición conocida como de marea alta. Luego se mantiene estacionaria por un periodo de tiempo, llamándose Marea Parada. Lo mismo ocurre con las regiones situadas en el lado opuesto de la Tierra, a lo largo de la circunferencia formada por las zonas perpendiculares al eje de mareas altas directa y opuesta se producen fases de marea baja. En esta fase permanece un corto periodo de tiempo para

bajar a continuación hasta alcanzar el nivel mínimo llamado bajamar (BM) Luego se mantiene estacionaria por un periodo de tiempo, llamándose Marea Parada. (Ver Figura 2.21).

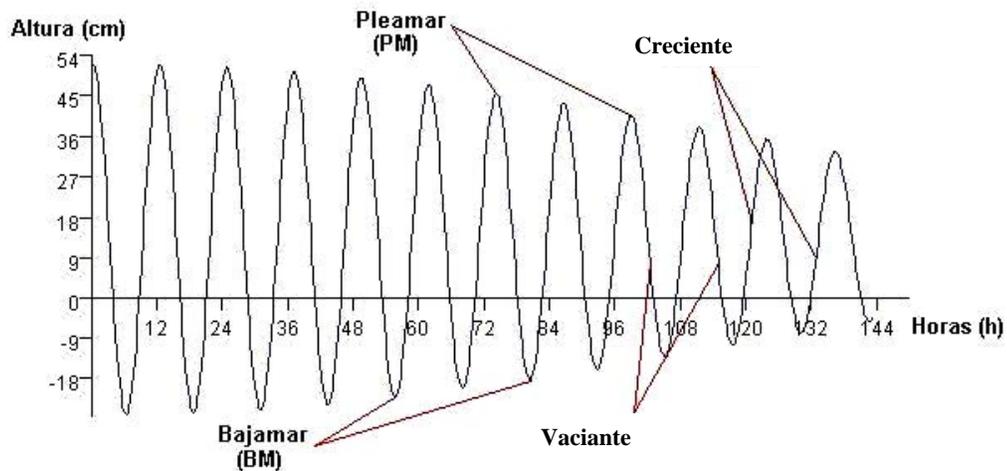


Figura 2.21. Gráfica de evolución de la marea y nomenclaturas
Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

2.2.2.- Tipos de Marea

Los tipos de mareas se pueden clasificar, según la frecuencia de los ciclos de mareas altas y mareas bajas que ocurren durante un día, o según la posición de la Luna y el Sol con respecto a la tierra. De esta forma podemos clasificar las mareas en dos grupos:

2.2.2.2.- Según su Frecuencia

2.2.2.2.1.- Mareas Semidiurnas

El tipo de marea semidiurna es una en la que el ciclo completo de pleamar y bajamar se completa en medio día. Hay dos pleamares y dos bajamares en un día de 24 horas 50 minutos. Para ser clasificados como la marea semidiurna, los dos ciclos de marea diarios deben parecerse a si mismos de manera que, aunque no sean idénticos, las dos pleamares no se diferencien mucho y las dos bajamares no se diferencien mucho. (Ver Figura 2.22).

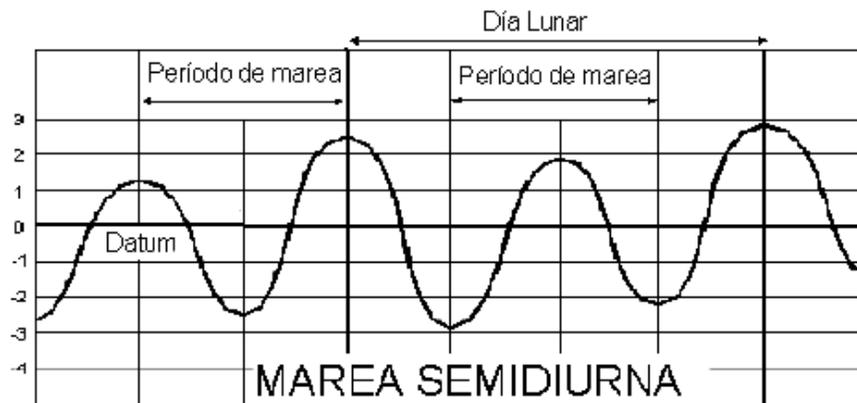


Figura 2.22. Gráfica de evolución de la marea semidiurna

Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celestes/mareas/mareas.htm>

2.2.2.2.2.- Mareas Diurnas

El tipo diurno describe aquellas mareas en las que una pleamar y una bajamar ocurren en un día lunar. En este tipo de marea, el período de pleamar, y también el de bajamar, es de aproximadamente 12 horas de forma opuesta a las 6 horas de los períodos de las mareas semidiurnas. (Ver Figura 2.23).

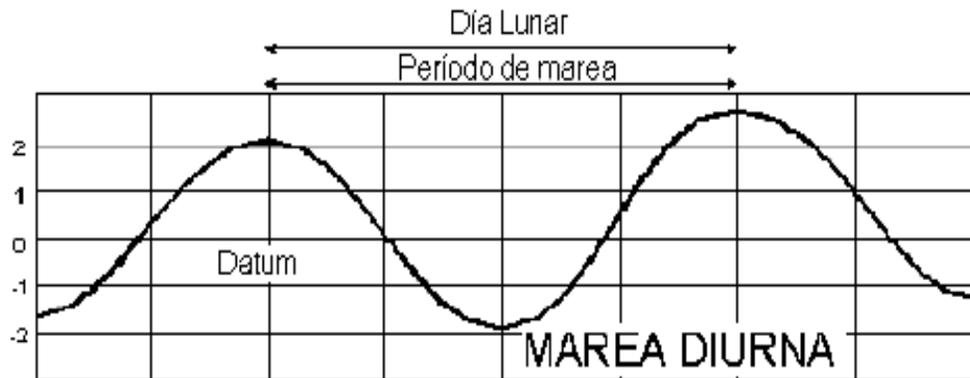


Figura 2.23. Gráfica de evolución de las mareas diurnas

Fuente: <http://www.sc.edu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

2.2.2.2.3.- Mixtas

El tipo de marea mixto es aquel en el cual hay dos pleamares y dos bajamares que ocurren cada día, pero existen diferencias entre estos dos pleamares o dos bajamares en cuanto a la amplitud. Este tipo de marea es denominado marea mixta porque tiene las propiedades de una mezcla de las mareas semidiurnas y diurnas. (Ver Figura 2.24)

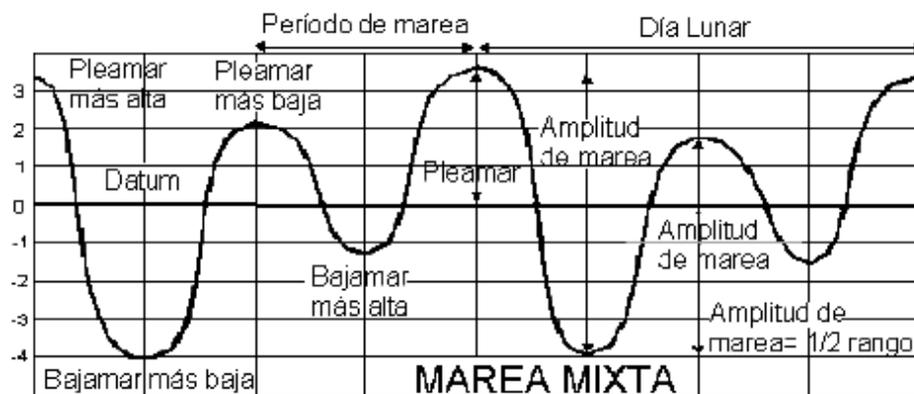


Figura 2.24. Gráfica de evolución de la marea mixta.

Fuente: <http://www.sc.edu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

2.2.2.3.- Según la Ubicación de la Luna y el Sol

2.2.2.3.1.- Mareas Vivas

Las mareas vivas o mareas de sicigia se producen cuando los tres astros, Sol, Luna y Tierra se encuentran sobre una misma línea (ver Figura 2.25), las fuerzas de atracción de la Luna y el Sol se suman, por lo que se producen las pleamares máximas y bajamares mínimas. Cuando la luna se encuentra entre la tierra y el sol se la denomina de conjunción (luna nueva) y cuando la tierra se encuentra entre la luna y el sol se las llama de oposición (luna llena). Dentro de las mareas vivas que ocurren en un año hay dos con valores máximos, que son las que se producen en los equinoccios de otoño y primavera, o sea cuando el sol y la luna se encuentran sobre el Ecuador.



Figura 2.25. Influencia del Sol y la Luna en las Mareas Vivas

Fuente: <http://www.elanzuelo.com/ciencia/mareas.htm>

2.2.2.3.2.- Mareas Muertas

Las mareas muertas o mareas de cuadratura (ver Figura 2.26), se producen cuando la Luna y el Sol forman un ángulo de 90° con centro en la Tierra, la luna se encuentra en cuarto creciente o en menguante. En este caso las resultantes de las fuerzas de atracción que ejercen la Luna y el Sol sobre la Tierra, se restan por lo que se producen mareas de menor magnitud a las mareas promedio.



Figura 2.26. Influencia del Sol y la Luna en las Mareas Muertas

Fuente: <http://www.elanzuelo.com/ciencia/mareas.htm>

2.3.- CORRIENTES MARINAS

Una corriente marina es un movimiento continuo y permanente de una masa de agua de mar u oceánica. Las corrientes marinas trasladan agua templada desde el ecuador hacia los polos, mientras que el agua fría, por su parte, se mueve hacia el ecuador. De esta forma la Tierra distribuye el calor de su superficie, lo que constituye un importante factor climático.

2.3.1.- Tipos de Corrientes Marinas

2.3.1.1.- Corriente de densidad

Este tipo de corrientes es originada por la diferencia de densidades del agua, la cual varía según sea su temperatura o salinidad. Este movimiento tiende a movilizar hacia el fondo a las aguas más densas como son las aguas frías o saladas, provocando el afloramiento de aguas calidas más profundas para ocupar su lugar.

2.3.1.2.- Corriente de Arrastre.

Son las corrientes que se establecen en superficie de los océanos, por la acción directa del viento, siendo de mayor intensidad cuando el viento es constante sobre una masa extensa de agua, como es el caso de los vientos alisios que soplan hacia el Noreste y Sureste, en el Atlántico y Pacífico creando corrientes de grandes masas de agua en dirección Oeste.

2.3.1.3.- Corriente de Mareas.

La variación del nivel de las agua por causa de las mareas, que crean diferencias de altura en grandes extensiones de océano, generando flujos importantes, especialmente en lugares estrechos y de poco fondo cercanos a las costas, donde suelen adquirir grandes velocidades; su dirección cambia a la vez que cambian las mareas.

Las velocidades de estas corrientes suele ser muy intensas, dependiendo de la configuración de la costa, en pasos estrechos pueden llegar a alcanzar velocidades realmente altas tal como los 5 m/s.

A las corrientes de marea se las suele llamar de flujo y reflujo, según sea entrante la marea o vaciantes. Son periódicas y alternativas. Se alternan cada 6 horas y 12 minutos.

2.4.- TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimento, es el mecanismo capaz de movilizar las pequeñas partículas de sedimento que se encuentran en reposo, hasta su deposición final. Este fenómeno puede constituir la forma de una costa completa hasta una playa, por medio del movimiento de las partículas de sedimentos, que se transportan a lo largo de ella. Este transporte se realiza principalmente entre la zona de rompiente y la línea de costa, pero fuera de ésta zona, también existe transporte de partículas, pero en menor proporción.

La energía que se disipa en el proceso de rompimiento del oleaje, desarrolla una gran actividad, entre la zona de rompiente y la costa, parte de esta energía se consume en colocar en suspensión y movimiento los sedimentos que se encuentran en el lecho marino. Este movimiento continuo de los sedimentos, pueden modificar por completo la morfología de una costa, en muy poco tiempo poniendo en riesgo, las playas y las infraestructuras que en ella se encuentren.

2.4.1.- Tipos de Transportes

Cuando el oleaje rompe y choca contra una costa, generalmente lo hace en forma oblicua, formando corrientes tanto a lo largo como en forma perpendicular a la costa, estas corrientes, dentro de la zona de rompiente o zona dinámica, son usualmente más importantes para el transporte de sedimentos que las corrientes marinas y tienen una mayor capacidad para transportar sedimentos. Para facilitar los cálculos, es posible separar en dos formas, el transporte de sedimentos, originado por la acción del oleaje, uno perpendicular a la costa (Transporte normal o *Cross-shore sediment transport*) y otro paralelo a la costa (Transporte litoral o *Longshore Sediment Transport*). Cabe destacar que el transporte paralelo a la costa es el responsable de los cambios a largo plazo de esta, mientras que el transporte transversal es el responsable de los cambios a corto plazo.

2.4.1.1.- Transporte Normal a la Costa

El transporte de sedimentos normal a la costa, ocurre cuando la ola llega a la parte alta de la playa en su movimiento ascendente (*Run-up*), producto de la cantidad de movimiento transferido en el momento de la rompiente transportando sedimentos en la dirección incidente; al cambiar de dirección cuando el movimiento es descendente (*Run-down*) acarrea sedimentos por la línea de mayor pendiente, originándose un equilibrio de sedimentos donde lo que se deposita es casi igual a lo que se retira.

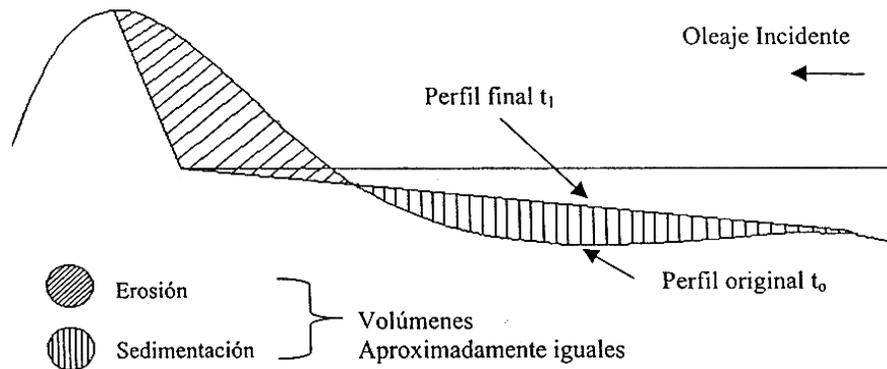


Figura 2.27. Balance de Volúmenes en Transporte normal

Fuente: <http://www.geocities.com/gsilvam/playa.htm>

No todos los sedimentos son transportados de regreso al mar, algunos se depositan en la orilla y por tanto crece ligeramente la cantidad de arena en la playa formándose la barra de la playa. (Ver Figura 2.27)

2.4.1.2.- Transporte Litoral

El transporte litoral es el mecanismo, por medio del cual las partículas de sedimento se mueven paralelas a la costa, este movimiento es originado por la componente en ese sentido del oleaje, el cual incide generalmente con cierta oblicuidad contra la costa, generando corrientes paralelas a la línea de costa, llamadas corrientes litorales.

Estas corrientes son las responsables del transporte a lo largo de la costa, movilizandolos sedimentos, removido del fondo del mar, cuando la ola rompe, se origina entre la zona de rompiente y el frente de la playa. (Ver Figura 2.28).

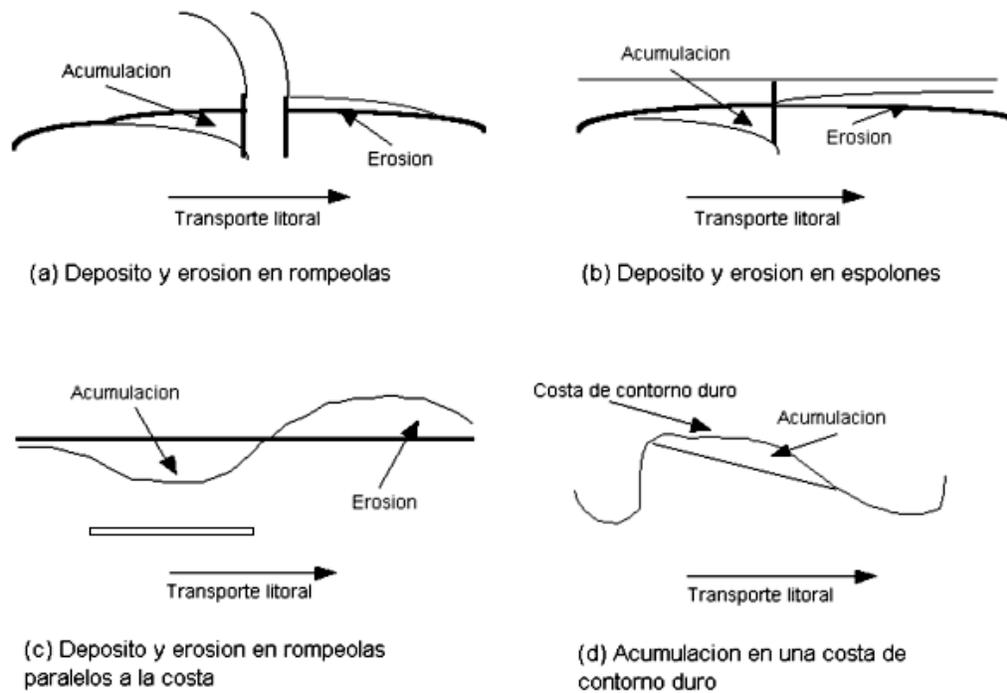


Figura 2.28. Comportamiento de la costa asociado al transporte litoral

Fuente: <http://www.elanzuelo.com/ciencia/mareas.htm>

2.4.2.- Capacidad de Transporte de Sedimentos

La capacidad de transporte de una costa, se determina por la cantidad de sedimentos neto que puede movilizar a lo largo de esta, su carga es la cantidad de detritos transportados, expresada en unidades de peso sobre tiempo, como kilogramos por segundo, toneladas por día, o toneladas por año. La concentración es la masa de sedimentos que se encuentra en un volumen unitario de agua, usualmente expresada en gramos por litro.

2.4.3.- Cálculo de la Capacidad de Transporte de Sedimentos

Para el diseño funcional de estructuras costeras es importante conocer tanto la dirección como la magnitud del transporte de sedimentos. La magnitud puede medirse de una manera precisa solamente si se encuentra durante un período de tiempo conocido una acumulación de sedimentos sobre una barrera litoral, como un rompeolas, espigones, etc.

Si no existen barreras litorales se puede tener un orden de magnitud aplicando fórmulas empíricas, como las desarrolladas en las últimas décadas. Una de las primeras fórmulas utilizadas, fue la fórmula establecida por la *U.S Army Coastal Engineering Research Center* (Fórmula de CERC), poco tiempo después de la segunda guerra mundial; esta fórmula fue una de las primeras en relacionar el ángulo de incidencia de oleaje con el transporte de sedimentos y ha sido utilizada como base, por diferentes modelos numéricos de morfología costera. Esta fórmula ha sido muy criticada, debido a las pocas consideraciones que tiene sobre las características físicas de los sedimento transportados (tamaño del grano, densidad, etc.) Aunque con el tiempo la fórmula de CERC se ha ido mejorando, agregándole nuevos factores, todavía sigue sin considerar parámetros de importancia, como las corrientes de marea.

Otras fórmulas desarrolladas para el calculo de sedimentos, han sido las formulas de Bijker (1971), Engelund-Hansen (1976), Fleming (1977), Ackers-white, Crostan (1984), Sayao-Nairn-Kamphius (Fórmula de Queens 1985), siendo esta última la más usada en la actualidad, esta fórmula fue desarrollada por Kampihus de la Universidad de Queens, institución que le da el nombre a la fórmula.

Fórmula de Queens:

$$Q = \left(\frac{\rho \cdot H_b^3}{T} \right) \cdot K \cdot \left(\frac{H_b}{L_o} \right)^a \cdot \tan^b(\alpha) \cdot \left(\frac{H_b}{D_{50}} \right)^c \cdot \text{sen}^d(2\phi_b) \quad (11.10)$$

Donde:

Q= Transporte longitudinal de sedimentos [kg/s]

ρ = Densidad del agua de mar [Kg/m³]

H_b= Altura de la ola significativa en la zona de rompiente [m]

T= Periodo [s]

D₅₀= Tamaño medio del grano [m]

ϕ_b = Angulo en la zona de Rompiente

α = Pendiente de la playa

L_o= Longitud de las olas en aguas profundas

K = Variable empírica.

a = Variable empírica.

b = Variable empírica.

c = Variable empírica.

d = Variable empírica.

Los valores de las variables empíricas fueron calibrados por Kamphius a partir de numerosos ensayos consiguiendo los siguientes valores:

$$\begin{array}{lll} K = 1,3 \times 10^{-3} & b = 0,75 & d = 0,6 \\ a = -1,25 & c = 0,25 & \end{array}$$

Para calcular el transporte en m^3/s , hay que dividir Q entre la densidad de sedimentos y la fracción de volumen ocupado por el material $(1-p)$, lo que conduce a la siguiente formula:

$$S = \frac{Q}{\rho_s(1-p)} \quad S \text{ es expresada en } (m^3/s) \quad (11.11)$$

Donde:

S = transporte de sedimentos en m^3/s

p = porosidad.

ρ_s = Densidad de los sedimentos Kg/m^3

2.4.4.- Morfología Costera

La acción de las olas y mareas sobre la costa da lugar a la aparición de una gran variedad de formas de relieve, como playas, barras, flechas litorales y dunas costeras, producto del depósito de materiales arrastrados por ellas, y otras, como acantilados, cuevas, farallones y arcos, ponen de manifiesto las fuerzas marinas sobre las líneas de costa.

La importancia relativa de determinadas fuerzas marinas varía según el tipo de línea de costa. Las que están expuestas a los océanos y mares pueden verse muy alteradas debido especialmente a la acción de las olas, y son afectadas en menor grado por las corrientes de marea, los movimientos de subida y bajada del nivel del agua. Por el contrario, las líneas de costa resguardadas en bahías y estuarios suelen acusar enormemente la influencia de las corrientes de marea, mientras que el oleaje desempeña un papel secundario. La acción de estos procesos costeros, combinada con la sedimentación y el tipo y estructura de la roca de la zona, da origen a distintas formas de relieve. Cada una de ellas presenta problemas concretos para la gestión y conservación de la zona costera

2.5.- OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERAS

La principal función de las obras costeras, es la de proteger a las costas y a sus infraestructuras, del oleaje marino y de sus fuerzas erosivas, así como también protegerlos de los incrementos en el nivel del mar, por acción de mareas, tormentas, alteraciones meteorológicas, etc. De esta forma podemos diferenciar varios tipos de estructuras costeras, para diferentes tipos de usos.

2.5.1.- Tipos de Obras y sus Usos

En la ingeniería de costas las obras de protección costera más usadas son los espigones, malecones, rompeolas, estructuras sumergidas y obras de préstamo de arena.

A continuación se realizara un esbozo de las diferentes tipos de obras y su función.

2.5.1.1.- Espigones Perpendiculares a la Costa

Los espigones perpendiculares son estructuras generalmente de pocos metros de longitud, cuya función principal es la de proteger la costa de la erosión producida por el oleaje.

Su funcionamiento depende del transporte litoral, debido a que el espigón forma una barrera, que detiene los sedimentos que son transportados paralelos a la costa, al verse interrumpido el paso de sedimentos por la estructura, que retiene gran cantidad de la arena que es transportada a lo largo de la costa, la playa comienza a erosionarse del lado opuesto del espigón para recuperar su capacidad de transporte. (Ver Figura 2.29).

Los espigones pueden tener diversas formas según la forma que se le quiera dar a la costa, son elaborados principalmente de material rocoso encontrado en la zona.

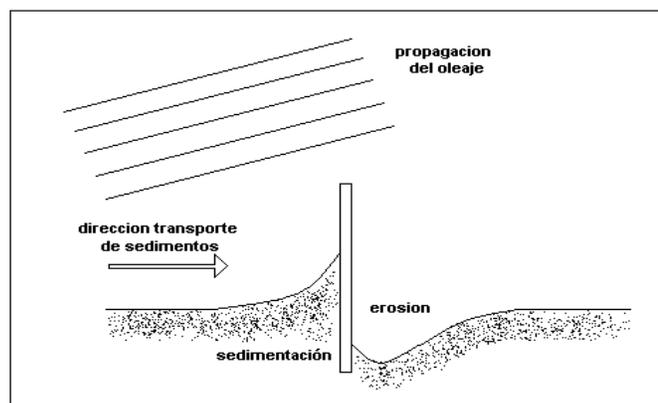


Figura 2.29. Espigón perpendicular a la Costa

2.5.1.2.- Espigones Paralelos a la Costa

Los espigones paralelos a la costas, son estructuras cuya función principal es la de resguardar a la costa del rompimiento del oleaje, formando

una zona de calma entre el y la costa que permite que las partículas se sedimenten, estos espigones pueden ser superficiales o sumergidos, son elaborados principalmente de material rocoso encontrado en la zona. (Ver *Figura 2.30*).

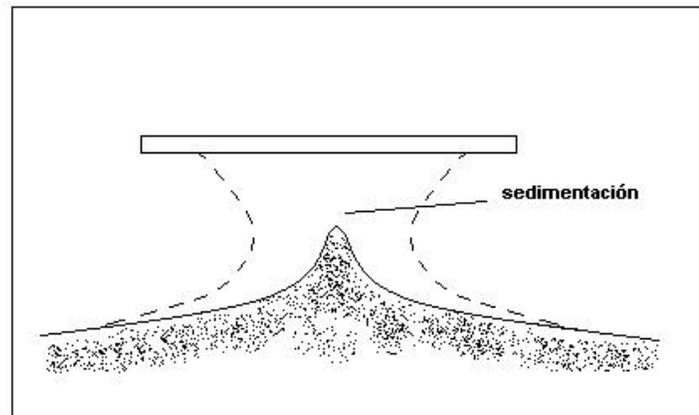


Figura 2.30. Espigón paralelo a la Costa

2.5.1.3.- Malecones

Los malecones son estructuras terrestres o marinas cuya función principal es la de preservar o de aliviar el rebasado del oleaje y evitar la inundación de las tierras detrás de la estructura debido a tormentas o mares de leva.

Los malecones se utilizan a menudo para proteger las estructuras colocadas al borde de la línea de costa natural. Los malecones pueden ser elaborados de material rocoso, concreto armado o mixtas. Este tipo de obra por lo general tiene una vía de acceso en la cresta, cuya finalidad es la visita de la estructura, se han visto casos que el malecón se utiliza con finalidad turística.

2.5.1.4.- Rompeolas

Como su nombre lo indica, los rompeolas son estructuras diseñadas específicamente para producir la rotura de la ola anulando de esta forma la energía de la misma, y así abrigar y proteger una zona costera, un puerto o un canal de navegación, son estructuras por lo general de gran longitud, mayor de 100 metros y puede alcanzar hasta kilómetros, como el caso del Rompeolas Oriental cuya longitud es de 4500 metros.

A diferencia de los malecones y espigones, que buscan proteger la línea de costa, los rompeolas buscan brindar condiciones favorables para la navegabilidad y la recreación. (Ver Figura 2.31)

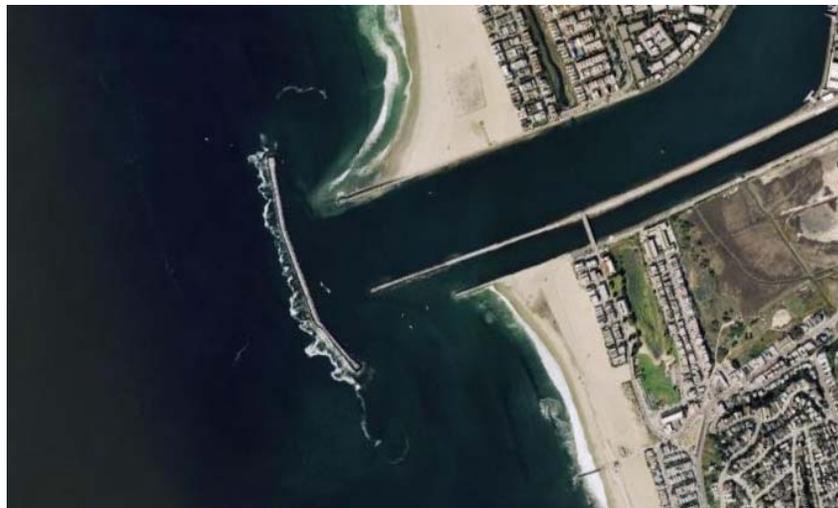


Figura 2.31. Rompeolas para protección de oleaje
Fuente: GOOGLE EARTH

2.5.1.5.- Restitución de Costa

La restitución de playas consiste en el aporte de tierras, procedente tanto de lechos de ríos y pantanos, como de fondos marinos; esta es una

técnica usada para restaurar la erosión ocasionada por el mar a una playa o para crear un litoral arenoso nuevo, implica la colocación del terraplén de arena con o sin las estructuras de soporte a lo largo del litoral para ensanchar la playa. Es la única herramienta de gerencia que sirve el de doble finalidad de proteger tierras costeras y de preservar recursos de la playa.

Es importante destacar que la restitución de playas no detiene la erosión, este es un fenómeno propio de la zona y tiene que ver con el transporte de sedimento, el perfil y forma de la costa, por esta razón es importante implementar un sistema de mantenimiento. Existe un debate social entre grupos ecologistas y administraciones a cerca de la correcta gestión de las playas en lo que respecta al mantenimiento de la arena en las mismas.

Entre las ventajas y desventajas de la restitución de playas tenemos.

VENTAJAS:

- La restitución de arenas, ensancha la playa permitiendo un mayor provecho para el uso recreacional.
- Las estructuras detrás de la playa se protegen mientras permanezca la arena agregada.
- Cuando la erosión continúa, el alimento de la playa no deja peligros en la playa o en la zona de la resaca. Esto es una ventaja grande en comparación con las estructuras “duras” de estabilización de la playa como los malecones o los espigones. Los malecones pueden proteger las estructuras detrás de la playa, pero casi siempre hacen que la playa delante de la pared, sea más estrecha. Si la erosión practica una abertura en el malecón, entonces los escombros de la pared, serán dejados en la playa. Puesto que el alimento de la playa pone

solamente la arena en la playa, no se deja ningún efecto dañino cuando erosiona.

DESVENTAJAS:

- La arena colocada en la playa se erosiona a menudo más rápidamente que la arena originaria del lugar.
- La solución del problema no es definitiva, si no se cuenta con el adecuado mantenimiento.
- El proceso de restitución puede dañar, destruir o lastimar otras formas de vida, aplastándola debajo de las niveladoras, cambiando la forma de la playa, o haciendo que el agua cerca de la playa sea demasiado fangosa.

2.6.- MODELO DE MORFOLOGÍA COSTERA

En los últimos años los modelos han tenido un impresionante desarrollo en todas las áreas del conocimiento humano, científico y de los recursos naturales en general. Su importancia ha radicado entre otros aspectos, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Asimismo a través de los modelos podemos establecer relaciones de causa y efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales.

Los modelos de morfología costera, son una herramienta que nos permiten representar matemáticamente, los procesos de cambio de una costa que tardaría muchísimos años, en algunos cuantos minutos. Las actividades realizadas por estos modelos van desde la planificación de la zona costera, hasta los estudios de previsión de la evolución de la línea de costa a medio y largo plazo.

Con los modelos de morfología costera se pueden determinar valores, muy aproximados a la realidad, estos permiten realizar una interpretación de los datos de campo, calculando y determinando distintos valores como, tasas de transporte de sedimentos, balances sedimentarios, análisis morfodinámicos de playas y su evolución, para poder identificar y cuantificar los problemas costeros, así como de los factores que los inducen y realizar estudios de impacto de zonas costeras sobre la morfología del litoral.

2.6.1.- Condiciones de Bordes

En todo modelo matemático se debe especificar el marco para el cual fue desarrollado, así como también la cantidad de variables que se van a utilizar y los rangos que cada una pueden tomar, para que el resultado sea lo mas aproximado a la realidad posible. Los valores máximos o mínimos que pueden tomar estas variables, son situaciones del problema que llamamos “condiciones de borde”, estos valores se pueden conocer de antemano y se pueden utilizar para determinar puntos de partidas en nuestro análisis matemático.

2.6.2.- Calibración

La calibración es el proceso por el cual se determinan los valores de una serie de parámetros característicos del sistema para que los resultados del modelo se ajusten a unos datos que se consideran como de referencia en este ajuste. La elección y determinación del rango de estos valores es de gran importancia, puesto que precisamente son los que van a caracterizar el comportamiento del sistema.

La calibración es una garantía para la aplicabilidad del modelo, la importancia de la cual se sustenta en tres aspectos básicos:

- **Confianza:** demostrando que el modelo tiene capacidad de reproducir condiciones existentes y fiabilidad para resolver situaciones futuras o futuribles
- **Conocimiento y comprensión:** la calibración convierte el modelo en una herramienta para conocer el comportamiento del sistema en su totalidad, explicando cambios que ocurren en su comportamiento en base a variaciones de las condiciones operativas
- **Resolución de problemas.** Puede, mediante una calibración adecuada, reconstituirse información perdida o registrarse alarma sobre situaciones de comportamiento anómalo o información errónea. Se permite así la detección de errores de información de partida así como apoyo para la detección de averías o fallos por parte de los dispositivos de telemetría.

2.6.3.- Simulación

La simulación es el proceso en el cual se utiliza el modelo para representar situaciones de la vida real, para el caso que estamos analizando, representar las modificaciones de las líneas de costa en el tiempo, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema y evaluar nuevas estrategias,

La ventaja de la simulación es que nos permite verificar entre diferentes alternativas de soluciones, cual de estas será la mas favorable, para ser implementada.

Como último punto y considerando que uno de los objetivos del presente tema de tesis es tratar de entender los procesos costeros, en especial lo relacionado con el movimiento de los sedimentos, se realizó una investigación tratando de buscar algún tipo de metodología adicional que nos pudiera suministrar información adicional relacionada con el sedimento y que

nos pudiera ayudar a entender cómo se está moviendo en a lo largo de la zona en estudio.

Para tal caso se ejecuto un análisis mediante la microscopia electrónica, a continuación se describe en qué consiste este método.

2.7.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Un microscopio electrónico es un microscopio que utiliza electrones en vez de fotones o luz visible, la potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible.

Los microscopios electrónicos permiten alcanzar una capacidad de aumento muy superior a los microscopios convencionales (hasta 500.000 aumentos comparados con los 1000 aumentos de los mejores microscopios ópticos) debido a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de los fotones.

La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4.000 angstroms (1 ángstrom es 0,000000001 metros). La longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 angstroms.

Todos los microscopios electrónicos cuentan con varios elementos básicos. Disponen de un cañón de electrones que emite los electrones que chocan contra el espécimen, creando una imagen aumentada. Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones. El sistema de vacío es una parte relevante del microscopio electrónico. Los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características. Por último, todos los

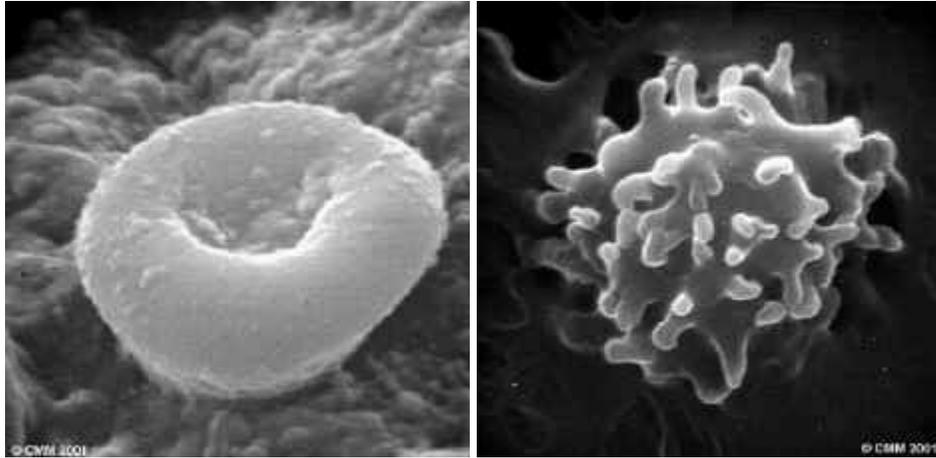
microscopios electrónicos cuentan con un sistema que registra o muestra la imagen que producen los electrones.

Hay dos tipos básicos de microscopios electrónicos: el microscopio electrónico de transmisión (*Transmission Electron Microscope, TEM*) y el microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscope, SEM*).

Microscopio electrónico de transmisión (TEM): permite la observación de muestra en cortes ultra finos. Un TEM dirige el haz de electrones hacia el objeto que se desea aumentar. Una parte de los electrones rebotan o son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada del espécimen. Para utilizar un TEM debe cortarse la muestra en capas finas, no mayores de un par de miles de angstroms. Se coloca una placa fotográfica o una pantalla fluorescente detrás del objeto para registrar la imagen aumentada. Los microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar un objeto hasta un millón de veces.

Microscopio electrónico de barrido (SEM): Este tipo de microscopio electrónico crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. No es necesario cortar el objeto en capas para observarlo con un SEM, sino que puede colocarse en el microscopio con muy pocos preparativos. El SEM explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que el TEM, que examina una gran parte de la muestra cada vez. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones por la pantalla de una televisión. Los electrones del haz pueden dispersarse en la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones perdidos y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en un monitor de televisión. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se

presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200.000 veces o más. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que los TEM o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto. (Ver Fotografía 2.1).



Fotografía 2.1. Glóbulo Rojo y Blanco visto desde un Microscopio Electrónico
Fuente: información entregada por Centro de Microscopía Electrónica de la UCV.

CAPÍTULO III

INFORMACIÓN BÁSICA - SECTOR EL YAQUE

Las tendencias actuales relativas al aprovechamiento económico y la protección ambiental de las regiones costeras son cada vez mayores; factores que influyen en la aplicación de normas en torno a la construcción y utilización de espacios para actividades turísticas, en especial en zonas donde existen ambientes con alta vulnerabilidad en el ecosistemas.

La situación en el uso y el desarrollo desmesurado de instalaciones aledañas a esta a las playas en el sector de El Yaque, posiblemente han contribuido en buena medida a modificaciones en la geomorfología de la zona, además no se descarta la participación en alguna medida, de los cambios del clima mundial.

Especulaciones realizadas quizás, a la falta o insuficientes estudios a profundidad sobre las variables hidráulicas y soluciones posibles para contrarrestar el efecto del proceso erosivo en la playa de El Yaque y su influencia sobre el uso como espacio recreativo para los visitantes.

Es oportuno citar la laguna de Las Marites, donde existe una planta de tratamiento de aguas cuyos efluentes descargan en la zona, de la misma manera, existen una serie de asentamientos en los márgenes de la playa.

La complejidad hidráulica presentada requiere para ser resuelta, la aplicación de las herramientas adecuadas y modernas de la Ingeniería de Costas, tales como: un software para el tratamiento de datos hidráulica, imágenes digitales de la zona de estudio y la información relevante del catastro.

Para ello, la Ingeniería de Costas se nutre de distintas variables, tales como el oleaje, marea, corrientes marinas, tormentas y los datos topo-

batimétricos de la zona, sobre las cuales se apoya para obtener la mejor opción de solución dentro del panorama que presenta en la playa El Yaque.

En este capítulo se pretende incluir toda la información básica necesaria para entender la situación actual y realizar un análisis más exhaustivo, pudiendo ofrecer una solución adecuada a la problemática expuesta.

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El Estado Nueva Esparta está ubicada al Noreste de Venezuela, a 38 kilómetros de la costas del estado Sucre. Se encuentra conformado por tres islas, Margarita, Coche y Cubagua. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: 10°51' 54"; 11° 10' 36" de Latitud Norte y 63°46' 36"; 64° 25' 42" de Longitud Oeste. (Ver Figura 3.1)

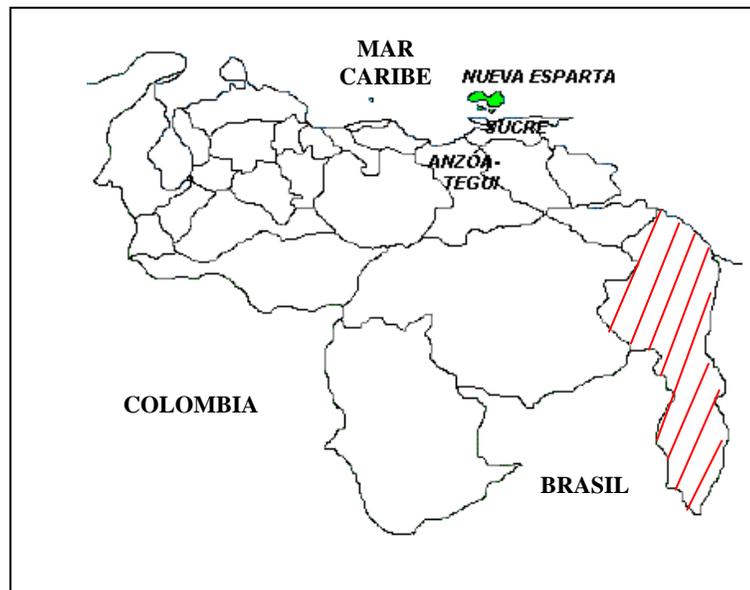


Figura 3.1 Ubicación geográfica

Fuente: <http://www.venezuelatuya.com/estados/nuevaesparta.htm>

3.1.1 Ubicación Político Territorial

Situación limítrofe: Nueva Esparta, el único estado insular del país, limita por los cuatro puntos cardinales con el Mar Caribe.

Superficie: aproximadamente 1.150Km².

Población: aproximadamente 430.000 habitantes *

3.1.2 Clima

Como región insular de proporciones relativamente pequeñas, el Estado Nueva Esparta tiene un clima afectado por la altura al nivel del mar, las condiciones marítimas, los vientos alisios y los centros de presión. No obstante, la presencia de dos bloques montañosos actúa como factor de variabilidad. La temperatura media anual es alta en todo el estado (entre 26° y 28°C), con escasa variación diaria y con máximas de mayo a septiembre y mínimas de diciembre a enero. La insolación es elevada y la evapotranspiración potencial oscila entre 1.600 y 1.800 mm. Ello determina un clima de tipo semiárido según la clasificación de Koeppen en casi todo el estado. El régimen de precipitación se caracteriza por dos períodos lluviosos (de junio a agosto y de diciembre a febrero) y dos secos (marzo a mayo y septiembre a noviembre), pero el balance hídrico es deficitario durante todo el año. La humedad relativa media es de 70 a 80 por ciento en la mayor parte de la isla, excepto en las montañas. La zona de mayor precipitación es el bloque montañoso oriental, aunque con grandes variaciones, pues los registros oscilan entre 400 y 1.100 mm anuales. En la península de Macanao, a pesar de las montañas, la precipitación es menor debido a la acción de los vientos alisios (entre 300 y 500 mm anuales). En el paisaje montañoso la precipitación decrece con la altura.

* Cifras indicadas por INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA - INE

3.1.3 Características Físico- Naturales

3.1.3.1 Vegetación

En la isla de Margarita los efectos climáticos y/o edáficos han producido una mezcla de zonas de vida, con variados ecosistemas que comprenden desde la maleza desértica tropical, en las zonas bajas y secas, hasta el monte espinoso y el bosque seco tropical en zonas de mayor altura. En el cerro Copey se encuentra el bosque húmedo premontano y en las zonas pantanosas y salinas abundan los manglares. (Ver Figura 3.2)

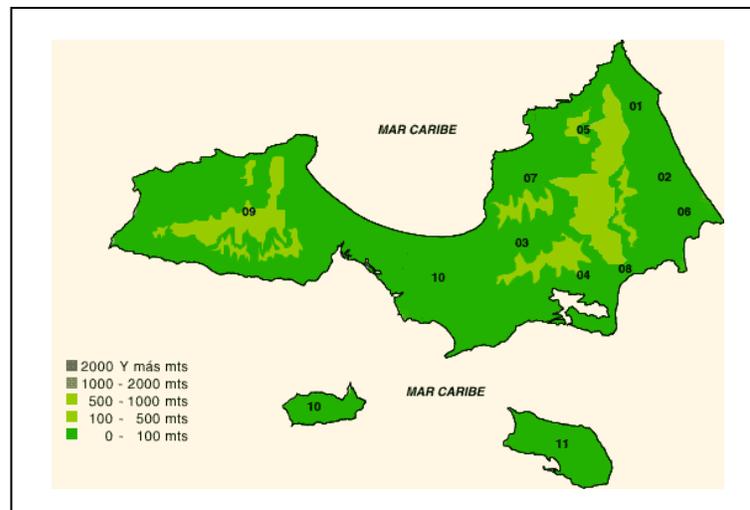


Figura 3.2 – Vegetación. Fuente: <http://www.venezuelatuya.com>

Las especies más representativas son olivos, dividive y pardillo, alrededor de los cerros Copey, Matasiete y Guaragua. El bosque muy seco se encuentra en áreas de vegetación muy intervenida. Las principales especies son: cují, guatacare, guamache, cardón, dividive y olivo. Los espinares y las malezas desérticas, formaciones dominantes del estado, ocupan las llanuras costeras. Sus principales especies son abrojo, cují, yaque, orégano, tuna, cardón, dividive, guamache y otras. Las concentraciones de manglares se localizan en La Restinga, Las Marites y

otras zonas de agua costaneras. Las especies más importantes son el mangle colorado, botoncillo y el mangle negro.

3.1.3.2 Geología

En las zonas de montaña, basamento geológico del Estado Nueva Esparta, están compuestos por formaciones ígneo-metamórficas de la era mesozoica. La zona costera está constituida por formaciones sedimentarias mientras que las terrazas marinas son formaciones aluvionales y depósitos lagunares.

3.1.3.3 Suelos

Los suelos del Estado Nueva Esparta son el resultado de procesos de adición, pérdida o transposición de materiales en zonas áridas y de escasa vegetación. Son suelos delgados y pocos desarrollados, sujetos a intensos procesos erosivos acelerados por el sobrepastoreo, las oscilaciones del nivel del mar y la deforestación realizada para el aprovechamiento agrícola. Los suelos de los valles, las tierras de mejor calidad, son bien desarrollados, tienen capa orgánica, están protegidos de la acción erosiva del viento y se encuentran cubiertos de vegetación, pero sólo ocupan una pequeña proporción del estado. En las zonas de piedemonte, los conos de deyección y materiales coluviales dan lugar a suelos muy pedregosos. Las islas de Coche y Cubagua presentan suelos con salinidad y con una fuerte erosión resultante de la acción de los vientos, lo cual le confiere a su capa superficial un carácter pedregoso.

3.1.3.4 Relieve

La isla de Margarita está constituida por dos secciones que originalmente fueron dos islas y que se encuentran unidas actualmente por una restinga ó cordón arenoso. Tiene dos paisajes dominantes: las zonas montañosas y las zonas planas costeras. En la sección oriental se destacan el macizo El Copey, cuyas mayores alturas son los cerros de Choaima (810 m) y Grande o San Juan (910 m), la mayor de la isla, y la fila integrada por los cerros de Matasiete (670 m) y Guayamurí (480 m). Los principales valles de este bloque son San Juan, Pedro González, La Asunción y el valle del Espíritu Santo. En la sección occidental o península de Macanao, el núcleo montañoso está formado por una fila de cerros cuyas principales alturas son el cerro Macanao (750 m), Los Cedros (745 m), cerro Risco Blanco (680 m) y Guaraguao (660 m). Alrededor de estos conjuntos montañosos domina la llanura. Gran parte de la isla está formada por llanuras costeras, como la de Juan Griego, Puerto Fermín-El Agua y la más importante, al suroeste, desde la laguna de Las Marites hasta Bahía de Mangle y desde La Restinga hasta el mar, en donde los únicos accidentes son el cerro Aguaverde (100 m), las Tetas de María Guevara (100 m) y la serranía de Banco Largo. El relieve de las islas de Coche y Cubagua está representado por tierras bajas costeras con elevaciones inferiores a los 70 m.

3.1.3.5 Hidrografía

El agua es un recurso muy escaso en el Estado Nueva Esparta pues los períodos de lluvia son cortos y las precipitaciones escasas. No existen ríos propiamente dichos sino cursos de agua que se forman durante las épocas de lluvia y permanecen secos durante casi todo el año. El estado depende del suministro de agua de tierra firme, el cual se efectúa mediante un acueducto submarino. (Ver Figura 3.3)

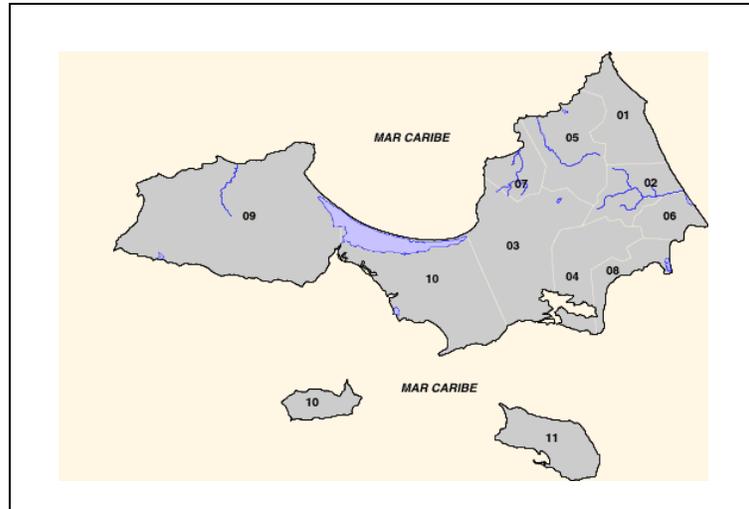


Figura 3.3 Recurso hídrico Fuente: <http://www.venezuelatuya.com>

3.1.3.6 Actividad Económica

La principal actividad económica tanto de Nueva Esparta como de las demás islas, es sin lugar a dudas el turismo, que se ha desarrollado enormemente gracias a la belleza inigualable de sus playas. Es un lugar que tiene mucho que ofrecer cuanto a paisajes, playas, deportes acuáticos (ver *Fotografía 3.1*), facilidades, con una cantidad considerable de hoteles, varios con 5 estrellas. Además, allí existe un fuerte desarrollo industrial y comercial, que han permitido el crecimiento de los sectores de transporte y construcción. Se practica la pesca en gran medida y la agricultura. También en una minoría la explotación.



Fotografía 3.1. El Turismo, principal actividad comercial. Fuente : PROPIA

3.1.3.7 Ubicación local

El Yaque está ubicado al sureste de la Isla de Margarita a 3 Km del Aeropuerto Internacional Santiago Mariño, como se puede observa en la *Figura 3.4*, entre las coordenadas geográficas:

10° 53' 41" N, 63° 58' 22" W; 10° 54' 11" N, 63° 57' 24" W;
10° 54' 11" N, 63° 58' 22" W; 10° 53' 41" N, 63° 57' 24" W

Ocupando una extensión aproximada de 2.000 m. Esta playa de poco oleaje, escasa profundidad y gran cantidad de viento, es el paraíso de todo windsurfista; tanto así, que es catalogada por los expertos como una de las tres mejores del mundo para practicar este deporte. Cuenta con Hoteles, restaurantes y servicio de alquiler de toldos y sillas por ser un sitio de alta afluencia turística por parte de nacionales y especialmente extranjeros.

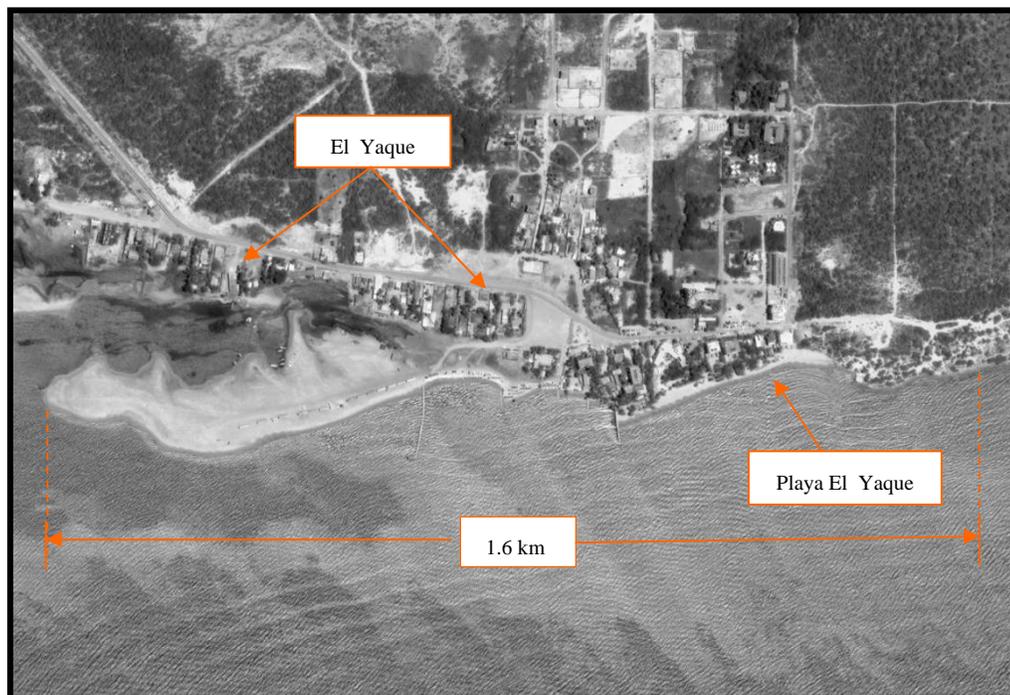


Figura 3.4. Ubicación de la zona de estudio. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

3.1.3.8 Descripción de la zona de estudio

Esta parte de la costa se extiende a lo largo aproximadamente 1.6 km y es relativamente irregular, es decir, existen cambios bruscos en los contornos con áreas de sedimentos con componentes de areniscas calcáreas, cuarcita y pirita como secuencia de sedimentos marinos fosilíferos y una zona rocosa denominada El Morro donde se puede observar adicionalmente componentes arcillosos.

La formación rocosa de la zona de estudio tiene un área aproximada de 16.250 m² y yace bajo una duna con partículas de grano fino y cubierta con una gran cantidad de vegetación de tipo desértico como cactus y tunas como se observa en la *Fotografía 3.2*.



Fotografía 3.2. Formación El Morro (El Yaque).

Fuente: PROPIA

La estratificación rocosa en la zona está representada por superposición de capas de material arcilloso básicamente.



Fotografía 3.3. Estratificación rocosa de El Morro (parte baja)
Fuente: PROPIA



Fotografía 3.4. Formación rocosa de El Morro (El Yaque)
Fuente: PROPIA

El tipo de roca predominante es una caliza súper-fosilífera de la formación Tortuga la cual por su clasificación es de fácil disgregación y se disuelve y meteoriza con el agua como agente principal, ya que su componente básico es carbonato de calcio. (Ver Fotografía 3.3 y 3.4).

El viento también juega un papel en la meteorización pero no es el factor más importante debido a que este tipo de material posee cierta dureza que es solo vencido por la humedad.

En cuanto al otro tipo de roca observada en la estructura rocosa del Morro es la Arenisca Calcárea con grandes contenidos de Calcio provenientes de grandes cantidades de fósiles, composición granulométrica más fina que Caliza y de menos nivel de dureza. Al igual soluble con el agua cuando son expuestas directamente y la humedad la afecta regularmente en su meteorización. (Ver Fotografía 3.5).



Fotografía 3.5. Tipos de rocas. M- 70 Arenisca calcárea y M-71 Caliza. Fuente: PROPIA

En cuanto a la costa, existen formaciones aluvionales en forma de barras de arena cercanas a las zonas como El Morro y la boca de la laguna Las Marites hacia el Este de la playa, adicionalmente un fondo regular con formación de plantas superiores o fanerógamas, la thalassia, constituye los pastos marinos o ceibadales. La distribución de estas fanerógamas marinas se encuentra en los fondos arenosos de poca profundidad y aguas claras, en este caso ubicadas aproximadamente a 450 m desde la línea de costa frente

a los hoteles y cercanos a la orilla hacia la zona donde se presenta una lengüeta de arena, del lado Oeste de la playa.

Este tipo de vegetación, *Thalassia testudinum*, es una de las especies más importantes de los pastos marinos a lo largo de las costas del Caribe, Las praderas de *Thalassia* son importantes como áreas de desarrollo de etapas juveniles de peces e invertebrados y zonas de protección para otros animales marinos, la abundancia y diversidad de organismos marinos en bancos de *Thalassia* y zonas contiguas revela la importancia de los pastos marinos como subambientes en lagunas costeras y áreas costeras abiertas.

Normalmente podemos encontrar esta hierba a una profundidad de 10 metros, sin embargo podemos observar praderas de esta planta a mayores profundidades, cuando existe gran transparencia en el agua y a temperatura no menor de 20 grados centígrado. En el Yaque durante la inspección de campo se observaron bancos a 2 metros de profundidad y muy dispersos en toda la zona, aunque en la lengüeta de arena ubicada al Oeste de la playa se encontraron muy cercanos a la orilla.

Una de las características físicas resaltantes de esta planta son las hojas, la cuales son larga y aplastadas, con un promedio de diez (10) milímetros de ancho y 25 centímetros de largo. Sus tallos alargados de crecimiento horizontal con raíces indican la capacidad de este tipo de vegetación de aferrarse al suelo marino. (Ver Fotografía 3.6)



Fotografía 3.6. Medición de la Thalassia.
Fuente: <http://www.botany.hawaii.edu>

Según estudios oceanográficos las Praderas de thalassia tienen una función muy importante en cuanto a la sedimentación, ya que incrementan la acumulación de partículas orgánicas e inorgánicas y ayudan a estabilizar la superficie de los sedimentos previniendo la erosión. (Ver Fotografía 3.7).



Fotografía 3.7. Foto Submarina. Pradera de Thalassia cercana a la orilla de la lengüeta de arena - El Yaque .Fuente PROPIA

La acción del oleaje y corrientes marinas tienen un efecto en el desarrollo de estas plantas. Las planta no se desarrollan en costas con fuerte oleaje. La acción mecánica del oleaje y el continuo movimiento de los sedimentos, no permiten que puedan desarrollarse.

Hacia el Este de la playa, sobrepasando el Morro, la laguna Las Marites en su boca activa denominada Boca Victoria, se observa una pluma de sedimentos que se mueva a través del canal hacia el lado Oeste de la playa

En la parte oriental de la playa, hacia la población de La Isleta, existe la convergencia de la segunda boca con esta zona. Este canal es denominado Boca Nueva, la cual presenta la particularidad de tener un área aluvional bien extensa que la hace poco activa como canal de comunicación.

En la laguna de Las Marites se presenta un variado ecosistema marino donde prevalece el manglar y la thalassia como vegetación predominante y una variada especie animal como crustáceos, estrellas marinas, erizos, etc. (*Ver Fotografía 3.8*).



Fotografía 3.8. Foto Submarina. Ecosistema marino de la Laguna de Las Marites. Fuente: PROPIA

Hacia la costa de playa El Yaque, existen islas cercanas (Coche y Cubagua) las cuales pudieran en este caso no perturbar el oleaje incidente por su suficiente lejanía con respecto a la zona y no se tomaría en cuenta para este estudio.

A continuación se realizará una descripción de las variables o parámetros recopilados, evaluados y medidos.

3.2 MEDICIÓN DE LA LINEA DE COSTA

Un factor importante para el estudio morfológico es la medición del contorno de la costa, el cual permite dar una idea gráfica de como es la forma de la costa para ese momento.

Para ello se utilizó un equipo GPS de un canal, marca Garmin, modelo 60CS el cual permite obtener una cantidad considerable de puntos (aproximadamente 1000 puntos) en forma de captura manual (*Way point*) y 10.0000 puntos en forma automática a través de recorridos numerados (*tracking number*). El equipo trabaja con doce (12) satélites simultáneamente, la precisión del equipo está en el orden de 3 a 10 m. Sin embargo, en la costa por la condición de estar en una zona despejada, sin interferencia de edificaciones, árboles, tendidos eléctricos que produzcan alguna sombra en la recepción de la señal de los satélites, se logró obtener una mayor precisión cuyo error mínimo medido fue de 3 m y el máximo de 7 m.

Se consideró hacer recorridos diarios, lo que permitía obtener una aproximación real a través de una línea que representara la línea de costa promedio de los recorridos.

El punto de inicio estaba localizado en la zona Este de la playa justo en la base del morro y el final se encontraba en la lengüeta ubicada hacia el Oeste. El recorrido se realizó a lo largo de la línea costera, bordeando las estructuras existentes, así como la totalidad de la lengüeta de arena. (Ver *Figura 3.5*).



Figura 3.5. Punto inicial y final del recorrido de la línea costera medido con GPS. Fuente: PROPIA

Por otro lado, se procesó la información a través del uso del computador para adecuarlos a un ambiente gráfico de manera de hacer las

comparaciones con otras líneas medidas en años anteriores y determinar cómo ha variado la forma de la costa a través del tiempo. (Ver Figura 3.6).

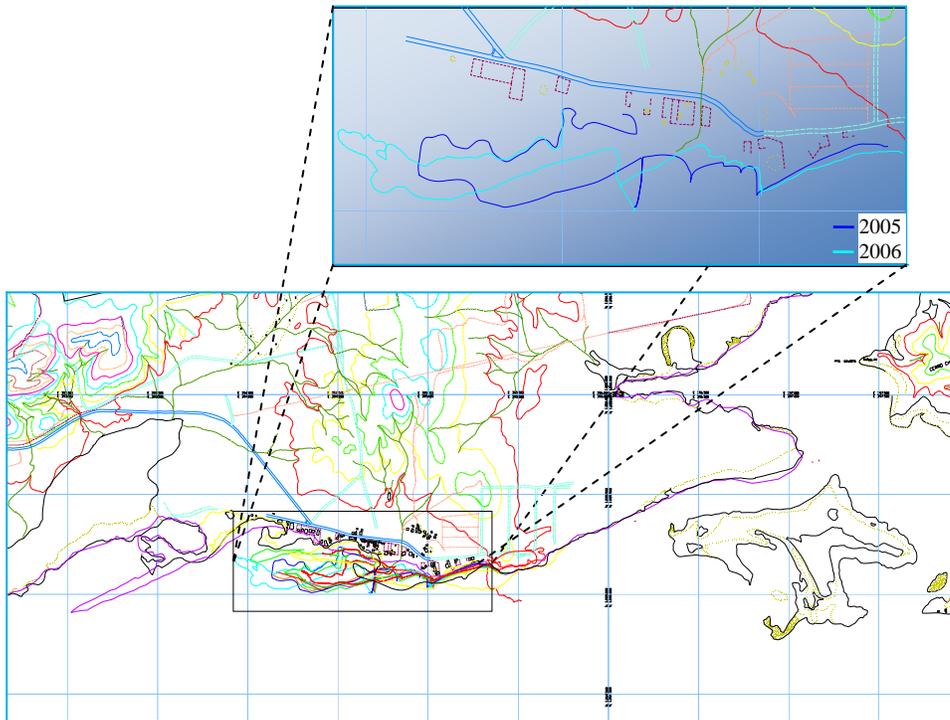


Figura 3.6. Diferentes líneas de costas medidas

Si consideramos algunos puntos comunes Figura 3.7 como los establecidos en la siguiente tabla es posible determinar diferencias entre las líneas medidas:

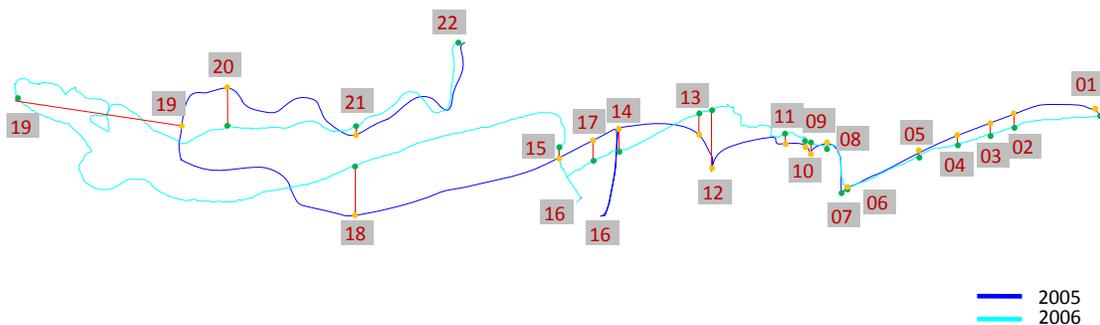


Figura 3.7. Puntos comunes del recorrido de la línea costera medido con GPS.

Tabla 3.1. Coordenadas de algunos Puntos Comunes y sus diferencias en distancias del recorrido de las líneas costeras medidas con GPS.

Fecha: 01.07.05			Ptos	Fecha: 27.12.06		
Hora mediciones 10am-12am	Este	Norte		Hora mediciones 2 pm-4 pm	Este	Norte
PUNTOS DE REFERENCIAS				PUNTOS DE REFERENCIAS		
Playa/Base del morro (inicio)	395.328	1.205.148	1	Playa/Base del morro (inicio)	395.328	1.205.137
Rancho de Mario	395.220	1.205.141	2	Rancho de Mario	395.220	1.205.124
El Yaque Paradise	395.189	1.205.129	3	El Yaque Paradise	395.189	1.205.115
Jump'n Jibe	395.146	1.205.113	4	Jump'n Jibe	395.146	1.205.101
Oasis	395.096	1.205.091	5	Oasis	395.096	1.205.087
Muelle-Espigón, playa recuperada	395.001	1.205.043	6	Muelle-Espigón, playa recuperada	395.001	1.205.046
Muelle-Espigón, en la punta hacia mar	394.995	1.205.035	7	Muelle-Espigón, en la punta hacia mar	394.995	1.205.035
Muelle-Espigón, detrás (erosión)	394.988	1.205.095	8	Muelle-Espigón, detrás (erosión)	394.988	1.205.095
Mini espigón de sacos de arena (Frente The Winds)	394.953	1.205.087	9	Mini espigón de sacos de arena (Frente The Winds) (inexistente)	394.953	1.205.102
Mini espigón de sacos de arena, detrás (erosión)	394.949	1.205.099	10	Mini espigón de sacos de arena, detrás (erosión)	394.949	1.205.104
Frente Rancho de María	394.919	1.205.102	11	Frente Rancho de María	394.919	1.205.113
Punta Obra 2 (Dañada)/mini espigón	394.826	1.205.146	12	Playa. Obra 2 (inexistente), erosión	394.835	1.205.148
Base Obra 2, erosión	394.810	1.205.113	13	Playa. (erosión)	394.810	1.205.141
Muelle Turístico. Obra 1 (inexistente), inicio muelle	394.705	1.205.120	14	Playa. (acreción),Obra 1 (inexistente)	394.705	1.205.094
Playa, parte Oeste del Muelle Turístico	394.629	1.205.085	15	Muelle Turístico Nuevo, inicio muelle	394.629	1.205.100
Muelle Turístico, último punto hacia el mar	394.688	1.205.009	16	Muelle Turístico Nuevo, último punto hacia el mar	394.656	1.205.031
Playa. Punto # 1	394.672	1.205.107	17	Playa. Punto # 1	394.672	1.205.080
Playa. Punto # 2	394.362	1.205.009	18	Playa. Punto # 2	394.362	1.205.074
Playa. Punto # 3	394.135	1.205.113	19	Playa. Punto # 3	394.920	1.205.173
Playa. Punto # 4	394.197	1.205.174	20	Playa. Punto # 4	393.197	1.205.125
Playa. Punto # 5	394.364	1.205.114	21	Playa. Punto # 5	394.634	1.205.125
Playa. Zona Oeste (final)	394.654	1.205.222	22	Playa. Zona Oeste (final)	394.496	1.205.232

Medidas de la extensión y retroceso por Acreción y Erosión entre las dos líneas de costas medidas (Línea Base 2005):

Pto. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
(m) 0 17 14 11 4 3 0 -3 -16 -4 -12 -79 -28 29 27 -15 -39 -65 223 -50 12 0

3.3. BATIMETRÍA

3.3.1- Procedimiento para el Estudio Batimétrico de la zona Erosionada en Playa El Yaque

En cuanto a estudio batimétrico realizado en la zona podemos determinar primeramente la ubicación.

Las mediciones se realizaron en un área aproximada de 7 km² cuyas coordenadas de ubicación geográficas proyección UTM y están basados en el Datum La Canoa y se refieren a los puntos 394663; 1205102 - 395898; 1204070 y 395898; 1204070 - 395432; 1204108. Se tomó esta ubicación debido a que era la zona con mayor afectación, por supuesto, tratando de obtener una visión general de la topografía del lecho marino. (Ver Figura 3.8).

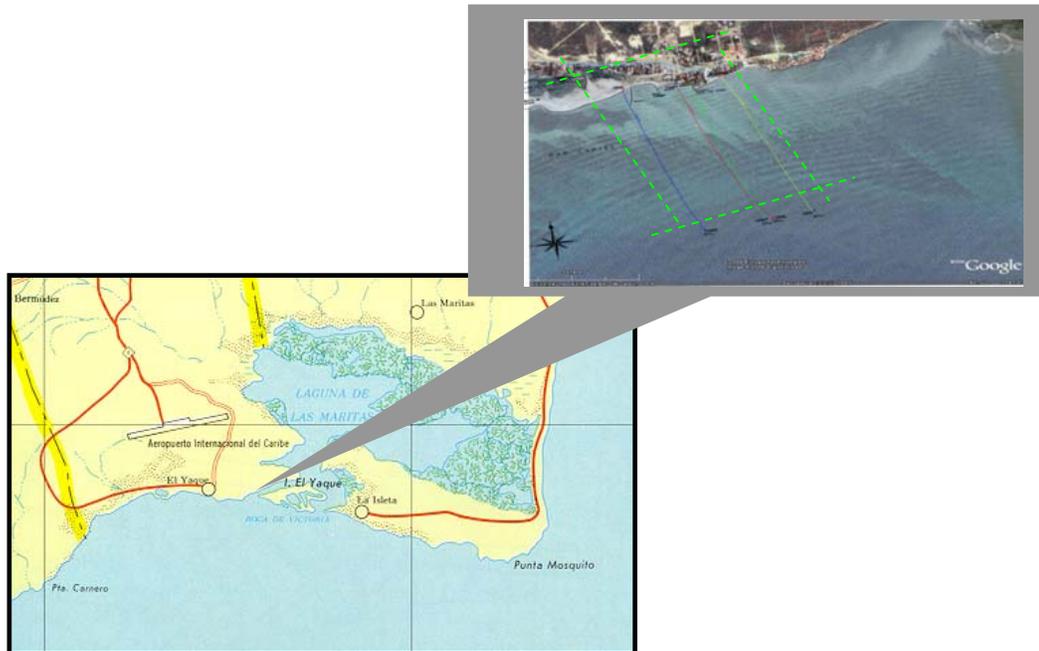


Figura 3.8. Área de medición Batimétrica.
Fuente: PROPIA

Se realizaron cuatro (4) tomas la cuales fueron organizadas según una cuadrícula previamente realizada en plano y donde prevalecían puntos de mayor relevancia como el espigón de madera frente al hotel The Winds, el muelle de embarque y frente a la zona donde se presenta el fenómeno erosivo en mayor proporción y donde se encuentra la mayor densificación estructural en la zona de estudio.

3.3.1.1-Materiales, Instrumentación y Equipos

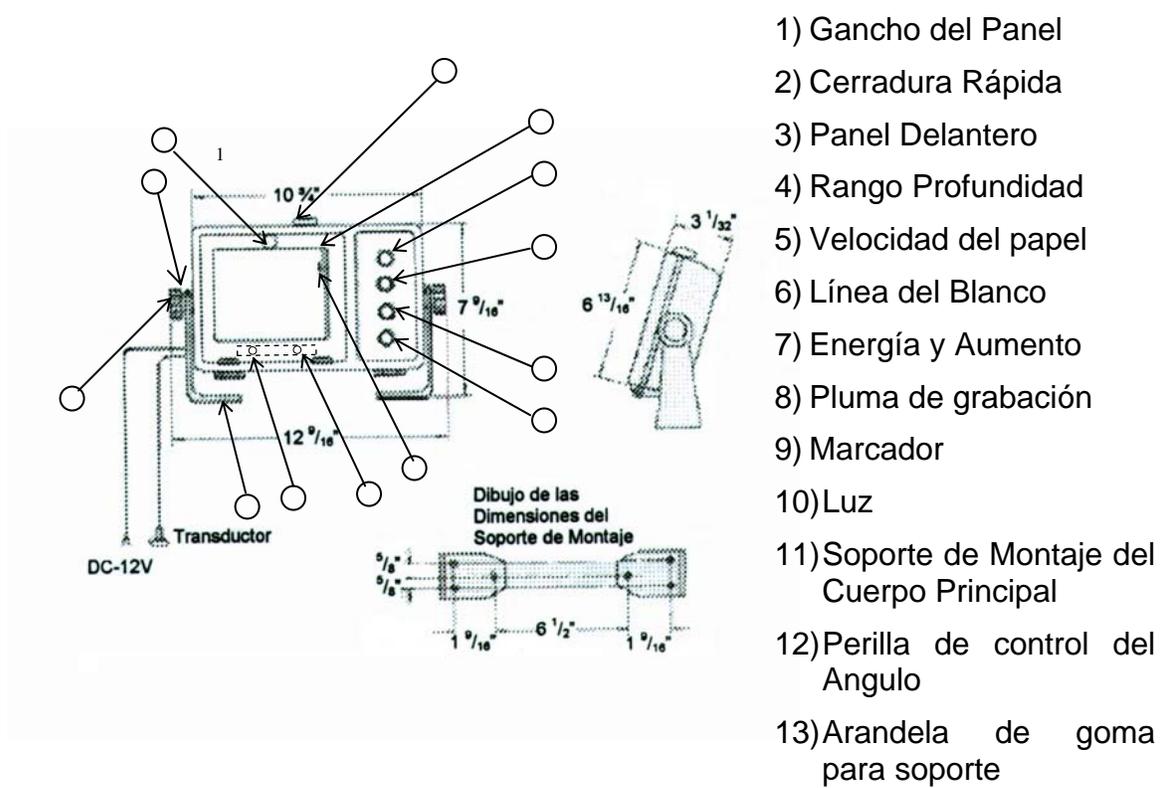
Para el desarrollo de la actividad ejecutada en campo ha sido necesaria la utilización de equipos, instrumentos y materiales los cuales se enumeran y describen a continuación:

A. ECOSONDA DE LINEA RECTA

Componentes Estándares del Ecosonda Southern Marine Research (SMR) mod.ST-440A

- Transductor sellado con cable de 30 pies (9,144 metros)
- Cable de alimentación de 6 pies (1,82 metros) con fusible en línea de 2 A
- Montaje de soporte del Cuerpo Principal.
- Perilla para el cuerpo principal
- Arandelas
- Papel de grabación en cilindro (100 mm x 10 x 10,5 cm de diámetro)

Descripción de las funciones del Equipo



- 1) Gancho del Panel
- 2) Cerradura Rápida
- 3) Panel Delantero
- 4) Rango Profundidad
- 5) Velocidad del papel
- 6) Línea del Blanco
- 7) Energía y Aumento
- 8) Pluma de grabación
- 9) Marcador
- 10) Luz
- 11) Soporte de Montaje del Cuerpo Principal
- 12) Perilla de control del Angulo
- 13) Arandela de goma para soporte

Figura 3.9. Panel de Funciones del Ecosonda
Fuente: Southern Marine Research (SMR) mod.ST-440A

Tabla 3.2. Equipos utilizados para la medición Batimétrica

Modelo		ST 440-A		
Profundidad		Bajo	Medio	Profund o
Rango de Profundidad	1	0–6 pies 0-18,3 m	0–120 pies 0-36,6 m	0–240 pies 0-73,1 m
	2	50–110 pies 15,2-3,5 m	100–220 pies 30,5-67,1 m	200–440 pies 60,9-134,1 m
Tiempo de generación de Pulsos (s)		11,4	5,7	2,85
Frecuencia		A= 200Khz		
Transmisión de Salida		500 Vatios (p-p)		
Angulo de señal		200 KHz 14 grados		
Velocidad de Papel		De 5 a 30 mm por minuto continuamente variable		
Tipo de grabación		Tipo recto		
Fuente de Voltaje		DC 13,6 V (Voltaje permisible 10,5 – 14 V)		
Dimensiones		10 ¾" (W) x6 -3/16" (h) 3-1/32" (d) 27,31 cm (ancho) x 15,72 cm (alto) x 7,7 cm (espesor)		
Peso		6 lbs (3 Kg)		

B. GPS Marca: GARMIN 60 CS

C. Brújula Acimutal

D. Calibrador de 15 m con peso en extremo

E. Planos de la zona

F. Equipo de Navegación: Lancha peñero y motor 40HP

H. Cinta Métrica

I. Computador, hoja de cálculo electrónica y un sistema de dibujo

Una vez revisado el plano y con la asistencia de las cartas marinas digitalizadas se establece hacer cuatro (4) perfiles transversales a la costa, para esto se ubican dos puntos con anterioridad, los cuales representan el punto de inicio y el otro el punto final de cada perfil, siendo los restantes vértices donde cambia la dirección de cada perfil. Ver **ANEXO (1) PLANO 8**.

A cada uno de esos puntos se les determinan gráficamente las coordenadas (Norte, este) en dicho plano, como se observa en la Tabla 3.3 para luego ser introducidas a la base de datos del GPS.

Tabla 3.3. Coordenadas de los Perfiles Batimétricos

PERFILES TRANSVERSALES	COORDENADAS INICIALES	
	Norte	Este
PERFIL 1	1.205.102	394.971
PERFIL 2	1.204.098	394.230
PERFIL 3	1.205.102	394.663
PERFIL 4	1.205.111	395.139

PERFILES TRANSVERSALES	COORDENADAS FINALES	
	Norte	Este
PERFIL 1	1.204.096	395.200
PERFIL 2	1.205.102	394.919
PERFIL 3	1.204.070	395.898
PERFIL 4	1.204.108	395.432

3.3.2.2 Ubicación en campo de los puntos seleccionados

Conociendo puntos específicos cuya ubicación estaban marcadas por una zona donde la localización y batimetría estaban determinadas en las cartas marinas, se pudo verificar que el error en cálculos no insidia significativamente con los valores obtenidos en sitio.

Se procede a realizar las batimetrías, siguiendo las direcciones que los puntos iniciales y finales determinaban.

3.3.2.3 Registro Batimétrico

En esa sección de trabajo se utiliza como instrumento de medición el ecosonda anteriormente descrito (*ver Fotografía 3.9*), la brújula y el GPS.



Fotografía 3.9. Ecosonda ST 440-A y Cables. Fuente: PROPIA

Para el manejo se fijó el transductor del ecosonda a la quilla del bote en su parte inferior central, a un tercio (1/3) de la popa. Se usó una retención a través de un sistema de guayas de manera que este quedara con suficiente rigidez adosado al bote y que la superficie emisora de la señal quedara lo

más paralelo al lecho marino y en la parte del bote que está constantemente sumergida, para así evitar que el sensor salga del agua por motivos de saltos debidos al oleaje al igual lo suficientemente alejado de la propela del motor de manera que se evita cualquier error generado por efecto de la turbulencia, esto se presenta esquemáticamente en la *Figura 3.11*.

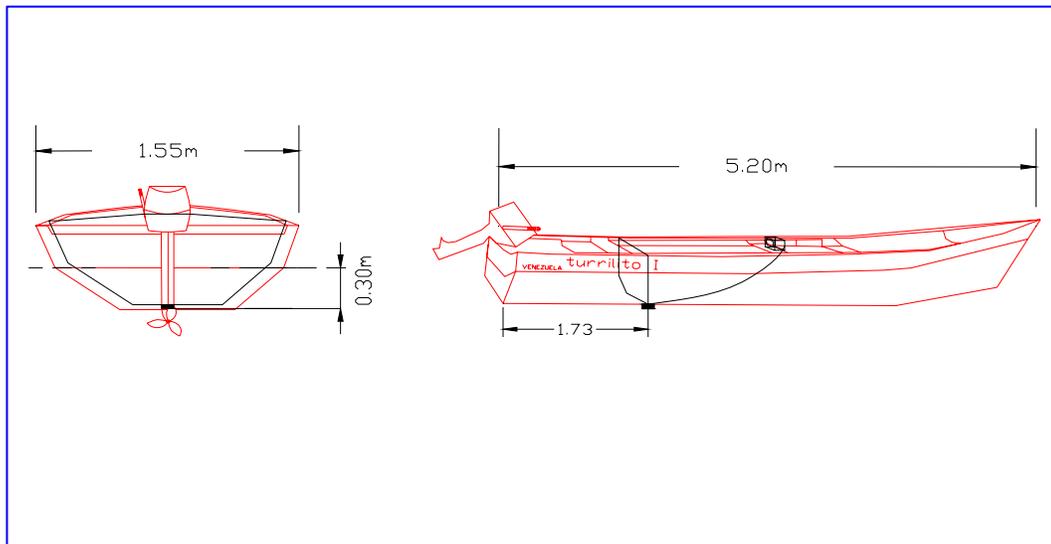


Figura 3.11. Medidas de la embarcación. Fuente: PROPIA

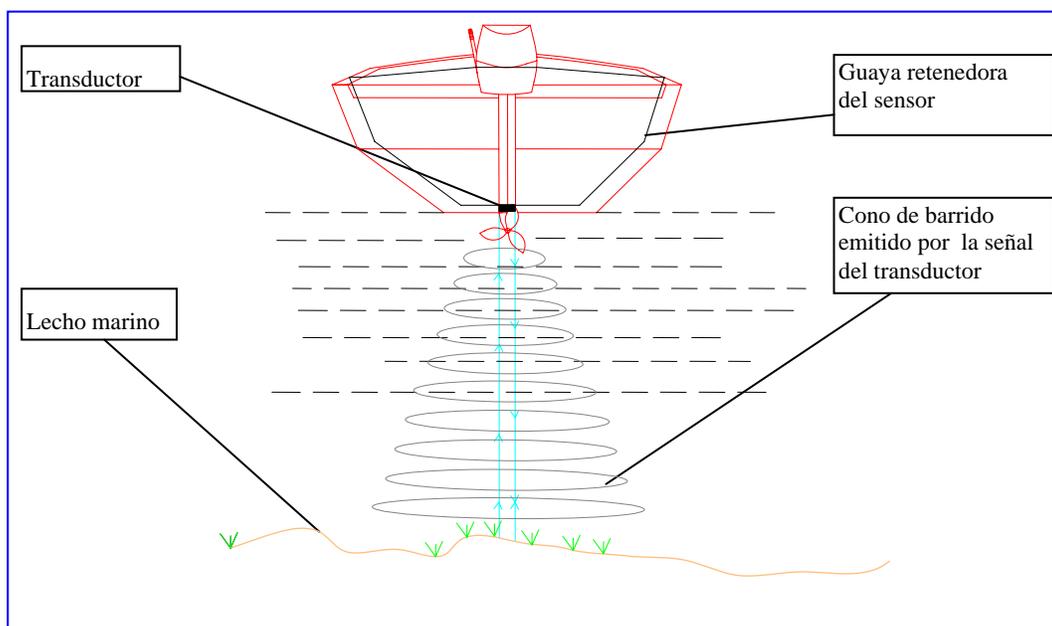


Figura 3.12. Esquema de la emisión de la onda del emisor. Fuente PROPIA

Se enciende el ecosonda y se selecciona el rango de profundidad en aguas con poca profundidad (S) debido a que la zona a medir estaba por debajo de los dieciocho (18) metros de profundidad, adicionalmente se selecciona la velocidad del papel y la ganancia adecuada para obtener mayor precisión en la información recibida en el transductor del ecosonda.

Se consideró colocar el nivel de blanco en un valor intermedio de manera que se pudiera diferenciar las diferentes señales recibidas, como el fondo del lecho marino y si existe un doble fondo debido a un material de mayor dureza se refleja en una segunda señal; así se podría identificar con claridad el fondo verdadero. Hay que considerar que este ecosonda es de doble frecuencia 50 kHz – 200 kHz, el cual permite medir en un rango mayor de barrido, eso implica que el ángulo con respecto a la vertical de la proyección del cono a 50 kHz es de aproximadamente 43° lo que permite más barrido (aproximadamente 6 metros de diámetro a 9 m de profundidad), pero se limita en la profundidad de detección; cuando a 200 kHz es un cono menor de barrido pero puede detectar a mayor profundidad. En este caso se trabajo con la doble frecuencia que permitía alternar entre ambos sistemas para tener mayor precisión en la información registrada. (Ver Figura 3.13).

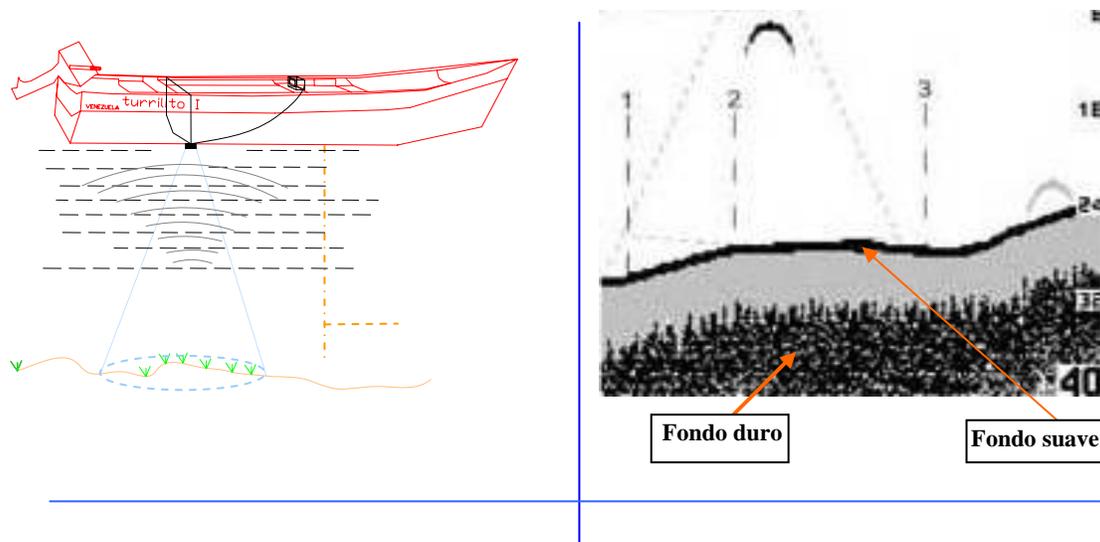


Figura 3.13. Reflexión de la señal e Imagen gráfica del Ecosonda. Fuente: PROPIA

Se ubicó el punto determinado en plano para el comienzo del perfil y utilizando una velocidad constante de 8 nudos por hora (14,82 km/h) se procedió a hacer el recorrido desde punto inicial hasta punto final de cada perfil.

Luego se considero llegar a una distancia aproximada de un (1) kilómetro aguas afuera de la costa, tratando de obtener un mayor detalle en trazo del perfil y aunado a esto es la parte de la zona la cual es considerado como aguas profundas, donde el fondo no tiene influencia sobre el oleaje.

En el papel térmico del ecosonda se reproducen marcas que identifican los puntos grabados e identificados con el GPS cada 20 segundos aproximadamente, con el fin de determinar las distancias que existen entre ellas. Todo este proceso se realiza para los cuatro (4) perfiles medidos.

3.3.2.4 Verificación en campo de los registros obtenidos por el Ecosonda

Obtenidos los datos de registro del ecosonda e identificados para cada perfil, se verifica la exactitud de las mediciones mediante el uso de un calibrador manual. Para ello se ubicaron algunos puntos cuyas coordenadas y profundidades son conocidos para el cual se procede a lanzar la pesa junto con una cuerda marcada para medir la profundidad, luego fue medida la longitud mojada con una cinta métrica determinando la profundidad en ese punto.

En la toma de medidas no fue necesario hacer corrección por inclinación del sensor debido a que su colocación en la embarcación fue centrada y ajustada previamente, de manera que el equipo no recibiera señales errada por esta situación.

A continuación en la *Figura 3.14* se presentan los perfiles obtenidos después del proceso de medición:

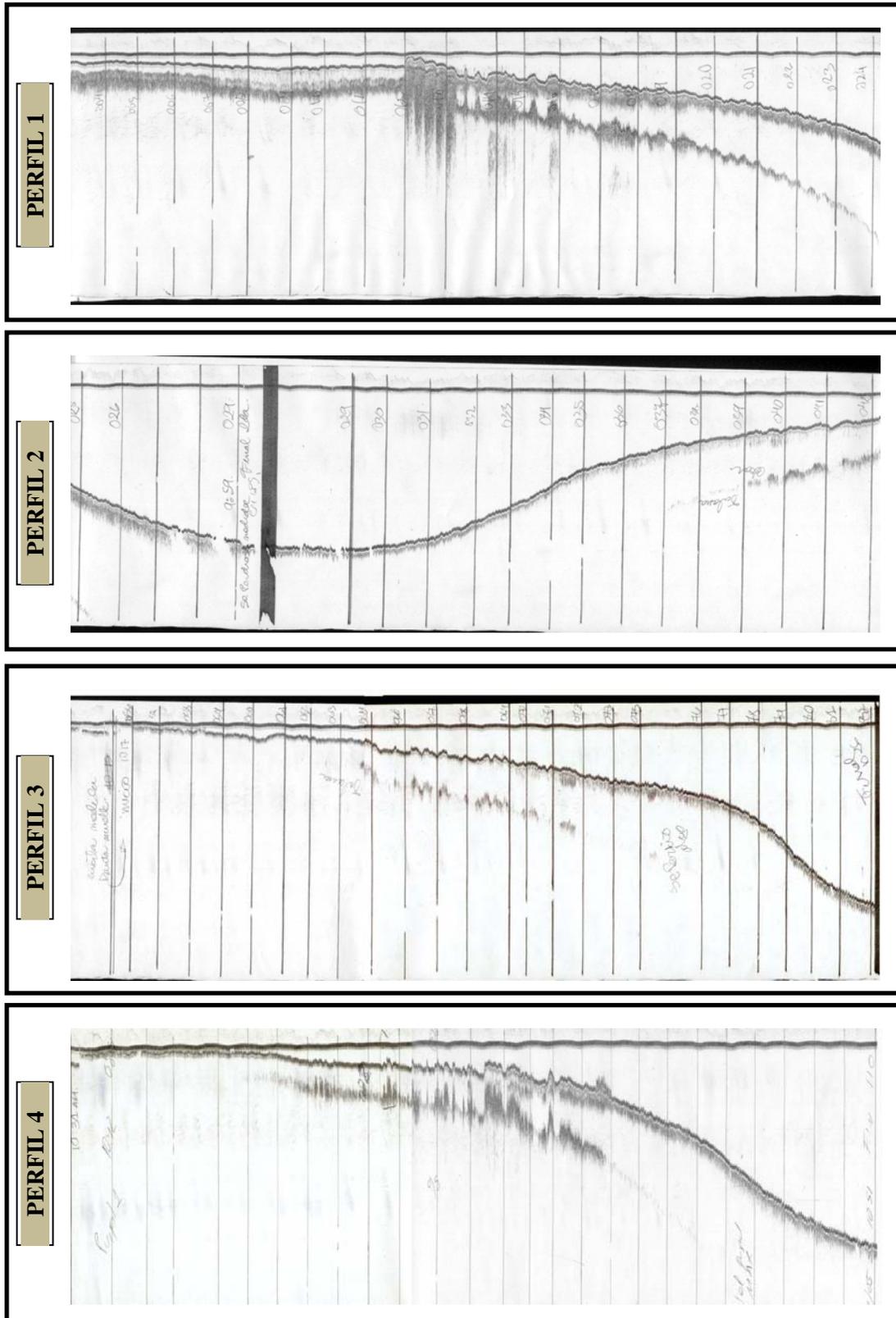


Figura 3.14. Perfiles batimétricos registrados por el ecosonda. Fuente PROPIA

3.3.2.5 Procesamiento de los registros obtenidos por el ecosonda

Obtenida la información de campo, se ha procedido al procesamiento digital donde se llevan los registros de ecosonda utilizando un sistema de dibujo asistido por computador (CAD) donde se transforman las unidades originales que están en pies a metros para trabajar con mayor comodidad.

En la *Figura 3.15* se refleja lo registrado por el ecosonda antes de ser procesado digitalmente para recabar la información.

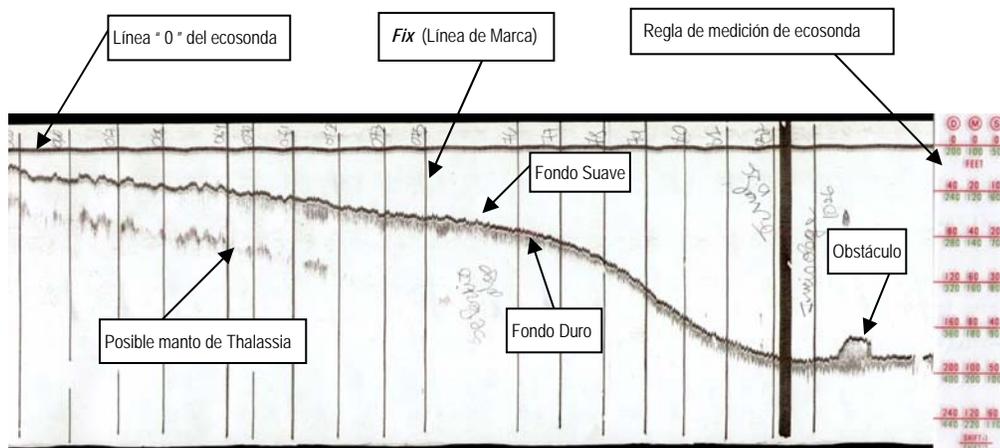


Figura 3.15. Detalle de la información del registro batimétrico

Para obtener el valor de la escala vertical se colocó el registro del perfil en un software de dibujo asistido por computador de manera de obtener el factor de la escala en metros en función de la escala representativa indicada por la regla del ecosonda.

Este factor se obtiene por el cociente de la distancia vertical real en metros registrada por el ecosonda más la distancia de colocación del transductor hasta la superficie del agua (línea de flotación) medida previamente en el bote, es decir, la distancia vertical real registrada por el ecosonda en m + 0.30 m de la distancia del transductor a la línea de flotación y la distancia medida en el programa de dibujo asistido por computador.

Mientras que para obtener el factor horizontal se divide la distancia real en coordenadas UTM Este y Norte, medida mediante el GPS, entre dos puntos consecutivos y la distancia medida en el programa de dibujo asistido por computador. La expresión matemática utilizado para medir la distancia horizontal real (Dhr) entre dos puntos consecutivos es la siguiente:

$$Dhr = \sqrt{(E - Eo)^2 - (N - No)^2} \quad \text{Dhr en m} \quad (\text{III.1})$$

Para completar los perfiles transversales se agregaron los extremos de los mismos y se considero la medida con cinta métrica de la distancia entre el primer punto cercano a la costa y el origen de la línea de costa previamente demarcado.

Considerando la incidencia de oleaje y marea de la zona sobre el movimiento del bote y el registro determinado por el transductor, podemos aceptar que el error es despreciable por efecto de inclinación ya que su localización en la parte posterior y central permite que este sea la zona más estable de la embarcación.

El sensor produce un error considerable solo cuando se expone a burbujeo constante por parte de la propela del motor y cuando pierde su horizontalidad respecto al fondo con un ángulo de inclinación mayor a 10°. (Ver Figura 3.16).

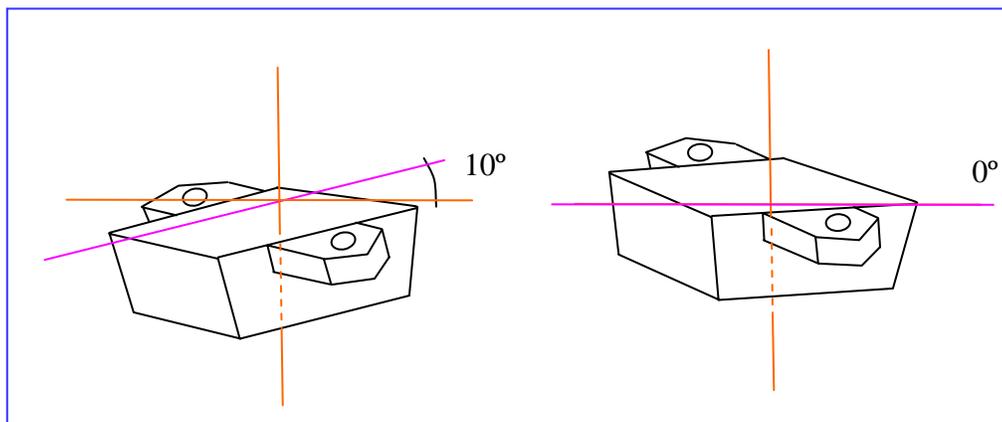


Figura 3.16. Ángulos máximos de inclinación del sensor del Ecosonda

El registro obtenido por el ecosonda se procesa a través de una hoja de cálculo electrónica, en la cual se introducen los datos de coordenadas Este y Norte en UTM así como los datos de Cotas de manera que se obtiene los valores de las distancias entre puntos consecutivos, la cota medida en pies y procesada matemáticamente para llevarla a metros, previamente considerando la corrección por distancia entre sensor y nivel del agua al igual como los valores de marea y olaje medidos para el momento de la toma de la muestra.

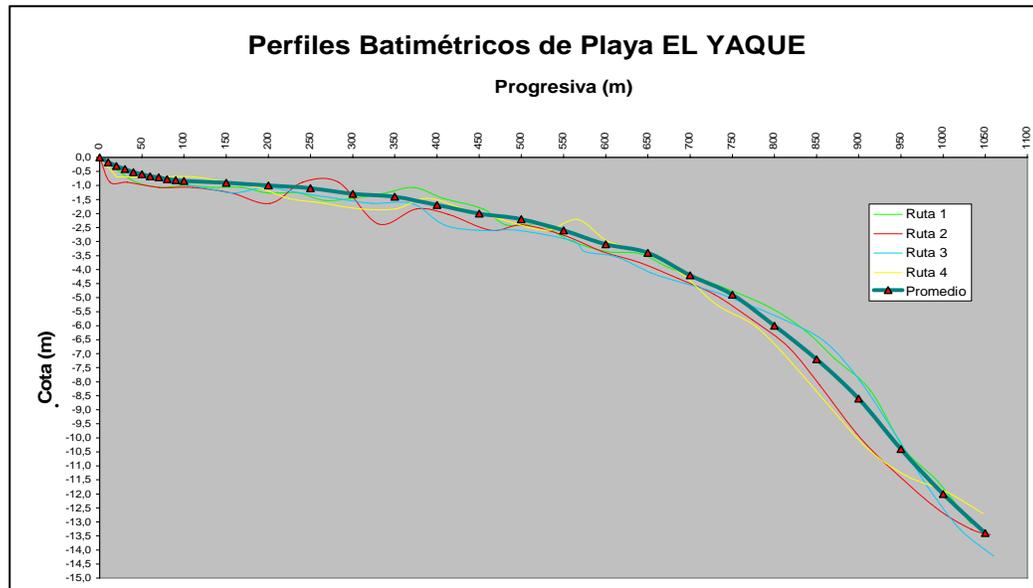
Procesada la información en la hoja de cálculo electrónica se grafican los perfiles en Distancia Horizontal vs Profundidad de cada uno como se presentan en los **ANEXOS (2) al (5)**.

Se considera también trazar un Perfil Transversal Promedio el cual está determinado por dos procesos matemáticos consecutivos. Estadísticamente, la recta de mejor ajuste polinómica de grado 6 para obtener mayor precisión usando la dispersión de puntos en función de las distancias calculadas y sus cotas corregidas correspondientes.

Uniendo la recta de mejor ajuste por dispersión se construye un perfil de 1050 m aproximadamente con intervalos de 50 en 50 y proyectando con una línea vertical cada uno de los valores de las distancias recorridas en la recta de mejor ajuste y en el punto donde corta la recta vertical con la recta de mejor ajuste se proyecta una horizontal que nos define un valor de profundidad específico. **Ver ANEXO (6)**.

El segundo proceso es la superposición de los gráficos de cada uno de la perfiles incluyendo el nuevo perfil hallado por el proceso matemático de dispersión en el cual permite ajustar gráficamente los valores promedios. **Ver ANEXO (7)**.

Una vez trazado cada uno de los perfiles y obtenido el perfil promedio usando una hoja de cálculo electrónica, se procesa éste para el cálculo de la derivación de oleaje. (Ver Gráfica 3.1).



Gráfica 3.1. Perfil Batimétrico Promedio

Al realizar las batimetrías se debe considerar contornos paralelos entre sí, y al comparar los resultados se observa similitud entre los contornos de distintas profundidades, permitiendo aplicar las ecuaciones correspondientes a la refracción.

3.4 CLIMA DE OLAJE

La utilización de los métodos estadísticos para la determinación de las direcciones predominantes del oleaje cotidiano y de diseño es fundamental para el estudio de la zona.

El clima de oleaje de la región de estudio se determina a través del procesamiento de los registros obtenidos por el estudio realizado por la

empresa Hidromet S.C. en el cual basa su información la observación de vuelos de la Fuerza Aérea Venezolana al igual que mapas de Sinópticos de U.S. Weather Bureau de los Estados Unidos los cuales contienen información meteorológica sobre Centro, Norte, Sur América, El Caribe, Atlántico, Europa y parte de África y comparado por los registros obtenidos por del Sistema de Observación Visual (V.O.S.) de Global Waves Statistics.

Con los registros procesados por la empresa Hidromet S.C. se determinó el tramo que corresponde a la zona de estudio, el cual ellos denominaron Tramo N°3, ubicada entre los 62° y 64° Longitud Oeste, la cual comprende la zona del norte del Estado Sucre desde el promontorio de Paria hasta la Punta Escorceo en la Península de Araya, en este tramo se incluye las Costas Oriental y Norte de Nueva Esparta. (Ver Figura 3.17).

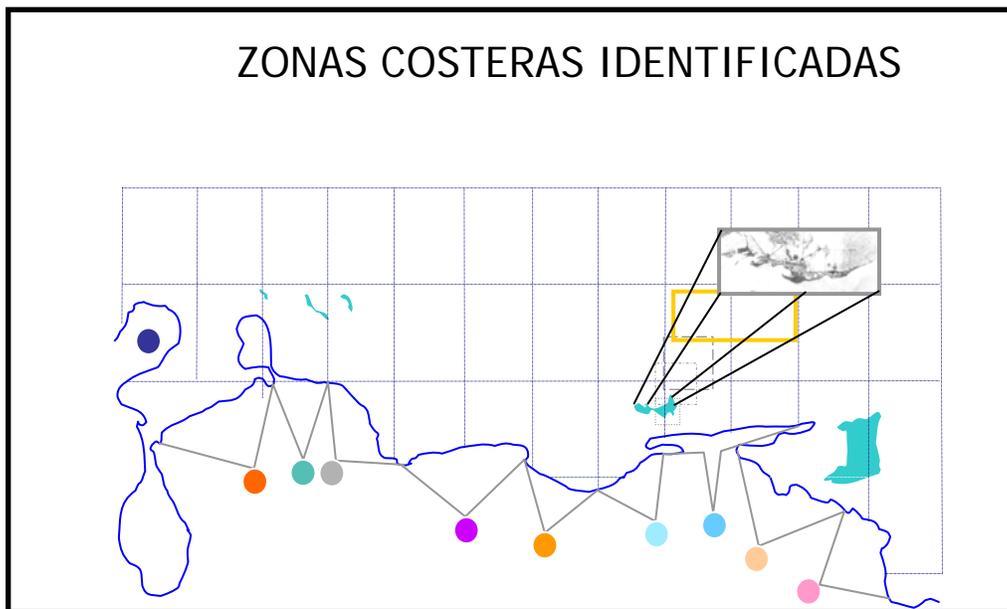


Figura 3.17. Tramos costeros identificados por HIDROMET.

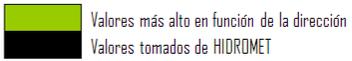
Fuente: Información suministrada por HIDROMET

El *fetch* ó zona de calma de vientos, donde se calcularon los valores reflejados en la *Tabla 3.4* del estudio para dicho tramo está ubicado a 180 millas náuticas (333 km) de la costa venezolana.

Utilizando una hoja de cálculo electrónica para colocar toda la información obtenida de la rosa de oleaje que represente el Tramo nº 3 y comparando con la información del V.O.S. podemos determinar las direcciones de oleaje predominante en la zona.

Tabla 3.4. Tabla de Clima de Oleaje - HIDROMET

Tramo	Dirección	Angulo °	% Ocurrencia según Altura					% Total	% Representativo
			0 - 0.30 m	0.30 - 0.90 m	0.90 - 1.50 m	1.50 - 2.10 m	2.10 - 2.70 m		
3	NNE	22.5	2.52	1.57	0.16	0.06	0.02	4.33	73.28
	ENE	67.5	22.01	43.4	3.42	0.06	0.06	68.95	
	ESE	112.5							
	SSE	157.5							
	SSW	202.5							
	WSW	247.5							



Las direcciones predominantes para la altura de oleaje de 0 a 1 m representada por la *Tabla 3.4* provienen del ENE. El Hidromet tiene la particularidad que no analiza la zona Sur de la isla pero nos ayuda a determinar el tamaño probable de oleaje que se presenta en ese lugar.

El estudio se desarrolló en función de la información indicada por el V.O.S. ya que fue la más representativa de toda la zona. En cuanto a las direcciones estudiadas se tomaron en cuenta las que comprendía la parte Sur Oeste hasta la parte Este de la costa, las cuales tienen la influencia directa del oleaje debido a los 10 ° de inclinación que presenta la costa respecto al Sur. En la *Figura 3.18* se muestra los ángulos de incidencia del oleaje.

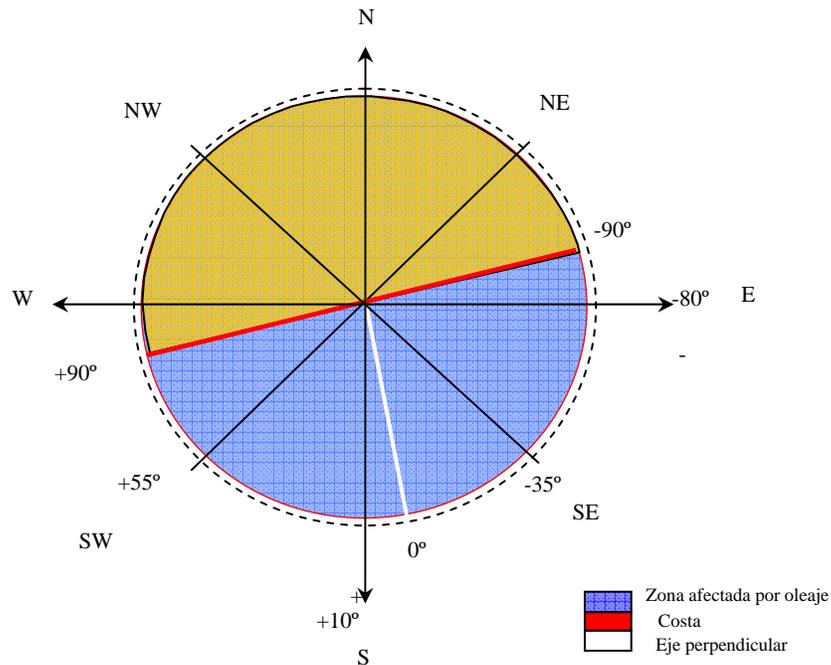


Figura 3.18. Ángulos de incidencia del oleaje. Fuente: PROPIA

El porcentaje de ocurrencia del oleaje a diferentes alturas y período que se presenta en el área de influencia basado en la información del V.O.S indica, que la zonas Este, Sureste, Sur, Suroeste son las más representativas con un total de 64,25% del tiempo, el valor restante 35,75% infiere que el oleaje proviene de otras direcciones o es un período de calma.

3.4.1 Análisis de Oleaje

Para la evaluación de los cambios y transformaciones en la forma de la costa, es fundamental el conocimiento del comportamiento del oleaje, el cual es necesario para predecir las consecuencias que se presentarían en zonas donde ocurren problemas de sedimentación y se acrecienta el proceso erosivo.

Uno de los factores más importantes a considerar, desde el punto de vista hidráulico y sedimentológico, es el oleaje, debido a que la costa es principalmente modificada por el efecto directo del mismo. Este parámetro también es primordial para el diseño y la evaluación de obras de ingeniería, es fundamental el conocimiento de las cargas a aplicar en las mismas; en el caso de la restitución de las costas utilizando estructuras costeras, las cargas están determinadas por el impacto del oleaje que puede ocurrir en una región determinada.

El oleaje se estudia desde dos enfoques distintos, el *Cotidiano* el cual persiste durante gran parte del año, producido por el viento; logrando modificar la forma de la costa de playa El Yaque de manera constante y el de *Diseño* que es aquel que se genera en condiciones extremas como las tormentas y el cual modifica la costa de manera transitoria.

La formación de olas es un proceso en el que participan el viento, la marea y las condiciones de batimetría que confluyen en una región, donde los patrones de ocurrencia no son constantes; por lo que se hace poco probable conocer las características exactas del oleaje bajo condiciones normales y prácticamente imposible en condiciones de tormentas.

El análisis de oleaje abarca el estudio estadístico del mismo, probabilidad de ocurrencia y excedencia del oleaje e involucra la transformación la cual implica la refracción y difracción del oleaje a medida que se acerca a la costa por el efecto que produce por la fricción con el lecho marino en aguas someras.

El análisis de oleaje comienza con los datos recolectados en campo, para esto se efectuaron diferentes mediciones con las cuales fue posible determinar el oleaje tipo predominante en la zona.

Se realizaron mediciones con los equipos en dos lugares específicos, un registro fue hacia costa afuera de manera que la información obtenida sea

lo menos afectada por el oleaje que se produce por el choque o fricción entre la onda y el fondo y el otro en aguas someras a una distancia prudencial de la línea de costa referencial. (Ver Figuras 3.19 y 3.20).

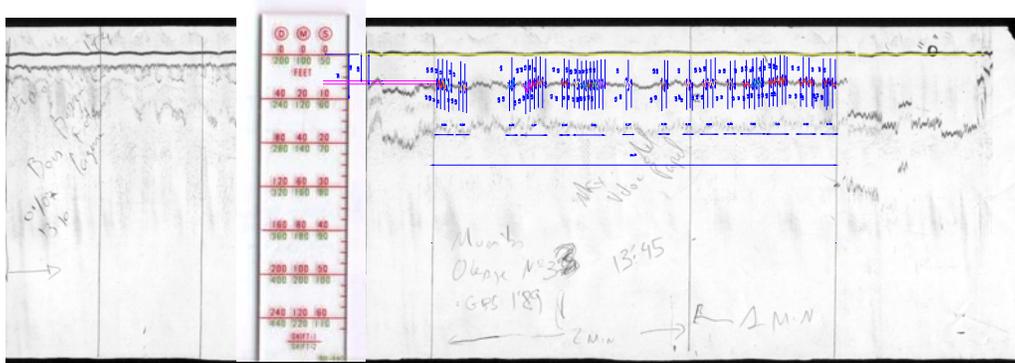


Figura 3.19. Muestra de oleaje en aguas en Intermedias. Fuente: PROPIA

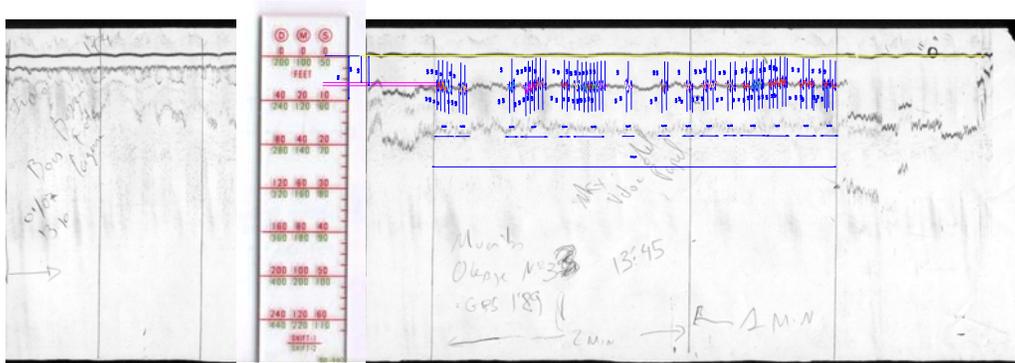


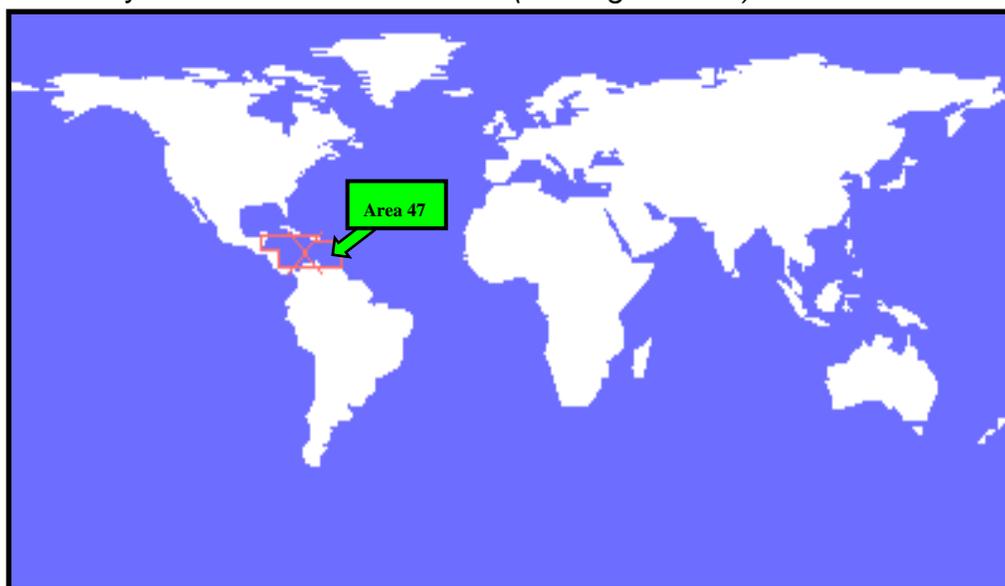
Figura 3.20. Muestra de oleaje en aguas Someras. Fuente: PROPIA

Se realizó el procesamiento digital de dicha información considerando la corrección por distancia del sensor transductor al nivel de flotación de la embarcación, y los datos obtenidos se presentan en la *Tabla 3.5*.

Tabla 3.5. Datos de Oleaje medidos

	Oleaje en Aguas intermedias	Oleaje en Aguas someras
Altura de Oleaje (m)	0,26	0,42
Período (s)	5	3
# observaciones	55	31
Distancia aproximada de medición desde la Costa	1 km	200 m

El oleaje calculado a través del *Global Wave Statistics Online*, una base de datos que publica información estadística en la Internet de altura y período de oleaje observado a lo largo del año, permite obtener información en intervalos de tiempo y direcciones específicas en el área 47 que comprende el Caribe y las costas de Venezuela. (Ver Figura 3.21).

**Figura 3.21.** Área de la zona de Estudio de Global Waves Statistics.

Fuente: <http://www.globalwavestatisticsonline.com/>

Respecto al oleaje observado comparado con el oleaje calculado a través de la semejanza en las alturas y períodos (V.O.S.) podemos indicar, que existe una diferencia entre estos valores y los valores observados en campo.

Esto es debido a las tablas estadísticas (*Wave Scatter Table*) las cuales están referidas a una cuadrícula que abarca una zona amplia considerando la costa norte de nuestro país, desde la Península de Araya al Golfo de Venezuela pasando por el Caribe, Centro América hasta la Isla de Cuba aproximadamente; y del cual los valores no son precisos, ya que son basados en observaciones voluntarias de embarcaciones de la marina mercante y reportados a *UK Meteorological Office*; no es medido por equipos especializados como sondas ó boyas para obtener una oleaje cuyo valor no sea el oleaje que ocurre en un momento dado, sin embargo son una referencia importante y se utilizan principalmente para el diseño de estructuras costeras.

El V.O.S. se utiliza para el análisis de morfología costera, tomando en consideración que la altura de la ola descrita en las tablas están relativamente sobreestimadas; a este respecto, cuando se utilizan las referidas tablas se recomienda, por experiencias previas de campo y análisis efectuados por el Prof. Savelli, utilizar el límite inferior de cada diferencia de clases del oleaje.

Tabla 3.6. Datos de Oleaje provenientes del *Global Wave Statistics Online*, área 47

Período: 3 ~ 6 segundos	Número de Olas predominantes por Dirección de Oleaje			
	Suroeste	Sur	Sureste	Este
Altura (m)				
8 a 9				
7 a 8				
6 a 7				2
5 a 6		2	2	9
4 a 5	4	6	9	32
3 a 4	16	25	42	113
2 a 3	76	91	167	299
1 a 2	328	329	446	413
0 a 1	581	550	333	132
Nº Observaciones totales	1005	1003	999	1000
Ocurrencia	0,99%	2,16%	9,71%	51,39%

En la *Tabla 3.6*, se presentan los datos de oleaje en el área 47 según *Global Wave Statistics*, donde se detallan la altura de las olas, la dirección del oleaje y el porcentaje del tiempo durante el año en que ocurre el oleaje en las direcciones indicadas.

El uso de la base de datos mundial de oleaje permite la aplicación directa de la información para un análisis estadístico más elaborado y debido a la gran cantidad de información disponible se puede considerar la muestra como significativa.

3.4.2 Derivación de Oleaje

El oleaje que se acerca a la costa difiere en gran manera al que se encuentra en mar abierto; ya que existen factores que influyen en su trayectoria hacia la costa y que modifican su característica principal.

Entre estos factores se encuentra la cercanía al fondo del mar, el cual causa efectos muy distintos; uno de los principales es el cambio en la esbeltez de la ola producida por la reducción en la longitud de la ola cuando la onda es frenada por el efecto de roce con el fondo y el otro importante es la refracción del oleaje, la cual produce el cambio del ángulo de incidencia de la ola respecto a la normal de la línea de costa.

A medida que las ondas se acercan a la costa, éstas empiezan a deformarse provocando el incremento de la altura y la disminución de la longitud, eventualmente, la ola llegará a romper o volcar cuando alcance una altura y un peso superior a la atracción entre sus partículas que la mantienen unida como un solo cuerpo.

Cuando se alcanza la zona de transición y la zona rompiente la teoría lineal ya no tiene alcance matemático y entra la teoría no lineal o Teoría de Stokes donde se aplica un factor de corrección a los valores obtenidos por teoría lineal debido a la relación oleaje con el fondo, en la zona de estudio se

debe considerar éste debida a la poca profundidad en la que se tomaron las mediciones.

Al acercarse a la costa, el oleaje cumple con los procesos de transformación y Refracción debido a la reducción significativa de profundidad del fondo del mar.

En el proceso de derivación de oleaje se obtienen ciertos valores notables como el coeficiente de Shoaling (Coeficiente de Transformación) que actúa sobre la condición directa en la esbeltez y celeridad del oleaje repercutiendo en los valores de altura de oleaje y como consecuencia en la zona rompiente, los cuales se ven registrados en el los **ANEXOS (11) al (26)**.

Esto hace indicar que la zona rompiente en cada dirección específica está determinada por la relación Altura del Oleaje – Profundidad al Lecho Marino y aplicada a la transformación de oleaje (refracción). Esta relación Hr/h debe ser mayor a 0,65 para que sea representativa como el inicio de la zona rompiente; la progresiva y profundidad para éste valor de relación altura de oleaje-profundidad del lecho marino, el ángulo de incidencia del oleaje hacia la costa y condición de éste permiten definir el comportamiento del oleaje en la zona.

El valor de Kr (coeficiente de refracción) nos permite determinar el grado del cambio de dirección cuando la onda pasa de un medio a otro medio, sea por diferencias de densidades de los medios acuosos o diferencias de profundidades. La *Tabla 3.7* es indicativa de los valores más predominantes según la direcciones y alturas de oleaje en aguas profundas de mayor incidencia sobre la costa de playa El Yaque.

Tabla 3.7. Resumen de resultados obtenidos en Zona Rompiente

Altura de oleaje en aguas profundas (Ho) (m)	En Zona Rompiente					
	Dirección	Progresiva (m)	Profundidad (m)	Ángulo de oleaje (°)	Altura de Oleaje (m)	Ocurrencia (%)
0,5	E	0+035	0,47	-13,37	0,3 1	51,39%
1		0+098	0,84	-17,87	0,5 5	
2		0+350	1,40	-23,06	1,0 0	
3		0+450	2,00	-27,54	1,4 2	
4		0+600	3,10	-21,11	2,1 4	
0,5	SE	0+100	0,85	-10,35	0,5 8	9,71%
1		0+350	1,40	-13,18	1,0 5	
2		0+550	2,60	-17,65	1,9 0	
3		0+650	3,40	-19,93	2,7 5	
4		0+800	6,00	-15,89	4,2 5	
0,5	S	0+150	0,90	3,20	0,6 3	2,16%
1		0+350	1,40	3,96	1,1 4	
2		0+550	2,60	5,26	2,0 3	
3		0+700	4,20	6,47	2,8 5	
4		0+800	6,20	4,75	4,5 8	
0,5	SW	0+078	0,77	14,1 7	0,5 0	0,99%
1		0+300	1,30	18,3 3	0,9 1	
2		0+500	2,20	23,6 8	1,6 7	
3		0+650	3,40	29,1 3	2,3 8	
4		0+750	4,90	21,2 4	3,6 8	

La zona rompiente varía considerablemente en función de las distintas direcciones por donde la penetra el oleaje, los diferentes indicadores de progresivas, profundidades, alturas y ángulos de incidencia así lo hacen notar.

Hacia la dirección S y SE la zona rompiente esta mayormente alejada de la línea de costa que se ha tomado como referencia, el ángulo de

incidencia hacia la costa son los de menor valor, esto nos indica que el oleaje de diferentes alturas desde aguas profundas es prácticamente perpendicular (proveniente de la dirección Sur), en cuanto el porcentaje de ocurrencia de este evento es uno de los más bajos.

En contraposición con las direcciones E y SW, es donde la zona rompiente se presenta más cercana de la línea costera referencial. Lo mismo sucede con los ángulos de incidencia del oleaje sobre la costa, ya que se presenta para esta dirección con una variación considerable respecto al oleaje que viene de aguas profundas. Esto es indicativo que la refracción es mayor para las zonas S - SE y se incrementa a medida que las direcciones se hacen más paralelas a la costa.

En función de la altura de oleaje aumenta relativamente con respecto al oleaje en aguas profundas (H_o), debido al acercamiento a la costa y considerablemente a las direcciones que se presentan más perpendiculares en comparación con aquellas que tienden a ser paralelas a la línea costera.

3.5 ANÁLISIS DE MAREA

La marea juega un papel fundamental en el transporte de sedimentos debido al constante movimiento de niveles y corrientes que ésta causa, y sus efectos en la formación y dirección de las corrientes son primordiales para la deposición de sedimentos en la costa; aparte de la influencia que ejerce en los valores de profundidades en los diversos puntos de toda la zona para la colocación de estructuras costeras que permitan lograr la restitución de dicha zona.

A la marea se asocia su máximo con la luna llena y nueva (*Spring Tide*) y su mínimo con los cuartos creciente y menguante (*Neap Tide*).

Para el caso en particular, nos encontrábamos en marea muerta, en el punto donde las alturas con respecto al nivel medio del mar, son las más bajas. (Ver Figura 3.22).

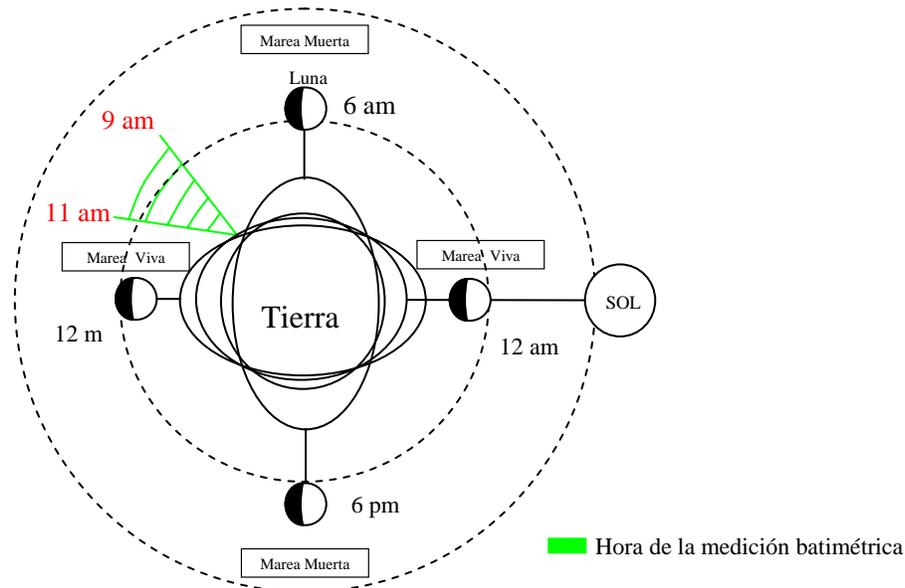


Figura 3.22. Marea en medición batimétrica en playa El Yaque

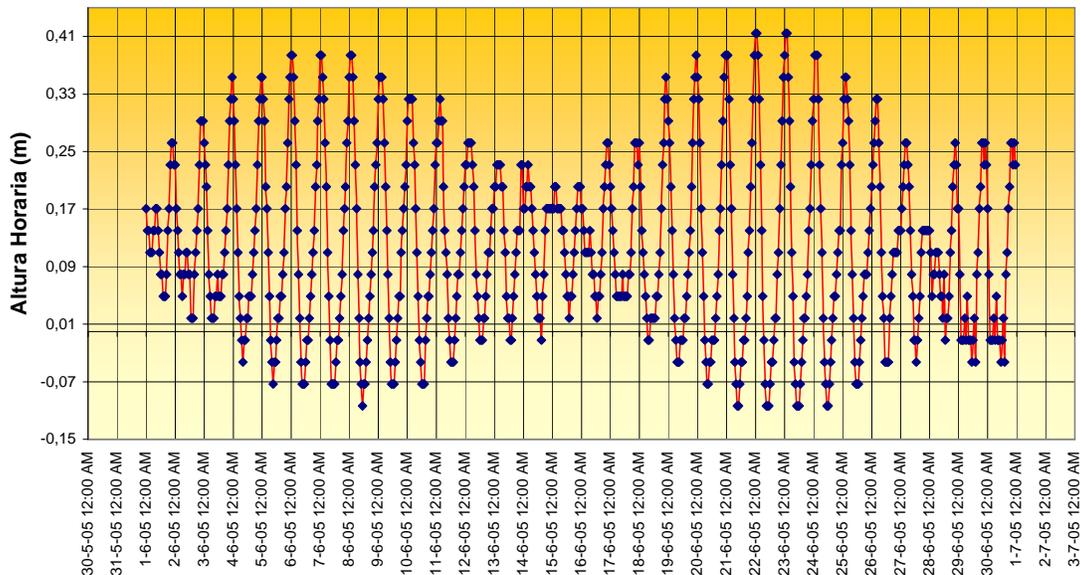
El tipo de marea presentada en la zona se considera mixta, ya que coexisten los períodos diurno y semidiurno. Estas se reflejan en diferentes números de ondas y amplitudes, unos respecto a los otros, en un período de 24 horas continuas.

Para la zona en estudio se consideraron dos formas básicas de trabajar el cálculo de marea, una de ellas era la obtención de data a través de un mareógrafo colocado en Punta de Piedras del Ministerio de Ambiente ubicada en las coordenadas Latitud $10^{\circ} 54' 20''$; Longitud $64^{\circ} 06' 30''$, en colaboración con la fundación La Salle seccional Margarita – EDIMAR.

Se obtuvo la información de estas mareas observadas de manera horaria de diversos años, la cual se utilizó para conocer su comportamiento.

Para procesar esta información se usó una hoja de cálculo electrónica en donde se graficó Altura de Oleaje vs Número de Horas por día. (Ver Gráfica 3.2).

Gráfico de Mareas



Gráfica 3.2. .Altura de Oleaje vs Número de Horas por día en mareógrafo Pta. de Piedras

Comparativamente se realizó un estudio a través de un programa de computadoras que permite el la predicción de mareas. Esto es lo que se denomina Mareas calculadas. El programa WXTIDE32 versión 4.6, se basa en la construcción de gráficos y tablas indicativas de mareas de datos obtenidos de 15 estaciones mareógrafas en Venezuela en el cual se utiliza la predicción estadística para la elaboración de los gráficos de marea.

Para este caso se realizo el gráfico predictivo de la marea del día en que se elaboraron las mediciones con el ecosonda, a través de la configuración del programa con la información esencial como: ubicación de la estación más apropiada de la zona, día y hora de la medición. (Ver Figura 2.23).

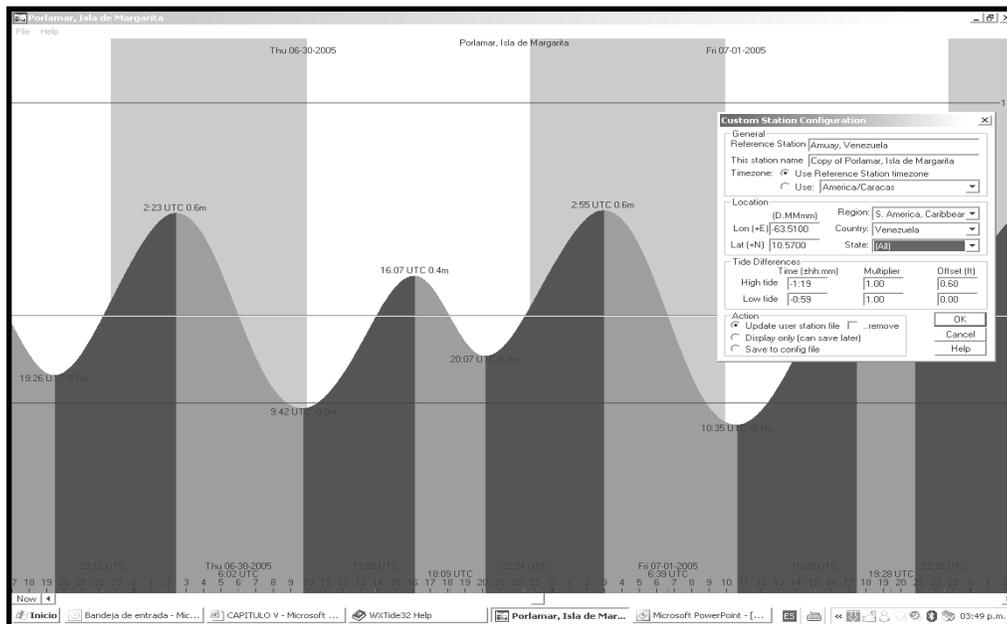


Figura 3.23. Vista de la Grafica de Mareas generada por programa WINXTIDE32
 Fuente: WINXTID32

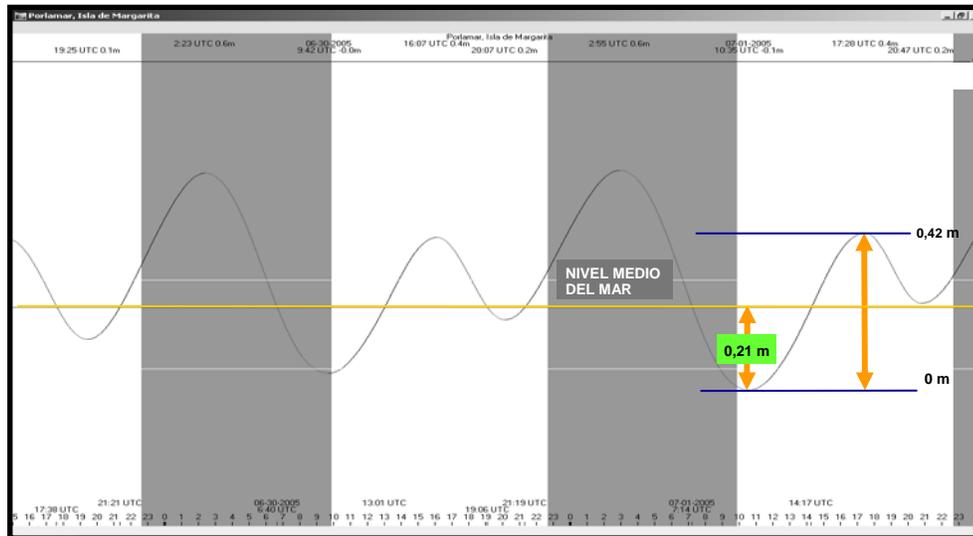
Con esta información el mareógrafo realiza la grafica en función de la información estadística que posee y en la cual nos indica el valor de la marea más bajo (bajamar) y mas alto (pleamar), del cual se partió para medir la distancia desde el punto más bajo hasta la línea que marca el nivel medio del mar del mareógrafo, con solo calcular la diferencia de estas altura y dividirla a la mitad.

Del programa WXTIDE32 se obtuvo el siguiente reporte de resultados:

Tabla 3.8 .Reporte de los datos de Marea predominante en la zona para el momento del estudio del programa WXTIDE32

Thursday 01-07-2005 Porlamar, Isla de Margarita Venezuela Units are meters Sunrise 9:56 - Sunset 22:42 UTC Moonrise 5:11 - Moonset 17:52 UTC	High Tide:	2:23 UTC	0.60 m
	Falling:	5:58 UTC	0.30 m
	Low Tide:	9:42 UTC	0.00 m
	Rising:	13:58 UTC	0.30 m
	High Tide:	16:07 UTC	0.42 m
	Falling:	18:03 UTC	0.30 m
	Low Tide:	20:07 UTC	0.20 m
	Rising:	22:30 UTC	0.30 m

La distancia representativa de la altura, viene de la diferencia de High tide (HT) y Low tide (LT) en metros.



Gráfica 3.3. Mareas generada por programa WINXTIDE32 en mareógrafo Porlamar

El valor obtenido representado en la *Gráfica 3.3* es la cantidad en metros que hay que incrementar los valores de registro de alturas obtenidos, a través de la medición con el ecosonda debido a la condición de marea baja en las que se hicieron las tomas para corregir el efecto que produce este fenómeno sobre la profundidad desde el fondo marino, minimizando el error en los perfiles batimétricos trazados.

Adicionalmente se realizaron tomas de medidas en el transcurso de tres días consecutivos utilizando una regla de mareas de fibra colocada en un costado de un Muelle –Espigón de madera ubicado frente al hotel The Winds, en donde se hicieron diversas observaciones horarias. (Ver *Figura 3.10*).



Fotografía 3.10. Regla de Marea colocada en costado de espigón de madera. Fuente: PROPIA

Al final se realizó una comparativa de la información registrada por el mareógrafo de Punta de Piedras con las otras formas de registros del día 30 de Junio tratando de obtener una información clara de cómo ha variado la marea, en los últimos años. Ver **ANEXO (27)**.

Tabla 3.9. Comparación de alturas de marea en diferentes puntos medidos en Margarita

<p>Alturas (Base N.M.M.):</p> <p>Día :30/06/2005</p> <p>Hora: 6:00 am-12:00 m</p> <p>Desfase en Tiempo con respecto a Porlamar:</p>	<p>Porlamar: 66 cm</p> <p>Pta. Piedras: 27 cm</p> <p>El Yaque: 18 cm</p> <p>Pta. de piedras: 6hrs. (HT)</p> <p>6hrs. (LT)</p> <p>El Yaque: 2hrs. (HT)</p> <p>0hrs. (LT)</p>
---	---

En la *Tabla 3.9* podemos determinar que el mareógrafo de Porlamar cuyos valores son calculados por el WXTIDE32 versión 4.5 es el adecuado si consideramos que el factor de forma es una de las maneras más versátil en

la clasificación, para el mareógrafo de Porlamar la onda es la más esbelta del gráfico mostrado por los registros de Pta. de Piedras, ésta disposición representan la combinación de ondas de marea diurnas y semidiurnas, cuyas amplitudes son diferentes entre sí a lo largo de 24 horas. En la comparación con la medida en la regla de marea en el Yaque se puede observar que existe un desfase en la formación de un aproximado de 2 horas y referenciado a la Marea Alta (HT) comparada con la medida por el mareógrafo de Pta. de Piedras que es de 6 horas, si se ubican ambas estaciones mareógrafas en un plano coordenado se observa que el de Porlamar está más cercano a la zona en estudio y adicionalmente está colocado sobre un muelle más al Este de la zona y posiblemente más profundo, donde no percibe mayor perturbación, en cambio, el de Punta de piedras por sus características en representación gráfica está colocado en un punto más cercano a la costa y se presentan perturbaciones frecuentes que hace que esta onda sea más desordenada. Véase *Figura 3.24*.



Figura 3.24. Ubicación física de los mareógrafos cercanos a la Zona de estudio. Fuente: BLUECHART

Otro factor que pudiera estar influenciando a la marea medida en la playa de El Yaque es su relativa cercanía a la boca de la Laguna de Las Marites y

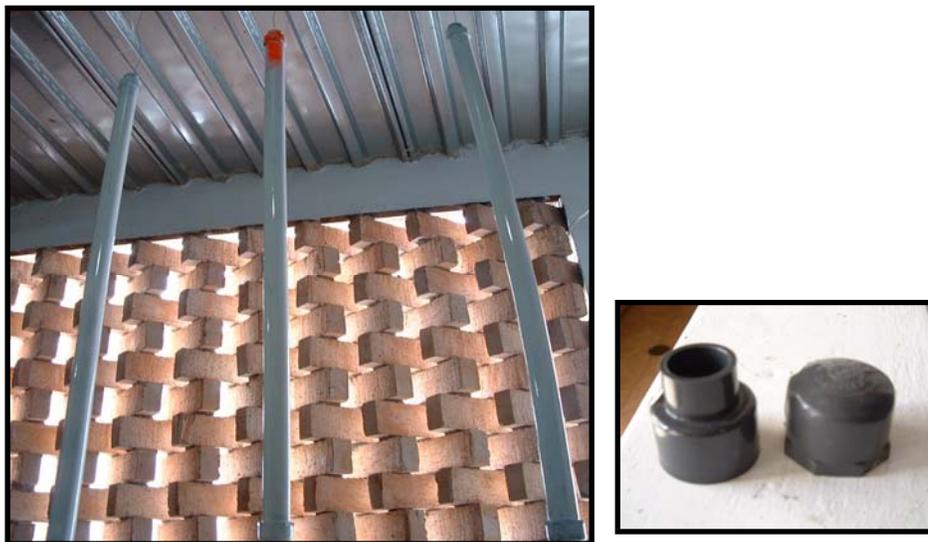
a la isla de Coche, ya que esto pudiera estar modificando la marea que se aproxima desde costa afuera hacia la playa.

3.6 CORRIENTES MARINAS

3.6.1 Estudio de las corrientes marinas

Para el estudio de corrientes se utilizó un método experimental en campo, en donde se colocó en el agua unos dispositivos ó bastones flotadores de longitud específica y peso adecuado que permitían su flotación.

Estos dispositivos fueron construidos de material plástico polivinilo de cloro (PVC) de 1 pulgada de diámetro, como se observa en la siguiente fotografía, y se colocaron marcas de pintura fluorescente a medio metro (1/2 m), un metro (1m) y uno y medio metros (1,5 m) de longitud desde la base con relleno interno de material de plomo para darle el peso adecuado y arena para calibrar a la medida requerida.



Fotografía 3.11. Fabricación de bastones de polietileno para medir corrientes . Fuente: PROPIA

Con respecto a los flotadores superficiales se hicieron de un tubo de cartón previamente barnizado con tapa en el fondo y superficial, conteniendo todas, unas marcas sobresalientes en forma de banderín para poder ubicarse a simple vista. (Ver Figura 3.12).



Fotografía 3.12. Diferentes instrumentos fabricados y utilizados para la medición. Fuente: PROPIA

3.6.2 Procedimiento de medición en campo

El procedimiento utilizado para este fin, consistió en ubicar un grupo de bastones flotadores en un punto específico previamente demarcado en el mapa de la zona en estudio, estos dispositivos de diferentes longitudes numerados iniciaban su recorrido en función de las corrientes presentadas en la zona y se fue registrando su movimiento a lo largo del tiempo, para ello se consideró colocarlos en puntos como: la entrada y a la salida de la Laguna de Las Marites (Boca Victoria) al igual que en puntos frente a la línea de Costa para luego hacerle el seguimiento con la embarcación tomando intervalos de tiempo regulares para cada dispositivo. El registro del recorrido de cada bastón fue realizado con el GPS a medida que estos desplazaban por efecto de la corriente. (Ver las Figuras 3.25;3.26;3.27).

En la *Tabla 3.10* se muestra la coordenada inicial de cada bastón.

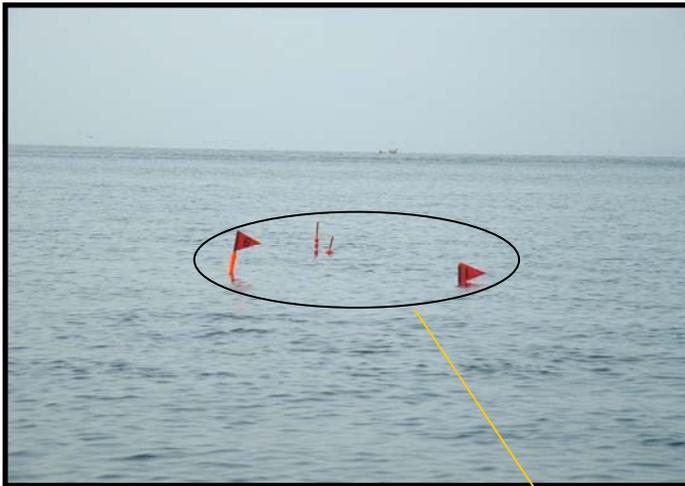


Figura 3.25. Colocación de bastones flotadores. Fuente: PROPIA

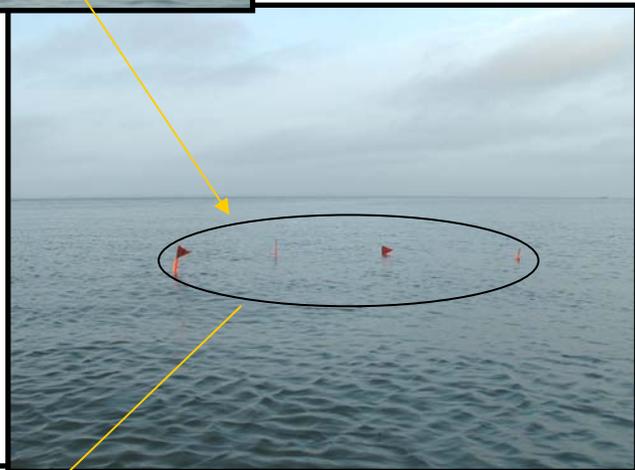


Figura 3.26. Dispersión de los bastones flotadores. Fuente: PROPIA

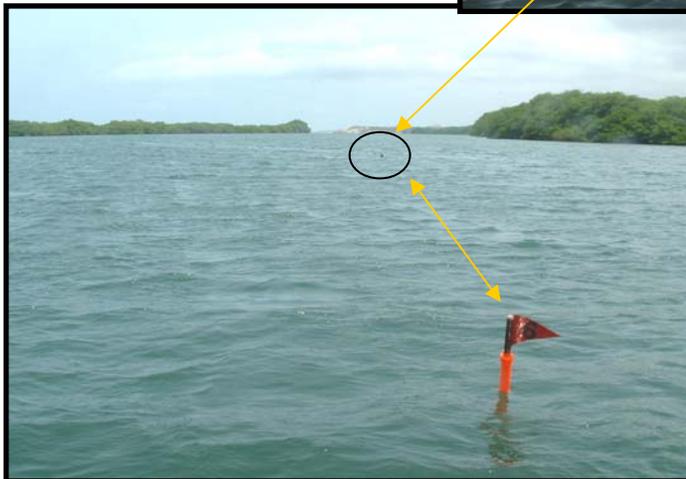


Figura 3.27. Posición de los bastones flotadores. Fuente: PROPIA

Tabla 3.10. Coordenadas iniciales de los diferentes Recorridos.

LINEAS DE CORRIENTES	COORDENADAS INICIALES	
	Este	Norte
RECORRIDO 1	397.004	1.205.580
RECORRIDO 2	365.150	1.205.263
RECORRIDO 3	395.681	1.204.635
RECORRIDO 4	396.146	1.205.365

El recorrido de los bastones está determinado por las corrientes locales de la zona, el recorrido 1 colocado en la entrada de la boca denominada Boca Victoria el cual se desplazaba hacia adentro de la laguna debido a la marea presente para el momento de la medición, al igual que el recorrido 2 que inicia en la salida de la boca y el recorrido 3 que inicia en la playa en frente de los hoteles. Ver **ANEXO (1) PLANO 4;5;6**.

Para el segundo día de la campaña de mediciones de corrientes en campo se presentaba la condición de marea vaciante en la laguna y esto fue representado por el recorrido 4 el cual se inicia en la salida de la boca y se desplaza hacia fuera de la laguna siguiendo el movimiento de las corrientes litorales hacia la costa, ver **ANEXO (1) PLANO 3**.

3.6.3 Procesamiento de información recabada en campo

Con la información que se pudo obtener en campo según las tablas, **ANEXO (28) al (39)**, podemos determinar el movimiento de la corriente que se presenta en la zona.

En el caso particular se observó que la corriente se desplazaba de Oeste a Este en conjunción con la marea que se estaba produciendo en el

momento de la toma de mediciones. En la que al colocar los flotadores se iban dispersando a medida que se desplazaban y cada uno desarrollaba diferentes velocidades y direcciones dependiendo de si la corriente era más superficial o no.

La velocidad promedio para el día 1^{ero} de julio considerando que las corrientes entraban a la laguna (condición llenante) y para el 2 de julio las cuales eran salientes (condición vaciante) se representa en la *Tabla 3.11*.

Tabla 3.11. Velocidades de los diferentes bastones en los recorridos

01/07/2005 Condición: marea llenante		SUPERFICIAL (m/s)	MEDIO METRO (m/s)	MEDIO METRO (1) (m/s)	UN METRO (6) (m/s)
V med	1 ^{er} tramo	0,17	0,12	0,11	0,14
	2 ^{do} tramo	0,18	0,15	0,15	0,17
	3 ^{er} tramo	0,21	0,15	0,13	0,22
02/07/2005 Condición: marea vaciante		SUPERFICIAL (m/s)	MEDIO METRO (m/s)	MEDIO METRO (1) (m/s)	UN METRO (6) (m/s)
V med	4 ^{to} tramo	0,31	0,14	0,14	0,15

3.7 SEDIMENTOS

3.7.1 Transporte de sedimentos

El traslado de sedimentos en la costa está determinado por dos movimientos que actúan en conjunto y los cuales son clasificados en dos tipos básico: transporte litoral el cual implica un movimiento del sedimento paralelo a la costa en función de las corrientes litorales y el transporte normal

que implica el movimiento de sedimentos que se produce por la acción del oleaje incidente perpendicular a la costa.

Las olas que se aproximan oblicuamente a una costa generan un movimiento de sedimentos a lo largo de ella, cuya magnitud depende de las dimensiones de las olas, del ángulo de aproximación de la ola con respecto a la línea costera y de las características del material de la playa.

En muchas costas la dirección de las olas varía considerablemente de tal manera que pueden ser removidos grandes volúmenes de sedimentos pero el transporte neto resulta muy bajo. En otras costas la dirección de las olas se mantiene mayormente constante, lo que resulta en un transporte apreciable de sedimentos en una sola dirección.

La mayor parte del transporte litoral tiene lugar en la zona de rompientes; en esta zona las olas crean una corriente paralela a la costa, la cual transporta el sedimento. Más allá de la zona de rompientes en dirección al mar, el movimiento de sedimento paralelo a la costa decrece rápidamente a menos que existan corrientes fuertes producidas por otras causas.

En cuanto al la cantidad de sedimento transportado por el movimiento litoral se realizaron cálculos a través de las herramientas computacionales para cuantificar éste.

Para ello se consideraron los valores constantes para la zona:

Densidad del agua de mar: 1.035 kg/m^3

Densidad del sedimento: 2.450 kg/m^3

Porosidad: 0,45

Se ingresaron en la hoja de cálculo los valores de las variables como: ángulo y altura de oleaje en la zona rompiente, pendiente de la playa, período, longitud de oleaje en aguas profundas, tamaño del grano promedio (D_{50}).

Se calculó la capacidad de transporte por dirección predominante aplicando la Formula de Queen, donde se obtuvo como resultado que desde las direcciones SE y E es donde ocurre el mayor transporte y con mayor frecuencia en la dirección E. La dirección SW es en donde se presenta un transporte de menos cuantía debido a la pequeña influencia del oleaje en la zona. En la *Tabla 3.12* se pueden apreciar los resultados obtenidos.

Tabla 3.12. Transporte Parcial y Total del Sedimento

	SW	SE	E	S
% Ocurrencia *	0,99	9,71	51,39	2,19
Transporte Parcial (m ³ /año)	184,24	5.960,77	24.047,15	400,56
Capacidad total de transporte neto (m ³ /año)	29.423,11			

* Oleaje de otras direcciones o Calma relativa: 35,72%

3.7.2 Tipo de sedimento

Para el estudio del tipo de sedimentos se obtuvieron 31 muestras de sedimentos en diversos lugares de la zona en estudio; las cuales se recolectaron en puntos específicos como se muestra en Figura 3.28.

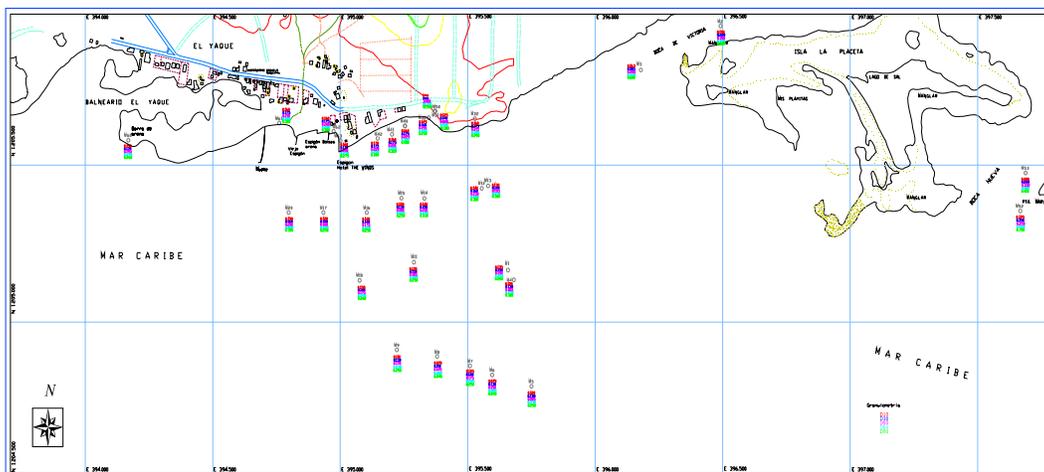


Figura 3.28. Plano de puntos de toma de muestras. Fuente: PROPIA

Estos puntos de tomas de muestras superficiales y sumergidas se consideraron en función de la dirección de las corrientes y diferentes profundidades a lo ancho a la playa frente a los hoteles, al igual que en lugares específicos como lo es la lengüeta, el morro, la Isleta y la orilla de playa El Yaque. Ver **ANEXO (1) PLANO 7**.

Para ello se utilizó un dispositivo para hacer la captación de las muestras sumergidas para luego almacenarlas y clasificarlas en bolsas plásticas selladas.

Este dispositivo fue fabricado con un tubo metálico de sección cuadrada cerrada por un extremo y abierta por el otro con un corte en ángulo tipo pala lo suficientemente ancho para permitir la captación de sedimento al ser halado por los extremos con una cuerda desde la superficie. (Ver *Fotografía 3.13*).



Fotografía 3.13. Draga fabricada para las tomas de sedimentos submarinas. Fuente: PROPIA



Fotografía 3.14. Preparación de las Muestras Fuente: PROPIA



Fotografía 3.15. Pesado de las Muestras Fuente: PROPIA

3.7.3 Procesamiento de muestras recogidas en campo

En esta etapa se procedió a clasificar las muestras de sedimento por el método de granulometría.

Para ello se utilizó el método estándar conocido como Granulometría por Tamizado debido a que la mayor fracción observada era material fácilmente disgregable.

3.7.3.1-Granulometría por Tamizado (Procedimiento Básico)

1. Secar el material al horno a temperatura constante de 60 °C por 48 horas debido al contenido de materia orgánica presente.



Fotografía 3.16. Horno para secado de las muestras. Fuente PROPIA

2. Se tomo una porción considerable de material con peso de sólidos ($W_s=268,80$ g) para realizar el tamizado debido que las partículas eran predominantemente finas.



Fotografía 3.17. Separado de las muestras.
Fuente: PROPIA

3. Tamizado mediante movimientos de saltos o batidas por 15 minutos con movimientos horizontales de manera que las partículas puedan esparcirse y distribuirse a través del tamiz.

Los tamices utilizados para tal fin y en este caso fueron: # 3/4",
3/8", # 4,# 10,# 20,# 40,# 60,# 100,# 200.



Fotografía 3.18. Tamizado de las Muestras. Fuente: PROPIA

4. Pesar la fracción retenida en cada tamiz en la balanza.



Fotografía 3.19. Pesado en laboratorio de las muestras. Fuente: PROPIA

Se observó que según la Clasificación ASSHTO la mayor parte del sedimento estudiado pertenece a la sección de las Arenas con grano mayormente fino a medio con diámetro promedio D_{50} entre 0,21 mm, solo las muestras ubicadas en el Morro (M-50 y M-31) presentan una característica variada, entre la grava y la arena en un porcentaje proporcional y en una cantidad muy pequeña aparece el limo. Ver **ANEXO (40)**.

3.7.3.2- Estudios Adicionales Comparativos del tipo de Sedimento

3.7.3.2.1 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

En cuanto a los diferentes estudios para la identificación más exhaustiva de las muestras de sedimento se consideró realizar pruebas específicas a muestras representativas como lo es La Microscopía Electrónica de Barrido. Se analizaron 23 muestras las cuales se colocaron en una porción, suficiente para cubrir la superficie de un porta-muestra especial para su uso en el Microscopio.



Fotografía 3.20. Representación de las diferentes muestras de sedimentos de playa El Yaque. Fuente: PROPIA

Se trató las muestras con un baño de oro que permite la mejor transmisión electrónica del haz de electrones emitido y los electrones desprendidos o secundarios que son captados o recibidos por los sensores para formar la imagen entre la muestra bombardeada y el equipo. Esto es debido que esta muestra no es buena conductora para ese caso.

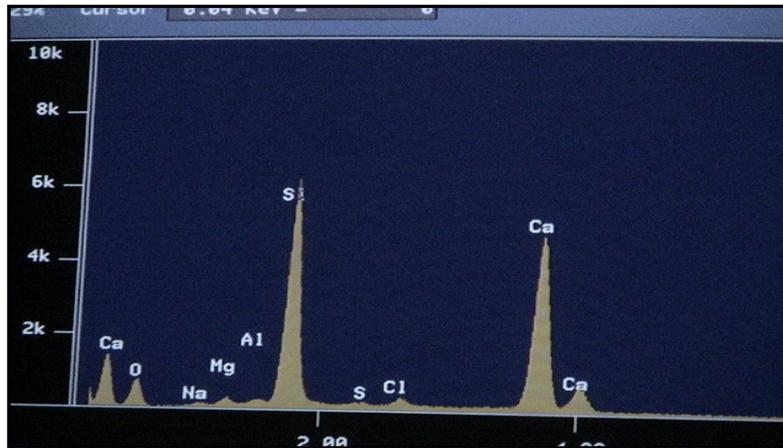


Fotografía 3.21. Colocación de muestras de sedimentos en el Microscopio Electrónico de Barrido. Fuente: PROPIA

Luego se procedió a colocar dichas muestras tratadas en el equipo transmisor para realizar el análisis elemental pertinente. Hay que destacar

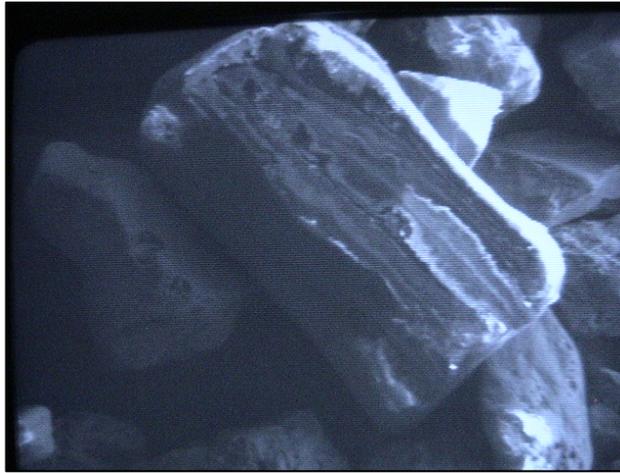
que dicho análisis solo representa la cantidad de energía que desprende la muestra y es captada por el equipo.

La intensidad de esta emisión es debida al número atómico de la muestra produciendo un espectro que permite determinar semi-cuantitativamente la composición química por diferencias de contraste.



Fotografía 3.22. Representación del gráfico por computadora de los elementos que conforman las muestras de sedimentos de playa El Yaque. Fuente: PROPIA

Para el caso de los sedimentos de El Yaque se pudieron apreciar los elementos que conforman las muestras de arena en función de las cantidades de energía desprendida por los electrones secundarios al ser irradiados. Al igual que las imágenes generadas por el equipo al procesar la información obteniéndose una imagen de apariencia tridimensional de la muestra. (Ver Fotografía 3.22).



Fotografía 3.23. Representación de visual por computadora de un grano de arena de una muestra de sedimento de playa El Yaque. Fuente: PROPIA

Para el análisis de los resultados se utilizó una de las principales herramientas estadísticas como lo es los histogramas de frecuencias, los cuales nos permiten diferenciar las cantidades en que se presenta un elemento específico en una muestra, de manera de establecer similitudes en su origen o ubicación espacial dentro de la zona de estudio.

3.8 VIENTOS

La región norte del país se ve afectada con relativa frecuencia por perturbaciones de origen extra tropical, especialmente frentes fríos, entre enero y abril, que provocan precipitaciones dentro de la temporada seca.

Desde mediados de abril hasta noviembre, debido al desplazamiento gradual del sistema de presiones hacia al norte, el país está casi en su totalidad bajo la influencia de la zona de convergencia intertropical, franja muy intensa actividad convectiva (formación de nubes), que determina la temporada lluviosa sobre Venezuela.

Los vientos alisios son predominantemente circulantes en las zonas costeras en las direcciones Noreste y Este franco en Venezuela, sin embargo en lugares como la isla de Margarita donde se presenta una cadena montañosa desde la parte oriental a la occidental con alturas diversas que pudieran modificar el viento moldeándolo y cambiando su dirección original.

Considerando que toda la zona comprendida entre Punta de Piedras hasta playa El Yaque es una zona plana y llana donde no se presentan montañas de altura representativa que pudieran desviar o dispersar el viento obteniendo un comportamiento similar en toda la zona.

Según los datos horarios obtenidos en campo en la zona de Punta de Piedras a través de la estación meteorológica de La Fundación La Salle durante todo el año 2005, se presentó la dirección predominante hacia el NNE con un promedio de 7° y 9° desde el Norte al igual que una Velocidad de 15,48 km/h (8,36 nudos) y 16,1 km/h (8,69 nudos) respectivamente. (Ver Figura 3.29 y 3.30.)

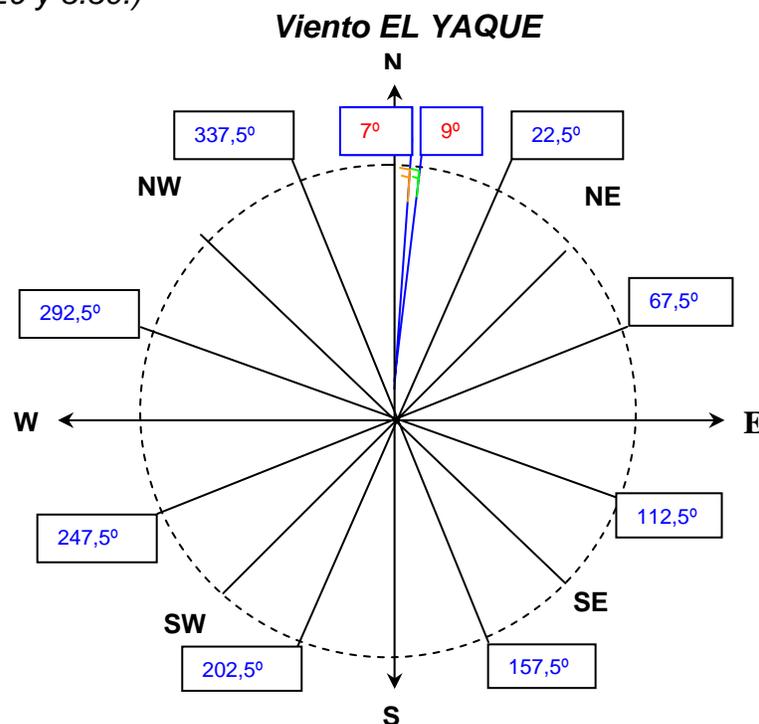


Figura 3.29. Dirección de los vientos de la estación Pta. de Piedras

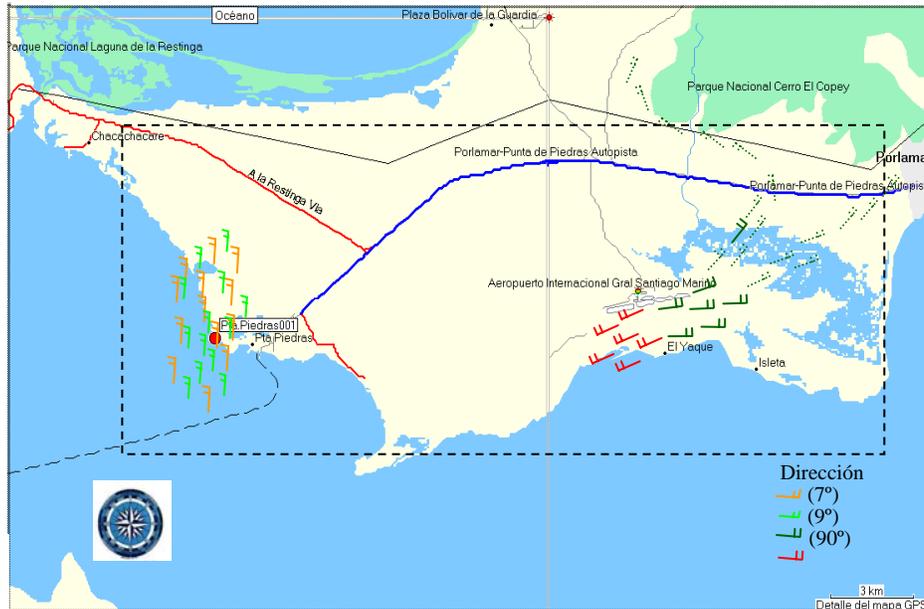


Figura 3.30. Dirección del Viento según estación meteorológica de Pta. de Piedras y lo observado en campo en playa El Yaque. Fuente: BLUECHART

Otras direcciones como SW, SE y E son predominantes debido a la acción de la cadena montañosa en la zona oriental como el macizo Copey que agrupa a cerros como Choaima y Cerro Grande o San Juan donde existen alturas superiores a los 800 y 900m respectivamente, que producen que las direcciones originales sean desviadas. Al igual la velocidad medida en sitio fue de 8 nudos (15 Kph) en promedio. En las *Figuras 3.24 y 3.25* se puede observar el fenómeno antes descrito.



Fotografía 3.24. Viento proveniente de la dirección E.
Fuente: PROPIA



Fotografía 3.25. Representación de vientos en diferentes direcciones E y SW respectivamente. Fuente: PROPIA

También se obtuvo información de viento a través de internet de la estación en el Aeropuerto Internacional Santiago Mariño, de la cual se obtuvo información importante en cuanto a la velocidad promedio. Ver **ANEXO (41)**. En la *Tabla 3.14* se muestra la información obtenida.

Tabla 3.14. Velocidades promedios de viento. Datos de estación meteorológica en el aeropuerto

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2005	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h	\bar{V}_p km/h
Velocidad Promedio (\bar{V}_p)	13,85	17,41	26,32	23,54	22,04	19,78	16,42	16,17	16,73	17,35	22,80	22,83

El valor promedio de las velocidades es muy similar al obtenido en los días de la campaña de mediciones y esta información nos permitió hacer los diferentes cálculos para el oleaje y el transporte de sedimento.

CAPÍTULO IV

MORFOLOGÍA COSTERA - SECTOR EL YAQUE

La morfología costera comprende el estudio de la línea de costa en función de los procesos físicos que tienen lugar en la zona cercana a ella, así como de los factores que lo inducen. Por esto para poder comprender la situación actual de erosión presente a lo largo de playa El Yaque, hay que realizar un estudio de la evolución de la costa a través del tiempo, con la finalidad de investigar las variables naturales y exógenas que han modificado la morfodinámica natural de la playa.

Para este caso se va a comparar y describir la información de planos, fotos e imágenes recopiladas de la zona, lo cual permite obtener una mejor visión del problema que se está presentando. El estudio de las áreas sedimentadas y erosionadas se realizó por medio de la superposición de imágenes satelitales y fotografías de la línea de costa tomadas en los diferentes años. La comparación de dicha información nos lleva a realizar los análisis pertinentes para poder entender el problema y proponer soluciones adecuadas a las condiciones presentes.

4.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA COSTA DE PLAYA EL YAQUE.

4.1.1 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1972-1980.

Para el año 1972 se presenta una costa donde existe, hacia el oriente un promontorio de formación rocosa de tipo caliza y sedimentaria, cuya superficie está constituida por una gran extensión de material arenoso,

cubierto con plantas nativas de la zona; a este lugar se le conoce como El Morro de playa El Yaque.

Al occidente se presenta una lengüeta de arena que conforma áreas de zonas húmedas abundantes en la playa, estas están cubiertas por vegetación del tipo mangle.

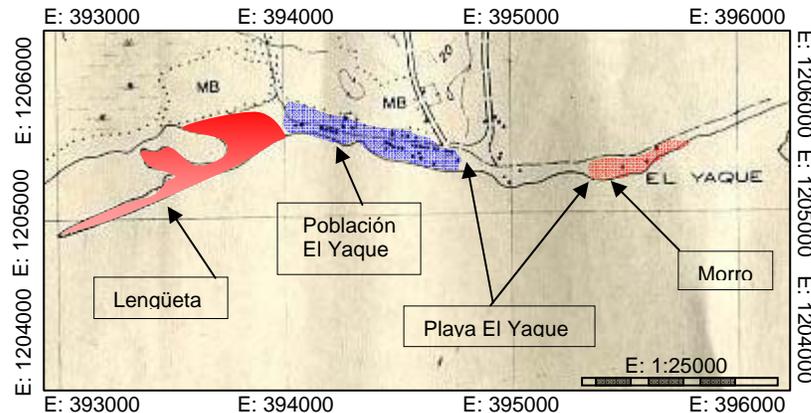


Figura 4.1. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Plano Año:1972. Plano suministrado por: TRANAR

Según un levantamiento cartográfico de 1972 (*Figura 4.1*) la lengüeta se formaba al oeste de la población de El Yaque, como un apéndice de la costa, extendiéndose por casi 1 Km. con una inclinación de 22 grados en dirección Sur-Oeste, y con un ancho promedio de 50 m. en su parte mas delgada; está conformada principalmente por arena, y tiene una superficie de 88.400 m² y un volumen aproximado de 132.600 m³.

La línea de costa de playa, que hoy en día esta ocupada por estructuras hoteleras, se presenta suavizada para la época, con pocos cortes abruptos y con una franja de arena de ancho considerable, el cual es indicativo de un proceso erosivo poco agresivo.

Por ser escueta la información y escaso el material de apoyo recopilado de este año, no es posible hacer una descripción más detallada de la situación.

Al pasar de los años, a medida que se incrementaba la población que habitaba en los caseríos de la zona, se empezaron a recibir en los organismos encargados del cuidado ambiental, información de cambios en la forma de la línea costera. Informaciones provenientes de pobladores de la zona indican que dicha playa era de baja profundidad, y el lecho marino se encontraba poblado con vegetación del tipo *Thalassia*.

Al comparar los años 1972 y 1980 se puede observar, con la ayuda de ortofotos, como para el año de 1980, la lengüeta ubicada al Oeste de la playa fue afectada por la erosión, disminuyendo su longitud de 1km. a 270 m. perdiéndose alrededor de 82.091 m² de superficie y un volumen aproximado de 123.136 m³ de arena.



Figura 4.2. Erosión y sedimentación comparativa de la línea de costa de playa El Yaque. Periodo 1972-1980. Plano Año:1972. Plano suministrado por: TRANAR

En este año también se puede observar la formación de dos nuevas lengüetas de arena, ubicadas al frente y este del caserío de pescadores de la población de playa El Yaque, con una superficie de 28.734 m² para la lengüeta occidental y 24.455 m² para la oriental, separadas entre si por un área erosionada de 6.825 m², el echo de que estas lengüetas se encuentren separadas por un área erosionada describe el patrón del movimiento de sedimentos a lo largo de la costa para esta época. (Ver Figura 4.2).

4.1.2 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1980-1986.

En este período la población de la zona esta conformada por caseríos de pescadores locales. La densidad poblacional es baja, con edificaciones del tipo rural ubicadas de forma dispersa. Las vías de acceso no están totalmente conformadas y son del tipo rural contribuyendo al poco desarrollo turístico de la zona.

La ubicación de los caseríos es relativamente cercana a la línea de costa, aunque en el año 1986 se observa un aumento en la berma en la zona Central y Oeste de la playa, producto de la sedimentación ocurrida en esa área, la vegetación marina y el mangle existente, aunque para ese momento se ha ido perdiendo considerablemente en el proceso de sedimentación.

En este periodo también se observan cambios en la cantidad de la capa vegetal en la parte alta del morro, cuya densidad ha disminuido, observándose zonas desprovistas de vegetación, que favorece el desplazamiento eólico de la arena hacia la playa. Esta vegetación superficial es predominantemente xerófila, y se caracteriza por especies como el Cují, el Yaque y algunos Cactus y Manglares, conformando en algunos casos pequeñas islas cuando se han desarrollado sobre bancos de arenas, haciendo que aumenten su número en el tiempo debido a la sedimentación.

Considerando que el morro tiene un frente hacia la playa con una superficie de 16 mil m² aproximadamente, resulta ser un factor de análisis importante, por cuanto es una fuente para el transporte de sedimento eólico.

Durante los años 1980 y 1986 se observa que la condición de erosión se incrementa en algunas áreas como ocurre al este de la playa en las cercanías del morro, donde se deteriora extensivamente la línea de costa produciendo el desvanecimiento de la laguna, como se observa en las fotografías aéreas de los años 1980-1986. (*Ver Figuras 4.3 y 4.4*).

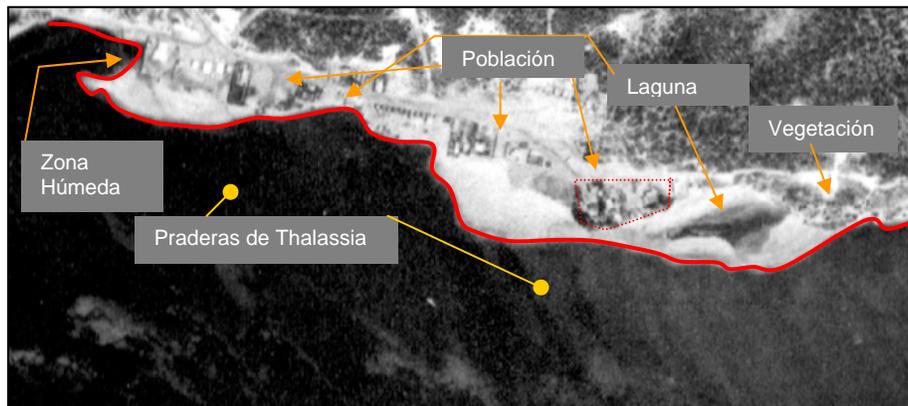


Figura 4.3. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año: 1980. Fuente Foto: TRANAR

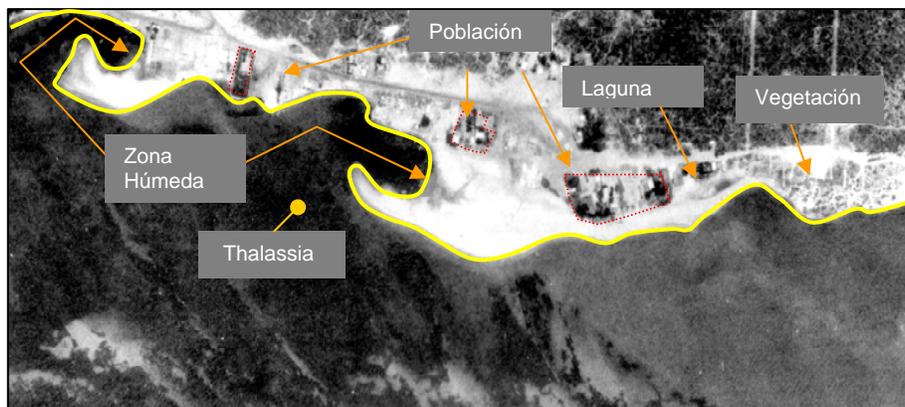


Figura 4.4. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año: 1986. Fuente Foto: TRANAR

Para esta fecha, se mantiene el patrón de sedimentación que se viene presentando en la zona, se evidencia un mayor crecimiento en la lengüeta oriental que en la occidental; formándose un apéndice en la lengüeta oriental de 200 m de longitud, el cual crece con una inclinación de 18 grados en dirección Noroeste, este apéndice tiene un área sedimentada de 12.734 m²; se observa una superficie erosionada en la parte protegida de la lengüeta de 4.246 m². y se evidencia en esta época la formación de zonas húmedas en la

parte protegida de las lengüetas, esto se debe al poco movimiento del agua y al nivel freático en esta zona

La lengüeta occidental a su vez presenta una fuerte erosión (ver *Figura 4.5*), siendo el lado expuesto al oleaje el más afectado, perdiendo alrededor de 11.230 m^2 y en menor intensidad su parte interna que pierde una superficie de 1.982 m^2 ; el material erosionado es transportado y sedimentado hacia el oeste, aumentando el avance de esta lengüeta, sedimentándose un área de 3.063 m^2 .

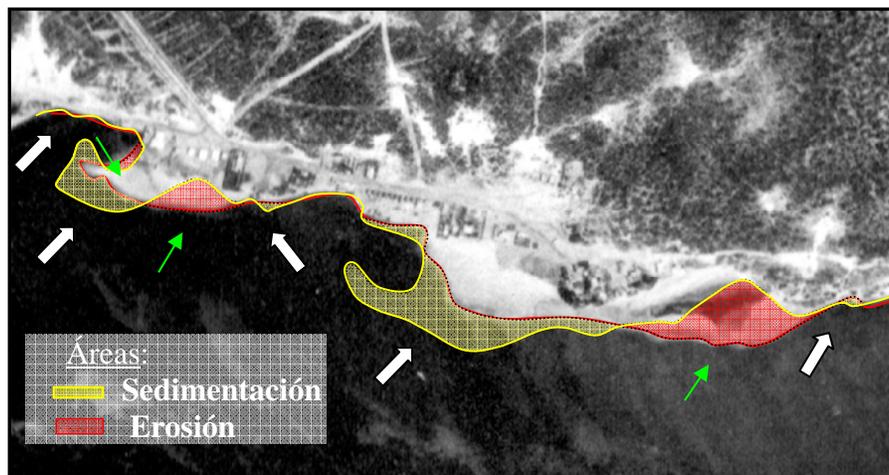


Figura 4.5. Modificación de la línea de costa de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas años 1980 y 1986. Fuente Foto: TRANAR

Otras de las características primordiales observadas son las zonas húmedas, ubicadas en las áreas internas de las lengüetas, conformadas por manglares y herbáceas, en donde conviven una gran variedad de especies como crustáceos, peces y aves que se desarrollan en hábitat de aguas salobres.

Para los años siguientes la laguna al Oeste del morro, tiende a reducirse de manera drástica motivado al proceso erosivo creciente que se presenta en este lugar. En el año 1986 se observan posibles sectores de

pequeños humedales en los bordes formados por la lengüeta al lado occidental de la playa, motivado por la influencia directa de una zona protegida por la lengüeta de arena con oleaje calmo la mayor parte del tiempo.

El lecho marino destaca cambios sustanciales en cuanto a las praderas de *Thalassia*, ya que no se presenta en la misma cantidad que en 1980, se observan zonas despobladas en la parte oriental y central de la costa en una vasta área y la tendencia es al retiro de la *Thalassia* en la parte occidental de la playa.

4.1.3 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1986-1996.

El incremento de la población es notable en toda la zona para este período, con estructuras más conformadas y con un desarrollo turístico que abarca todo el balneario. Las vías de penetración se encuentran más consolidadas colaborando con este desarrollo.

En cuanto a la vegetación típica de la zona, se observa que en el morro se densifica su vegetación cubriendo parte de la duna que allí se conforma, las praderas de *Thalassia* se han ido retirando del lado Oriental, manteniéndose en el lado occidental, todavía cercanas a la orilla de la playa.

Adicionalmente se evidencia otro tipo de vegetación que no es originaria de la zona y que va en constante crecimiento con la conformación de las edificaciones, brindando un mayor atractivo turístico en el balneario.

Para el año de 1993 por medio del material fotográfico, se puede apreciar que la mayor distancia entre la línea de costa y las edificaciones para ese momento (junio 1993) es de aproximadamente 55 m lineales en su parte más ancha.(Ver Figura 4.6.)



Figura 4.6. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año:1993. Fuente Foto: MARNR

En este año se observa que la laguna que se encontraba al Este de la playa, adyacente al morro se desaparece debido al proceso erosivo constante que se presentó en los años anteriores. El contorno de la línea de costa se mantiene bordeando siempre al morro debido a su formación rocosa, siendo así su deterioro por la acción continua del mar menos pronunciado que el observado en el área de la playa. (Ver Figura 4.7.)



Figura 4.7. Vista de la Línea de Costa desde el morro El Yaque. Año:1996. Fuente Foto: ASOYAQUE

Para el año 1996 se observa una obra costera en el lado Oeste de la playa, en el margen occidental del lóbulo central que funciona como un embarcadero de transporte turístico, donde se realizan viajes hacia las playas de las islas cercanas como Coche y Cubagua, esta tiene forma de “L” y en la parte de anclaje a la costa existe sedimentación de su lado oriental y erosión del lado occidental de la costa. (Ver Figura 4.8).



Figura 4.8. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año:1996. Fuente Foto: MARNR

Para la década de los 90 no se cuenta con información cartográfica o con fotografías aéreas de la zona, donde se puedan verificar los cambios presentados en la línea de costa, solo se cuenta con una serie de fotografías tomadas desde el morro y una foto aérea del año 1996 de la zona Este y zona central de la playa, donde se puede observar una gran sedimentación de la zona central, formándose un lóbulo de arena en esta área de la costa, el cual crece desde el año 1986 en un área aproximada de 27.420 m². (Ver Figura 4.9).

Se estima que hubo una disminución promedio de la costa de aproximadamente 6,8 m entre los años 1993 y 1996, a razón de 2.2 m por año.

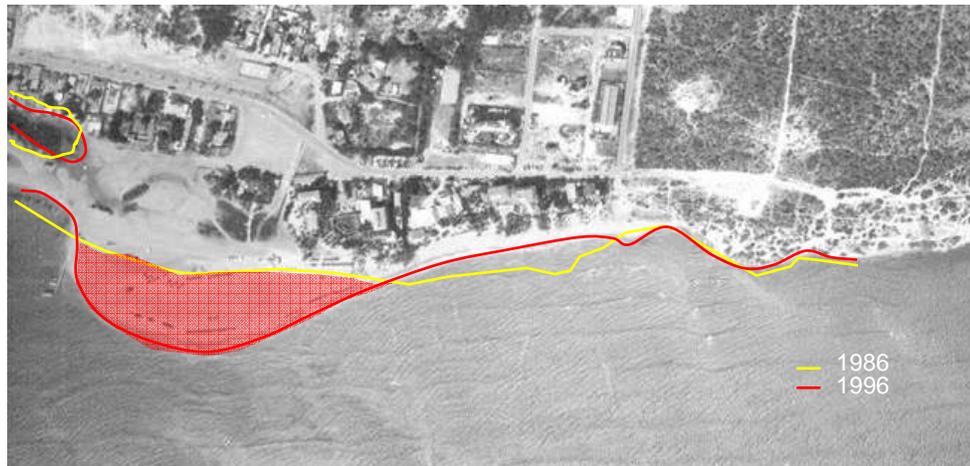


Figura 4.9. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Comparación de Fotografías aéreas Año: 1996 y línea de costa 1986.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

4.1.4 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 1996-2000.

Para los años 1997 y 1998 existe una gran berma de arena que cubre la playa al frente de los hoteles, adicionalmente existe un cambio en la cantidad de vegetación que no es autóctona de esa zona, como las Palmeras *Everglades* o *Paurotis* de origen caribeño que comienzan a ser sembradas cercanas a la línea de costa.

El Este de la costa se presenta muy similar en estos dos años, con muy pocas variaciones en su forma, salvo en el año 1998, la sedimentación que se venía dando en la zona central de la playa llega a su máxima expresión, al otro extremo de la playa en las proximidades al morro se muestra una zona arenosa o barra sumergida de poca profundidad.

Las praderas de fanerógamas (*Thalassia Testudinum*) se pueden observar por el cambio de coloración del agua de claro a oscuro, y están ubicadas cercanas a la orilla de esta barra de arena, siempre hacia el lado occidental de la playa. (Ver Figura 4.10 y 4.11)



Figura 4.10. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque. Año 1997. Fuente Foto: ASOYAQUE

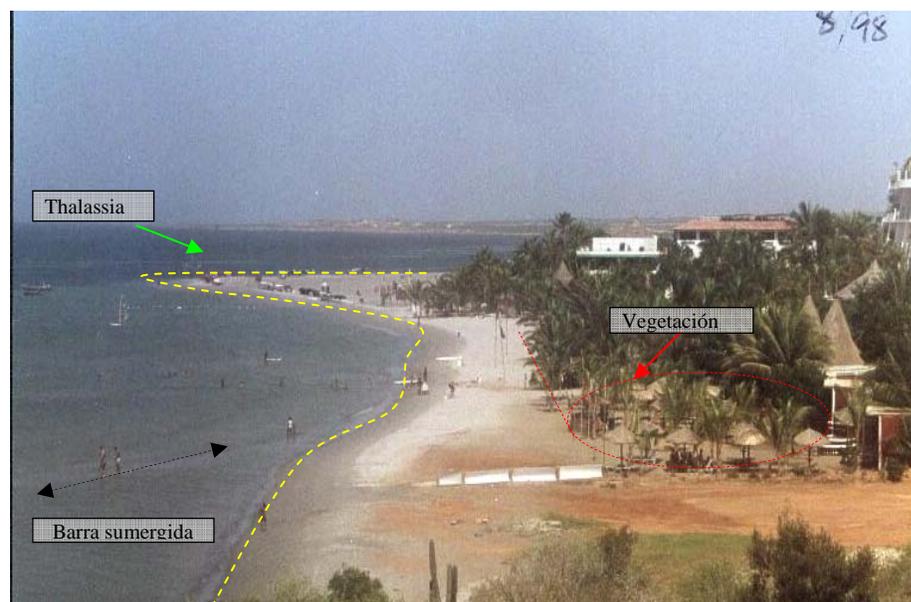


Figura 4.11. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque. Año 1998. Fuente Foto: ASOYAQUE

Para el año 2000 se contó con información de campo de la línea de costa, adquirida a través de instrumentos de posicionamiento satelital global (GPS), las cuales fueron tomadas por el grupo de trabajo de la Fundación La Salle EDIMAR, en la seccional de la Isla de Margarita. Esta línea de costa

permite apreciar el proceso erosivo que ha sufrido la costa, especialmente la zona Central, donde el lóbulo que se formó en el año 1996, retrocedió su frente hacia el mar en 90 m aproximadamente, así como la berma en la parte oriental de la playa sufrió una disminución que comprende la zona donde se concentran la mayoría de los hoteles.

En la parte central se erosionan alrededor de 29.189 m², siendo transportados estos sedimentos hacia el Oeste, lo que incrementa la longitud y el área de la lengüeta, formándose un apéndice en el extremo, que se extiende por más de 300 m con ancho promedio de 15m, lo que constituye un área sedimentada de 4.633m², por su parte, la lengüeta occidental disminuye su tamaño, debido al crecimiento de la oriental que impide el paso libre de sedimentos hasta esta zona, lo que hace que se erosione por efectos del viento y el oleaje. (Ver Figura 4.12).



Figura 4.12. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Comparación de Fotografías aéreas Año: 1996 y 2000
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Sin embargo se mantiene todavía una porción importante de área que comprende la zona Central de la playa con arena donde están colocadas

algunas plantaciones de palmeras y construcciones turísticas como churuatas de palma seca con suficiente berma para el uso turístico.

Adicionalmente la lengüeta del lado occidental se alarga hacia el Noreste, siguiendo el patrón de dirección de las anteriores. La obra que se mantiene en condiciones activas es el Muelle Turístico colocado en la parte Oeste de la zona Central de la playa.

4.1.5 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2000-2003.

Entre los años 2000 y 2001 la franja de playa en las inmediaciones de El Morro se ve acrecentada debido a un proceso sedimentario que se viene dando en esta zona. Sin embargo al Oeste gran parte del lóbulo que se observaba en años anteriores para esta fecha sigue disminuyendo su tamaño, esto se puede observar al comparar, la secuencia de fotos del año 1998 con la del 2001 y 2002 donde es notable la pérdida de esta zona de la playa. (Ver Figura 4.11; 4.13 y 4.14).

Para este último año se observa en la zona central, una mayor densificación en la vegetación, la cual fue sembrada con palmeras en formación cerrada cercanas a la costa, se observa que esto ha afectado la morfología de esta zona, lo que indica que sin un estudio previo, la colocación de vegetación puede producir efectos de sedimentación y erosión como se visualiza en la fotografía de el año 2001 y 2002. Adicionalmente para los años 2001 y 2002 se observa que la berma de la playa ha retrocedido con respecto a años anteriores.



Figura 4.13. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque. Año: 2001. Fuente Foto: ASOYAQUE



Figura 4.14. Vista de la Línea de Costa desde el morro. El Yaque. Año: 2002. Fuente Foto: ASOYAQUE

Seguidamente el año 2002, se mantiene sin muchos cambios con respecto al año 2001, donde el ancho de playa conserva su tamaño frente a

los hoteles, con una vegetación tupida cercana a la línea de costa. (Ver *Fotografía 4.1 y 4.2*).



Fotografía 4.1. Vista de la Línea de Costa desde la playa lado Oeste. Año:2002. Fuente: ASOYAQUE



Fotografía 4.2. Vista de la Línea de Costa desde la playa lado Este. Año:2002. Fuente: ASOYAQUE

En vista del proceso erosivo que se ha venido presentando, a mediados del año 2002 los habitantes de la zona preocupados por la situación, elaboraron una serie de obras hidráulicas emergentes para la protección de la costa y mediar la erosión que ponía en riesgo las construcciones turísticas.

Dichos pobladores tomaron como solución, el colocar una batería de mini espigones elaborados con sacos de arena, en diferentes puntos de la costa, estas obras fueron paralizadas por no contar con un proyecto avalado por un organismo o institución de profesionales que lo sustentara.

Los mini-espigones fueron elaborados con una serie de sacos de arena y una configuración del tipo trapezoidal, los cuales poseen una distancia aproximada de 20 m. desde la costa hacia el mar. (Ver *Fotografía 4.3 y 4.4*).



Fotografía 4.3. Sacos de arena para mini-espigones.
Fuente: EDIMAR



Fotografía 4.4. Mini-espigones de sacos de arena sector El Yaque.
Fuente: EDIMAR

Aunque existen indicios de espigones de sacos de arena con más de 40 m. ubicados en la parte Central de la costa, a pesar de ser una alternativa, es importante a la hora de su implementación conocer los efectos que producen sobre la forma de la línea costera. La utilización de una batería de espigones tiene como consecuencia, que el efecto de erosión de cada espigón se va sumando, provocando al final una erosión mayor que la producida por un solo espigón del mismo tamaño, ocasionando una mayor pérdida de sedimentos y por consiguiente el efecto contrario a lo deseado

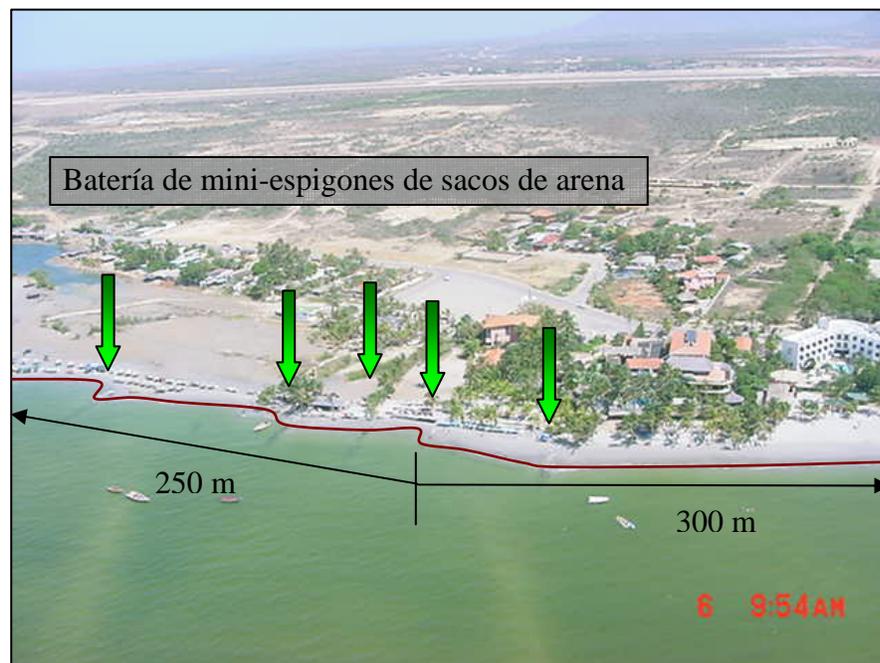


Figura 4.15. Recuperación y Erosión desde el lado Este al Oeste de la Playa .El Yaque. Año:2002.

Fuente Foto: ASOYAQUE

Estas obras produjeron un beneficio parcial y momentáneo en los lugares donde fueron colocados, ya que solo funcionan para un pequeña área, al ser sumergidos sufren los embates de la energía del oleaje, lo que hace que se pierda su acción en corto tiempo por colmatación o ruptura de sus contenedores, necesitando un mantenimiento constante, lo que no lo hace una solución viable para recuperar una playa a largo plazo. (Ver Figura 4.15).

Para el año 2002 se realizó un reconocimiento aéreo auspiciado por las personas afectadas, donde se pueden observar las obras hidráulicas colocadas para esta fecha y la influencia que han tenido sobre la costa, al mismo tiempo de mostrar una visión panorámica del área de estudio y las zonas que la conforman. (Ver Figura 4.16).

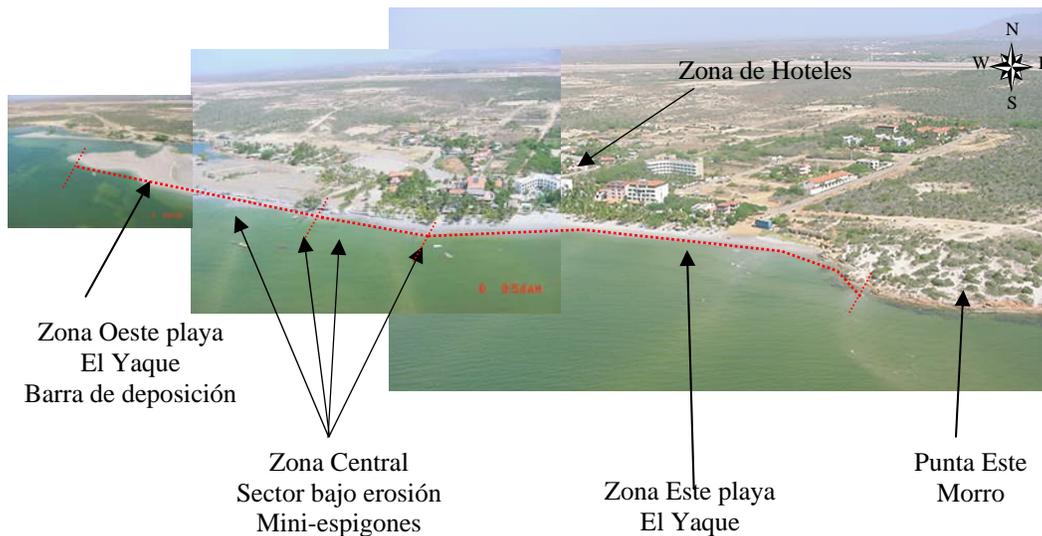


Figura 4.16. Ubicación de mini-espigones en Sector Central y Oeste El Yaque. Año:2002 . Fuente Foto: Ing. Roberto Savelli

Por otra parte se observa que existe una marcada recuperación de la costa al Este de la playa, desde El Morro hasta las proximidades del hotel *Jump'n Jibe*, con una distancia aproximada de 300 m y al Oeste de este hotel, frente al hotel *The Winds* se observa una marcada erosión la cual se extiende hacia el Oeste de la playa, hasta el sector donde está ubicado el Muelle Turístico, la franja de costa afectada por esta erosión tiene una longitud aproximada de 250 m.

En cuanto a la lengüeta, respecto al periodo 2000 - 2003 continúa el proceso de sedimentación de la lengüeta oriental, sedimentándose un área de 17.755 m² en tan solo 3 años, el apéndice que se observaba en el año 2000 es erosionado por completo, formándose una nueva lengüeta, que crece con una orientación diferente, su longitud total para esta fecha es de 520 m aproximadamente, parte de los sedimentos que conforman esta nueva lengüeta son los provenientes de la erosión producida por los espigones de bolsas de arena colocados en la zona central de la playa.



Figura 4.17. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año: 2000 y 2003. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

4.1.6 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2003-2004.

Para el año 2003 se presenta una costa con un proceso erosivo más marcado con respecto al de años anteriores, especialmente en la zona Este y central de la playa, y una sedimentación del lado Oeste, consolidando la formación de la lengüeta.

La erosión presentada en forma agresiva, produce un considerable retroceso de la línea de costa en el lado Este de la playa, por lo que la

infraestructura turística hotelera sufre las consecuencias, siendo destruidas partes de las instalaciones que los conforman, al mismo tiempo sufren daños los sembradíos de palmeras que se encuentran en la proximidad de la línea de costa, las cuales al ser removida la arena que se encuentra en su base por efecto de la erosión, descubre sus raíces perdiendo sustentación. (Ver Figura 4.5 y 4.6).



Fotografía 4.5. Erosión de Línea de Costa lado Este El Yaque. Año: Julio- 2003. Fuente: ASOYAQUE



Fotografía 4.6. Daños por erosión de arboleda sector Oeste. El Yaque. Año: Julio-2003. Fuente: ASOYAQUE

El efecto negativo que tiene la erosión al frente de los hoteles, se hace notar en las instalaciones aledañas a la playa, donde comienza a socavarse las bases de las caminarias, produciendo su colapso, siendo esto un factor de peligro para los turistas y personas que circulan por la zona. (Ver Figura 4.7).



Fotografía 4.7. Daños por erosión en caminería sector Este. El Yaque. Año: Julio-2003. Fuente: ASOYAQUE

Para este periodo, se colocaron obras de mayor consistencia y envergadura sustentados por evaluaciones técnicas del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) para ser usada de manera temporal, la función era recuperar el ancho de la costa que se reducía considerablemente, debido a la agresiva erosión que se produjo y afectaba de manera directa a las instalaciones y a los turistas que frecuentan esta playa.

Se consideraron construir 3 espigones tablestacados de madera en puntos específicos:

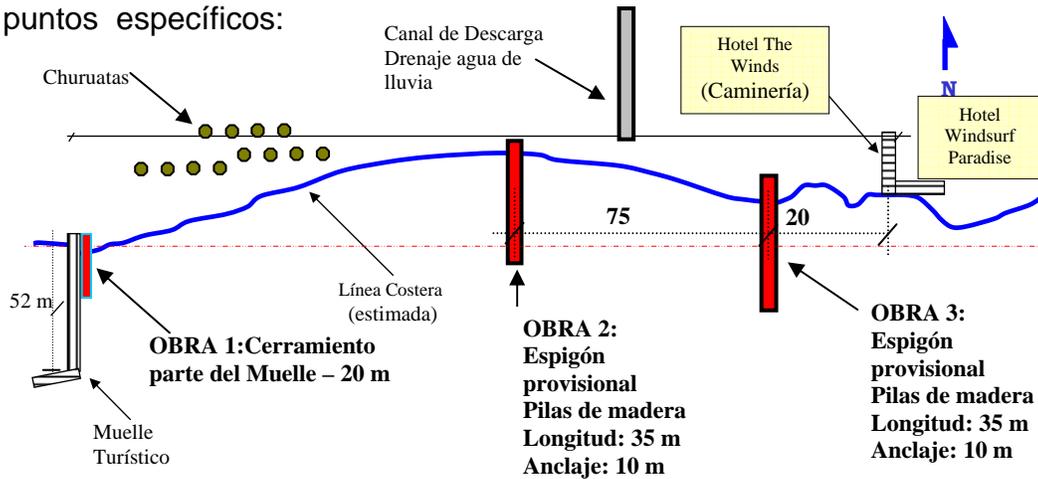


Figura 4.18. Ubicación de espigones sector Playa El Yaque
 Año: Septiembre-2003 Fuente: LNH

Para la elaboración de estas obras se utilizaron elementos constructivos de uso provisional, para poder efectuar un estudio más detallado de lo que estaba ocurriendo y poder implementar una obra definitiva. Para este tipo de espigón, se consideró el diseño del tipo tablestacado de madera amordazada en ambos lados, por pilotines de madera hincados a diferentes profundidades.

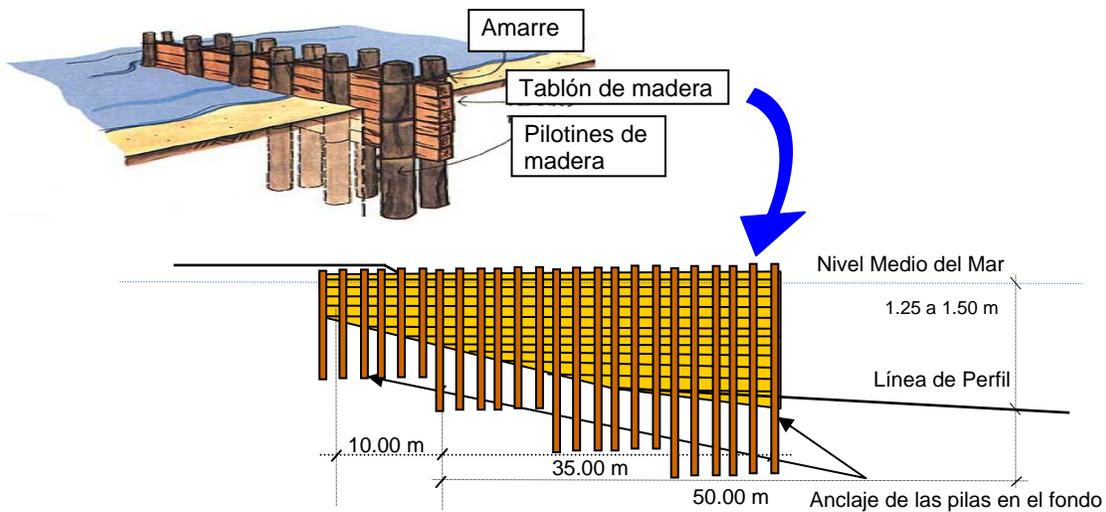


Figura 4.19. Detalle constructivo de espigón año: Septiembre-2003.
 Fuente: LNH.

La configuración de las obras fue determinada de la siguiente forma:

Tabla 4.1. Conformación de las obras provisionales de madera

Obra N° 1 (Espigón #1): Obra de 20 m de longitud desde la costa, adosada al Muelle Turístico, con superficie cerrada.

Obra N° 2 (Espigón #2): Obra de 35 m de longitud con anclaje de 10m en la costa diseñada para ser colocada a 95 m hacia el oeste desde el hotel The Winds.

Obra N° 3 (Espigón #3): Obra de 35 m. de longitud y anclaje de 10 m. dentro de la costa, para ser ubicada a 20 m al oeste del hotel The Winds.

Esas obras fueron culminadas para mediados del mes de septiembre del 2003, donde se presenta una recuperación notable a las dos semanas siguientes de la colocación de estas obras, como se puede observa en la secuencia de figuras desde 4.20 hasta 4.22.

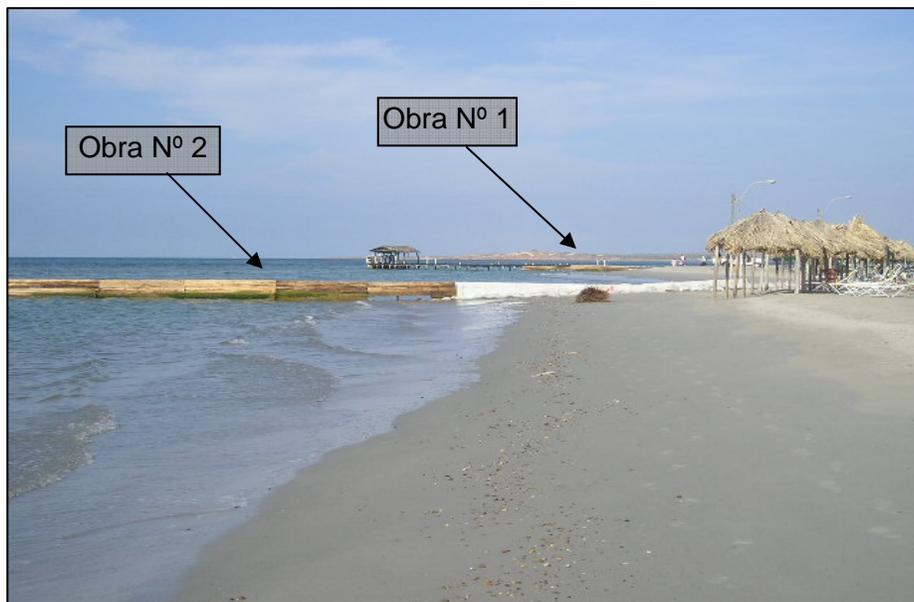


Figura 4.20. Recuperación en Línea de Costa sector Oeste El Yaque. Año: Septiembre-2003. Fuente Foto: ASOYAQUE



Figura 4.21. Recuperación en Línea de Costa sector Este El Yaque. Año: Septiembre-2003. Fuente Foto: ASOYAQUE



Figura 4.22. Recuperación lado Oeste de la playa Espigón N° 2 El Yaque. Año: Septiembre2003. Fuente Foto: ASOYAQUE

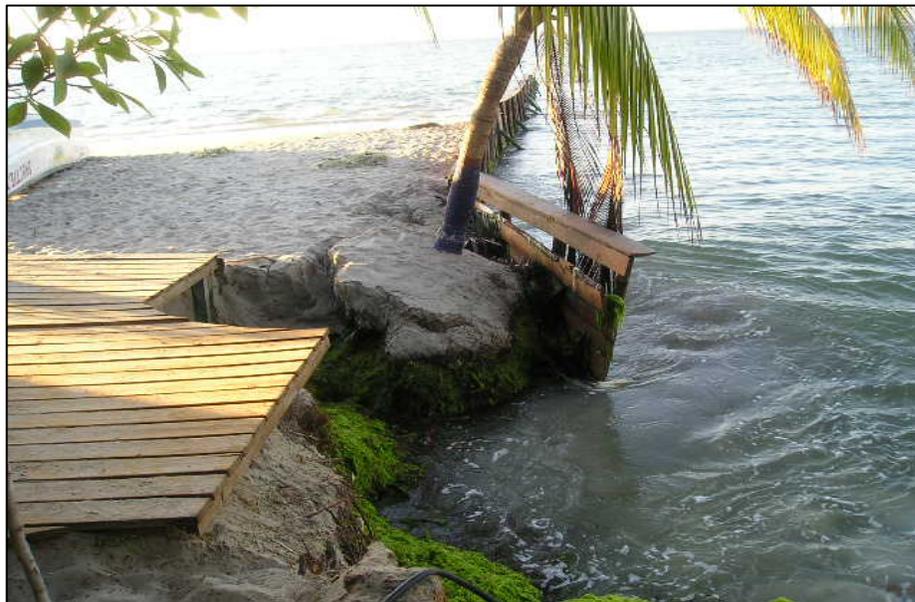
La información obtenida por parte de personas encargadas de hacer un seguimiento de las obras indicaron que para el espigón N° 1 (Muelle

Turístico) la recuperación fue de 8 m. en ancho de playa, para el espigón N° 2 (entre el Muelle Turístico y hotel The Winds) lo recuperado fue de 4 m. y para el espigón N° 3 (hotel The Winds) fue de 2 m, lo que evidencia que hacia la zona del espigón N° 1 existe un mayor movimiento de sedimentos.

Al comparar la información técnica suministrada por el LNH y las obras ejecutadas, hay que hacer notar, que en éste caso se hicieron modificaciones al diseño original de estas obras, en las cuales no se utilizaron los materiales, ni se adopto la forma constructiva que se planeó.

Se usaron tablas adosadas solo a un lado de los pilotines hincados, adicionalmente el material no contaba con las dimensiones adecuadas ni los anclajes o amares especificados.

La ubicación de la obra N° 3 no fue colocada en el punto que inicialmente se había destinado para este fin (20 m. al oeste del hotel The Winds), lo que cambio el resultado que se había estimado inicialmente.



Fotografía 4.8. Efecto erosivo lado Este de la playa Espigón N° 3. El Yaque. Año: Noviembre 2003. Fuente: ASOYAQUE

La mala elaboración de estas obras trajo como consecuencia que su vida útil fuera muy corta, cediendo a los embates del oleaje y a la presión que ejercía la masa de sedimento atrapado sobre las paredes de madera de los espigones, adicionalmente las condiciones climáticas produjeron daños a estas obras como fue el caso, de los coletazos de viento del huracán Iván cerca de las costas Venezolanas donde la obra número 3 es dañada. (Ver *Fotografía 4.8*).

A pesar de ser instalado 20 m al Oeste de su ubicación original, es evidente la recuperación de la zona Este de la playa debido al espigón N° 3, donde ha aumentado el ancho de la franja de playa que comprende la berma.



Figura 4.23. Efecto de sedimentación al Este del espigón N° 3 El Yaque. Año: 2003 y 2004. Fuente: ASOYAQUE

Desde la caminería del hotel The Winds se puede observar la cantidad de sedimento atrapado por el espigón colocado en el sitio, confirmando su funcionamiento, sin embargo la colocación en ese punto no adecuado producía un daño no considerado, que es la erosión que ocasionan este tipo de estructuras al lado opuesto del transporte de sedimentos. (Ver *Fotografía 4.9*).



Fotografía 4.9. Efecto de retención de sedimentos Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004. Fuente: Anónima

Al Oeste del espigón N° 3, se puede observar una erosión debida al efecto que produce esta obra, donde el oleaje que incide contra la costa arrastra los sedimentos produciendo el transporte litoral, el oleaje va tomando el sedimento que se transporta a lo largo de la costa, al verse interrumpido este paso de sedimentos, el oleaje toma el sedimento disponible ocasionando la erosión. (Ver Fotografía 4.10 y 4.11)



Fotografía 4.10. Efecto erosión al Oeste del Espigón N° 3 El Yaque. Año: Noviembre 2003. Fuente: ASOYAQUE



Fotografía 4.11. Efecto erosivo lado Oeste de la playa Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004. Fuente: ASOYAQUE

La amplitud de la erosión presentada depende directamente de la longitud del espigón, mientras mas largo mayor será la erosión ocasionada, debido al sentido que proviene el transporte litoral, la cantidad de sedimento depositado es equivalente a la cantidad de sedimento perdido en la cara opuesta de la estructura. En la *Figura 4.24* se puede observar una representación gráfica de este efecto.

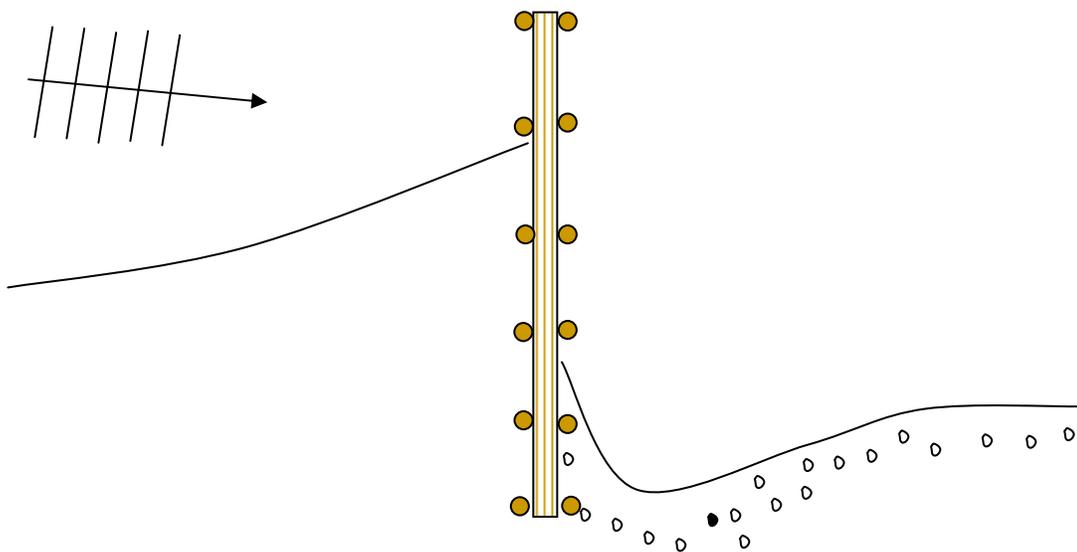


Figura 4.24. Representación gráfica del efecto producido por el espigón



Fotografía 4.12. Lado Oeste del Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004. Fuente: ASOYAQUE

Para esta fecha la erosión, afecta directamente esta parte de la costa siendo las plantas sembradas en esta zona las más afectadas, produciendo un efecto contraproducente al ser colocadas muy cercanas de la línea de costa, ya que incrementa el proceso erosivo, lejos de lo se piensa, sus raíces multifilares colaboran con la erosión del suelo. En la siguiente secuencia de fotos se puede apreciar el efecto del espigón N° 3 al Oeste de la costa. (Ver *Fotografías 4.12 al 4.15*).



Fotografía 4.13. Efecto erosivo lado Oeste de la playa en base del Espigón N° 3 El Yaque. Año: Enero 2004. Fuente: ASOYAQUE



Fotografía 4.14. Efecto erosivo lado Oeste de la playa en base de Espigón N° 3 El Yaque. Año: Febrero 2004. Fuente: ASOYAQUE



Fotografía 4.15. Efecto erosivo lado Oeste de la playa por efecto de palmeras cercanas a la orilla. El Yaque. Año: Febrero 2004. Fuente: ASOYAQUE

La lengüeta para el año 2004, incrementa su longitud en 100 m hacia el Oeste, aumentando el área sedimentada en 15.624 m², se evidencia al Este de la lengüeta una mayor erosión, provocada por los espigones de madera y de sacos de arena que se mantienen en la zona, estas áreas erosionadas son las que moldearan la lengüeta en su frente hacia el mar. Lo que queda de la lengüeta occidental es un pequeño apéndice de 250 m que se une a tierra firme por el caserío de pescadores. (Ver Figura 4.25).



Figura 4.25. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas . Año: 2003 y 2004 Fuente Foto: GOOGLE EARTH

4.1.7 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2004-2005.

Para este periodo la línea de costa del año 2005 presenta diversas variaciones con respecto a la forma de la línea de costa del año 2004, al compararla podemos observar que existen cambios considerables, especialmente, en la zona central y la lengüeta, donde el área de esta última se incrementa en 19.892m², manteniendo la misma dirección de años anteriores, alargándose 70 m hacia el oeste, para terminar con una longitud

total de 660 m desde su unión con la costa; esta se encuentra rodeada por aguas poco profundas (entre 0,5 y 1,5 m), estas aguas por su claridad y poca profundidad son promotoras del crecimiento de praderas de thalassia, las cuales tienen la particularidad de colaborar con el proceso de sedimentación, por atrapar los granos de arena que son movidos por el transporte litoral y normal a la costa.



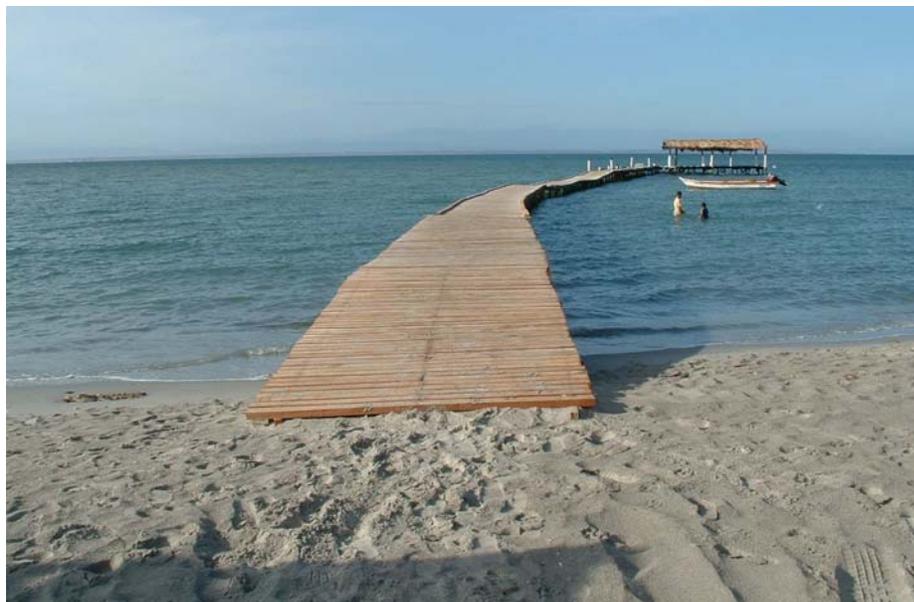
Figura 4.26. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Año: 2004 y 2005. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

La forma de la lengüeta está condicionada a los procesos de erosión y sedimentación de la zona, los espigones de madera como los de sacos de arena, para esta fecha han erosionado un área de aproximadamente 5.460 m² especialmente el Espigón N° 1, en el cual hay mayor pérdida de sedimentos, por estar colocado en una zona compuesta únicamente de arena, además de ser el último de la batería de espigones que se forma, erosionado 7.370 m², desde que fue colocado. (Ver Figura 4.26).

Esta erosión se evidencia en las modificaciones que se le han realizado a el muelle para mantenerlo unido a tierra firme como se evidencia en las Fotografías 4.16 y 4.17.



Fotografía 4.16. Destrucción parcial del Muelle Turístico de playa El Yaque por efecto del oleaje y la falta de sujeción a la costa.
Año: 2004 Fuente: ASOYAQUE



Fotografía 4.17. Reconstrucción del muelle Turístico de playa El Yaque.
Año: 2004 y 2005. Fuente: ASOYAQUE

En los primeros meses del año 2005 se pudo observar que hubo cierta recuperación de la línea costera hacia el lado Este de la playa, debido a que fue reconstruido el espigón N° 3, el cual fue deteriorándose con el tiempo y terminó colapsando con los embates de los coletazos de vientos del huracán Iván en su paso por el Caribe.

Los pobladores de la zona reconstruyeron el espigón N° 3 colocando una estructura cerrada tipo cajón, de ancho considerable el cual permite el paso de personas y su uso como muelle o atracadero de embarcaciones de bajo calado. Esta obra cumple la misma función que su antecesor, la cual es la de retener el sedimento transportado por el oleaje de manera de restituir la costa Este de la playa, sin embargo, aunque pudiendo ser utilizado como muelle, para atracadero de embarcaciones, no se le da comúnmente este uso, subutilizando la estructura existente. (Ver Figura 4.18).



Fotografía 4.18. Reconstrucción de Espigón N° 3 en playa El Yaque.
Año: Mayo 2005. Fuente: ASOYAQUE

En las figuras siguientes puede observarse como ha cambiado la costa desde el mes de noviembre del 2004 hasta mayo del 2005, siendo posible observar una recuperación significativa de la berma de la playa del lado Este con respecto al año anterior, donde el área de arena se ha ampliado considerablemente debido a la implementación de la nueva obra denominada Muelle -Espigón.



Figura 4.27. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año: Noviembre 2004. Fuente: Foto ASOYAQUE.



Figura 4.28. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año: Mayo 2005. Fuente: Foto ASOYAQUE.

Por otro lado, parte de la vegetación de la zona Este muy cercana al Muelle-Espigón (Espigón N° 3) se ha perdido, sin embargo, la acción correctiva de la costa que realiza la estructura es notable. (Ver Fotografía 4.19).



Fotografía 4.19. Vista transversal de la zona Este de playa El Yaque. Año: Mayo 2005. Fuente: ASOYAQUE.

Para finales del mes de junio y comienzos de julio del 2005 se realizó la visita técnica para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado, en donde se comenzó por hacer un reconocimiento general de la situación presentada. Se estableció un cronograma de trabajo para lograr recabar la mayor cantidad de información posible, en la cual se realizaron varias mediciones de la línea de costa en el tiempo que duro la visita.

Aquí se pudo evidenciar que para ese mes hubo una retracción de la línea costera en la parte Este de la playa, sin embargo, la retracción fue en una parte de ésta zona de la playa que se encuentra entre el morro y el

espigón N° 3 (playa frente a los hoteles), ya que la parte cercana a la punta de éste espigón existía una sección sedimentada. (Ver Figura 4.29).



Figura 4.29. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque.
Año: Junio 2005. Fuente Foto: ASOYAQUE

La pérdida de la arena en la línea de costa obligó a que los propietarios tomaran medidas correctivas para colocar algunas obras como caminerías y escalinatas para mantener la circulación de personas por la playa, sin embargo el proceso erosivo que se viene dando en la parte posterior del Muelle-Espigón (antiguo Espigón N° 3) se incrementó produciendo daños en estas obras cercanas a la costa. (Ver Figura 4.30 4.31).

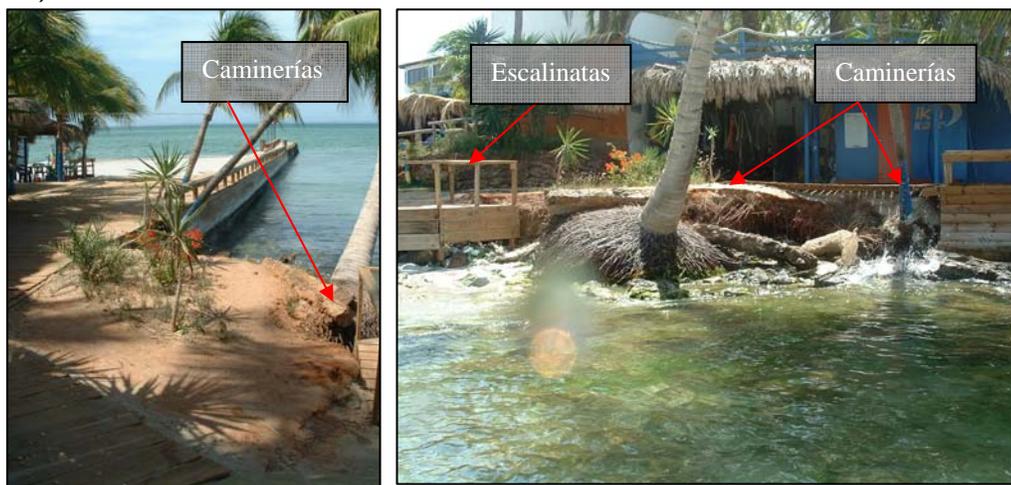


Figura 4.30. Parte posterior del Muelle - Espigón hacia Espigón N° 2
Año: 2005. Fuente Foto: PROPIA



Figura 4.31. Costa de la zona Central de playa El Yaque.
Año: Junio 2005. Fuente Foto: PROPIA

La corta duración de las obras implementadas en 2003, ocasionó que se produjera hacia el Oeste del Muelle-Espigón una erosión generalizada, esto se puede observar comparando la línea obtenida en campo del año 2004 donde se mostraba una notable recuperación. (Ver Fotografía 4.20).



Fotografía 4.20. Línea de Costa de la playa vista desde la zona Central hacia Muelle -Espigón El Yaque. Año: 2005. Fuente: PROPIA

En este período el espigón N° 2 se perdió completamente y solo queda un esqueleto en pie que no tiene ninguna función. (Ver Fotografía 4.21)



Fotografía 4.21. Estado en que se encuentra Espigón N° 2
Año: 2004. Fuente: PROPIA.

En la zona Oeste que comprende la parte del Muelle Turístico hacia la lengüeta occidental podemos observar que existe diferentes escalones en la parte de la arena lo que identifica la erosión sufrida por los altos y constantes embates del oleaje hacia la orilla produciendo a su vez está pérdida de sedimento considerable en cuestiones de horas. (Ver Fotografía 4.22).



Fotografía 4.22. Línea de Costa de la zona Oeste de playa El Yaque (lengüeta Occidental). Año: 2005. Fuente: PROPIA

Por el lado del muelle, una erosión más agresiva permitió mover una porción importante de arena la cual afecta las infraestructuras ubicadas alrededor de esa franja, lo que motivo nuevamente a los pobladores, tomar la iniciativa de reconstruir los espigones de sacos de arena de manera que vuelvan a sedimentar esta área, sin tomar en cuenta que esta solución, solo empeorara esta situación, debido al efecto erosivo que produce este grupo de espigones. (Ver Fotografía 4.23).



Fotografía 4.23. Línea de Costa de la zona central hacia Muelle Turístico de playa El Yaque. Año: junio 2005. Fuente: PROPIA

4.1.8 Evolución de la línea de costa y descripción de la zona. Período 2005-2006.

Para finales del año 2006 se realizó la última medición de la costa, al compararla con el año anterior, se observó que se produjo un proceso de sedimentación moderado en la zona Este de la playa.

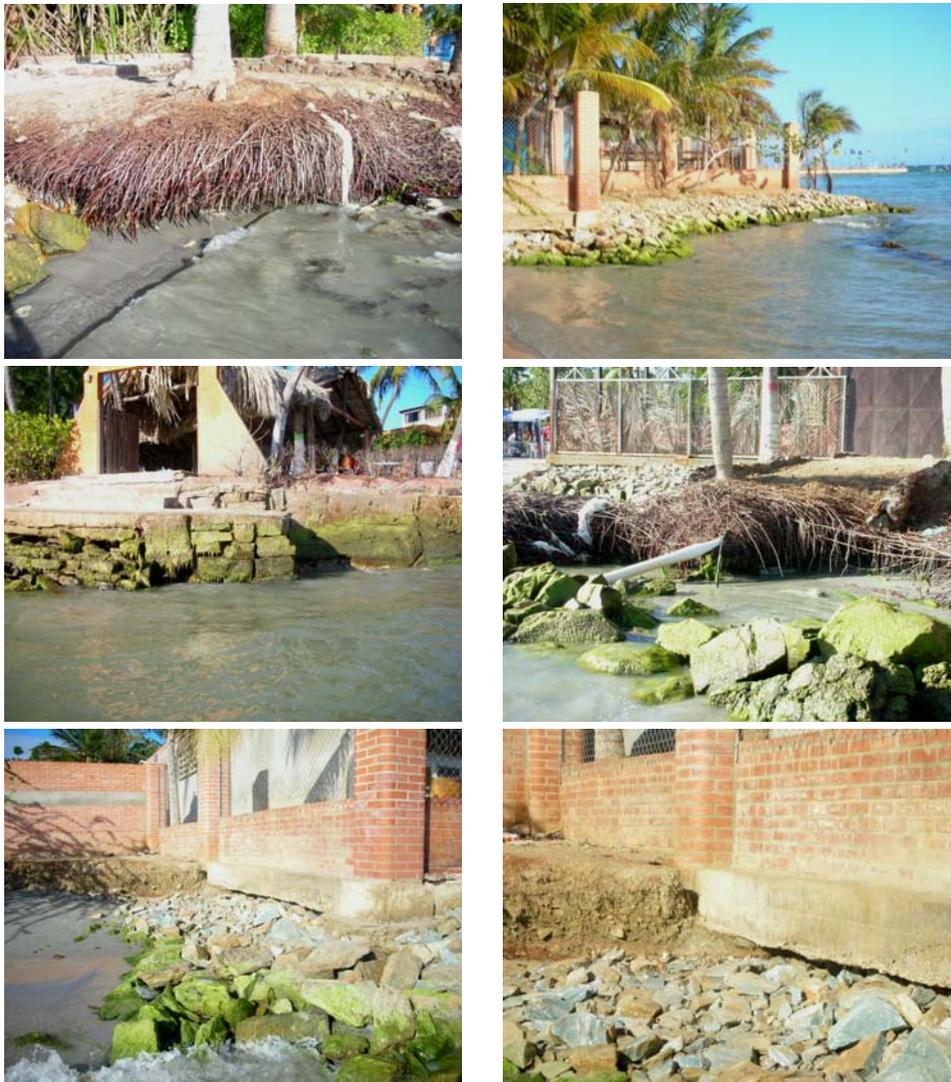


Figura 4.32. Línea de Costa de la zona de playa El Yaque. Comparación de Fotografías aéreas Año: 2005 y 2006. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Al occidente del Muelle-Espigón continúa la erosión, desapareciendo la franja de arena que separaba las edificaciones de la línea de costa, lo que colocó en una situación delicada a algunas infraestructuras de esa zona, donde se socavaron sus bases, por lo que se tuvo que realizar un enrocado para disipar la energía del oleaje y poder disminuir este proceso erosivo. Esta medida emergente no resuelve el problema, solo es una solución temporal, ya que ese mismo obstáculo va ir perdiendo su utilidad con el tiempo a medida que se socaven nuevamente sus bases. En la serie de fotos siguiente se pueden observar la zona afectada y las medidas implementadas para disminuir este proceso.



Fotografía 4.24. Línea de Costa actual de la zona central de playa El Yaque. Año: 2006 Fuente: PROPIA



Fotografía 4.25. Obras de protección a infraestructuras turísticas ubicadas en la orilla de playa El Yaque. Año: 2006. Fuente: PROPIA

En marzo del 2006 es eliminado el muelle turístico y colocado a 70 metros al oeste un muelle cerrado tipo cajón con un ángulo respecto a la costa SE, diferente al muelle turístico anterior cuya dirección era Sur franco.



Fotografía 4.26. Línea de Costa actual de la zona central de playa El Yaque. Año: 2006 Fuente: PROPIA

Se puede observar en la *Fotografía 4.26* el efecto producido por el nuevo Muelle Turístico, el cual ha generado una sedimentación considerable hacia su lado Este y en la misma proporción se observa hacia su lado Oeste una ausencia similar de sedimentos. Lo que implica que este muelle está funcionando como un espigón o trampa de arena, esto se debe a que su construcción cerrada detiene los sedimentos que son transportados a lo largo de la costa.

Este efecto produjo que la línea de costa se erosionara un área aproximada de 22.028 m² hacia el Oeste y sedimentara un área aproximada de 19.786 m² hacia el Este, incrementando la longitud de la lengüeta adicionalmente en 220 m aproximadamente, de los cuales 100 m se encuentran cubiertos por una capa de agua de 0.2 a 0.3 m, la longitud total

de la lengüeta para este año es de 880 m desde su unión con la costa. En la serie de fotos siguientes se puede apreciar el socavamiento del anclaje de este nuevo Muelle Turístico y el crecimiento de la lengüeta al final de la playa.



Fotografía 4.27. Erosión de la Línea de Costa de playa El Yaque debido al Nuevo Muelle Turístico Año: 2006. Fuente: PROPIA



Fotografía 4.28. Prolongación de Línea de Costa de la zona de playa El Yaque en la lengüeta Año: 2006. Fuente: PROPIA

En cuanto a la colocación del Muelle Turístico Nuevo, su colocación con una inclinación diferente a la de los demás espigones, acentuó la erosión al Oeste de éste, socavando su anclaje a la costa. (Ver Figura 4.33).

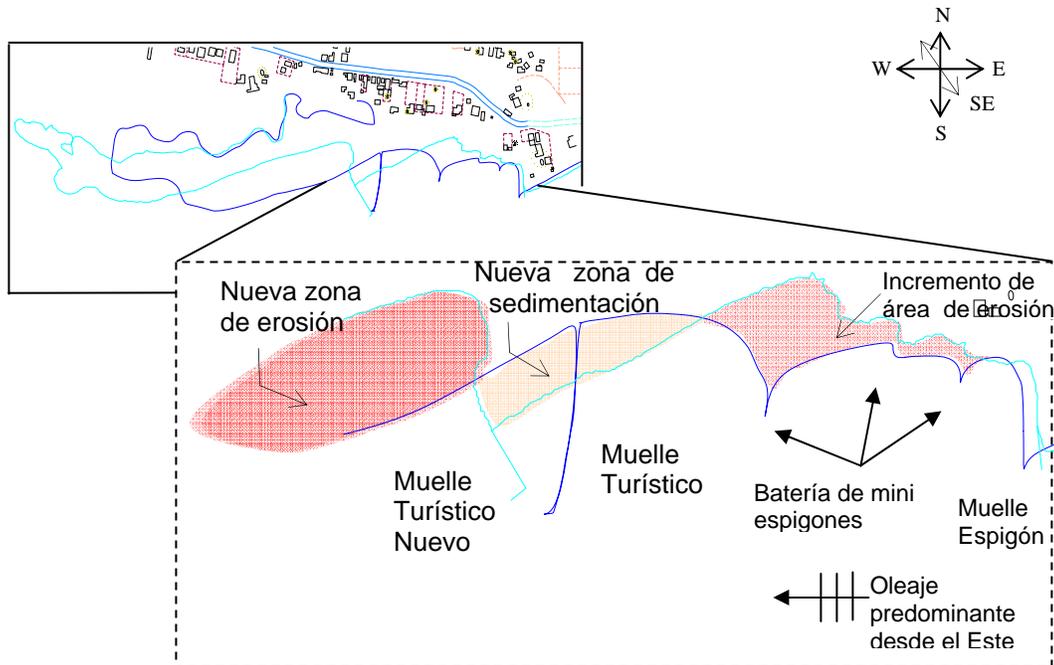


Figura 4.33. Zonas de erosión y sedimentación de la zona de playa El Yaque. Año: 2006.

La eliminación de las baterías de mini espigones colaboró a que se acentuara la erosión al Oeste del Muelle-Espigón colocado en el año 2005 dentro de la zona Central.

4.2 RELACIÓN EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN O TASAS DE SEDIMENTACIÓN

El proceso erosivo-sedimentario existente en la costa de playa el Yaque, es un proceso natural del movimiento de los sedimentos, que se ha venido dando durante años en esta zona, esto se pudo corroborar haciendo un seguimiento de la costa desde el año 1972 hasta finales del 2006. Para esto se utilizaron mapas cartográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales de diferentes periodos, las cuales fueron montadas y adaptadas entre sí, evidenciando las áreas de la costa que se han movido, desaparecido o emergido, pudiéndose cuantificar sus áreas con la ayuda de un sistema CAD. (Ver Tabla 4.2)

Tabla 4.2. Balance anual de áreas sedimentadas-erosionadas en la zona

Período año	Erosión m ²	Sedimentación m ²	BALANCE m ²
1972 – 1980	11.598,82	76.713,39	+65.114,57
1980 – 1987	45.351,74	15.795,66	-29.556,08
1987 – 1996	8.971,82	27.766,29	+18.794,47
1996 – 2000	38.515,84	4.650,81	-33.865,03
2000 – 2003	23.038,45	17.755,44	-5.283,01
2003 – 2004	2.958,5	16.272,62	+13.314,12
2004 – 2005	8.031,13	24.645,02	+16.613,89
2005 – 2006	33.742,43	29.184,4	-4.558,03

Estos periodos determinan drásticos cambios sedimentarios ocurridos durante los últimos 30 años, los cuales se pudieron representar en un gráfico donde se visualizan las cantidades de arena erosionada y sedimentada para los diferentes años de los que se dispone información ver *Gráfico 4.1*.

Valores de sedimentación – erosión por períodos

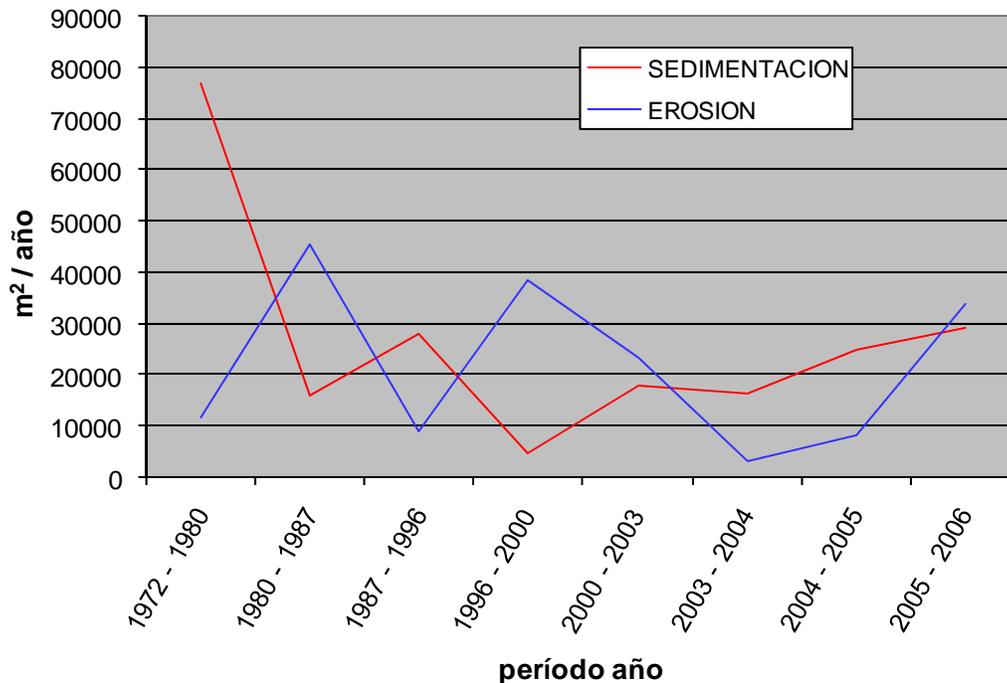


Gráfico 4.1. Proceso erosivo y sedimentario por períodos de la playa El Yaque.

Este gráfico nos permite establecer una relación entre los diferentes periodos, pudiéndose establecer cuáles de ellos son erosivos y cuales sedimentarios.

Se promediaron las cantidades totales de sedimentación y erosión de cada periodo y se dividió entre el número de años que éste abarca, para poder obtener así una aproximación de los valores, dando como resultado una gráfica anual. (Ver Gráfico 4.2.).

Relación erosión sedimentación anual

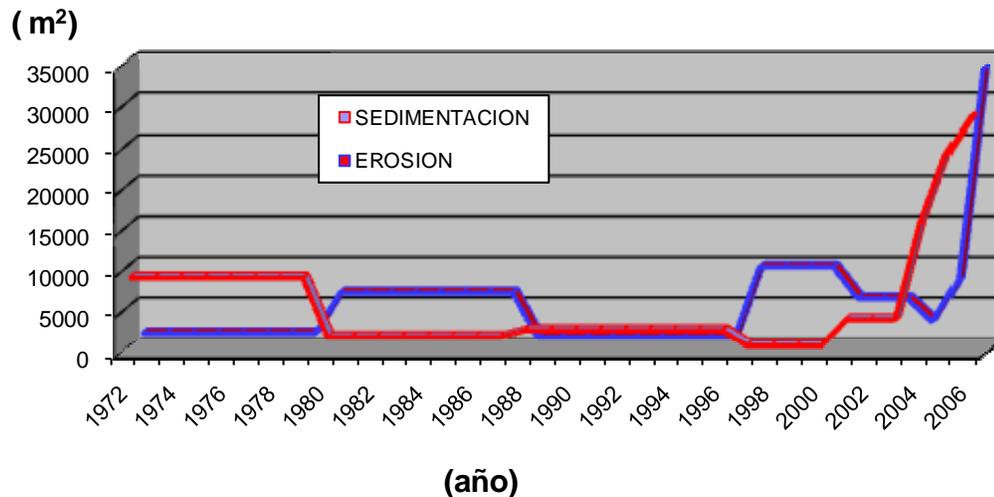


Gráfico 4.2. Proceso erosivo y sedimentario anual de la playa El Yaque.

En esta grafica se pueden distinguir cinco eventos claramente diferenciados, el primero podemos suponer que se inicia en el año 1972, donde la costa presenta pocos depósitos de arenas teniendo una forma lineal y continua y culmina alrededor del año 1980, donde se evidencia una fuerte sedimentación a lo largo de toda la costa; este periodo se caracterizo por formar grandes extensiones de playa, emergiendo alrededor de $10.000\text{m}^2/\text{año}$, formándose en este período tres grandes acumulaciones de arena en la zona este, media y oeste de playa el Yaque. Este período sedimentario va acompañado de una erosión moderada o de poca intensidad, la cual degrado alrededor de $2000\text{m}^2/\text{año}$, en éste período se construye el primer hotel de la zona, el cual estaba ubicado al Este de la playa, en una saliente rodeada de arena de suelo consolidado, a 35 metros aproximadamente de la línea de costa para el año 1980, ha sido tema de debate por años la afectación que pudieran tener la construcción de hoteles, sobre el equilibrio morfodinámico de ella.

Posteriormente comienza un período erosivo, el cual se inicia en los alrededores del año 1980 y culmina cerca del el año 1987, erosionándose alrededor de 6500 m²/año, degradándose principalmente el área que se encuentra al este de la playa; en este período la sedimentación llego a los 2000 m²/año, formándose dos lengüetas de arena, al centro y oeste de la playa, las edificaciones construidas en los alrededores de la playa, no se vieron amenazadas por la erosión en este período, debido a que quedo una franja de playa de 42 m de ancho promedio, a pesar de esto la línea de costa retrocedió alrededor 95 m, en su punto más ancho.

A partir del año 1987 se puede observar como comienza un nuevo periodo sedimentario, el cual es menos agresivo que su antecesor, sedimentando un área aproximada de 3000 m²/año, generando una gran acumulación de arena en la zona central de la costa, formándose un lóbulo o saliente de arena de más de 18.000 m², la erosión en este periodo degrado alrededor 1000 m²/año este periodo finaliza entre los años 1996-1998 según la información histórica con que contamos, donde se puede observar que en el año 1998 la extensión de playa enfrente del hotel The Winds alcanza su máxima sedimentación para luego erosionarse en el siguiente periodo.

Al finalizar este ciclo sedimentario comienza otro erosivo, que hace desaparecer por completo el lóbulo formado en el periodo anterior y amenaza peligrosamente las estructuras construidas al este de la playa, este periodo comienza alrededor del año 1998 y culmina en el año 2004, las áreas erosionadas van a ser las mayores registradas hasta ese momento, por lo que, los pobladores de la zona tomaron medidas de emergencia para poder controlarla, colocando una serie de espigones de madera y sacos de arena a lo largo de la costa, formando una batería de espigones, lo que logra estabilizar esta zona y separar la línea de costa de las edificaciones que allí se encuentran, pero causando erosión al lado opuesto rompiendo con el equilibrio que se venía presentando hasta el momento, esto se puede

verificar en el balance sedimentario a partir del año 2002, donde las áreas erosionadas disminuyen y se incrementa el área sedimentada, manteniéndose la tendencia a la erosión, hasta el año de 2004 que comienza a aparecer un nuevo periodo sedimentario.

A partir del año 2004 comienza un nuevo periodo sedimentario, en el cual las áreas ganadas van a ser las mayores registradas hasta ese momento, siendo depositados estos sedimentos al final de la lengüeta al oeste de la playa. La colocación de un nuevo espigón en forma de muelle, en la parte central de la costa de la playa en el año 2006, termina de romper el proceso sedimentario que se venía presentando, para pasar bruscamente a un periodo erosivo que comenzaría este mismo año; el área erosionada este año es la mayor área erosionada hasta el momento, el material degradado va ser depositado al Oeste de la lengüeta, prolongándola unos 250 m, formando una superficie que se encuentra sumergida alrededor de 30 cm desde la superficie.

Estos ciclos erosivos-sedimentarios representan las variaciones a largo plazo del área de la playa, basados en la información disponible de la zona (fotos, fotos aéreas, mapas e imágenes satelitales), podemos apreciar cómo se cumplen periodos cíclicos alternantes de erosión y sedimentación, los cuales cumplían con un periodo de retorno de 8 años aproximadamente, hasta la colocación de espigones en la franja costera, donde se puede observar un desequilibrio en la dinámica sedimentaria, alcanzándose valores máximos de erosión y sedimentación.

Otra forma de visualizar este fenómeno es con la gráfica 4.3, que representa la diferencia entre la sedimentación-erosión, donde se grafica la tendencia de la erosión (línea roja) y la de la sedimentación (línea azul), siendo la línea verde la diferencia de las dos, representando las cantidades totales sedimentadas o erosionadas por periodos, también se puede apreciar

que a partir del 2006 comienza una tendencia a la erosión con valores nunca antes alcanzados.

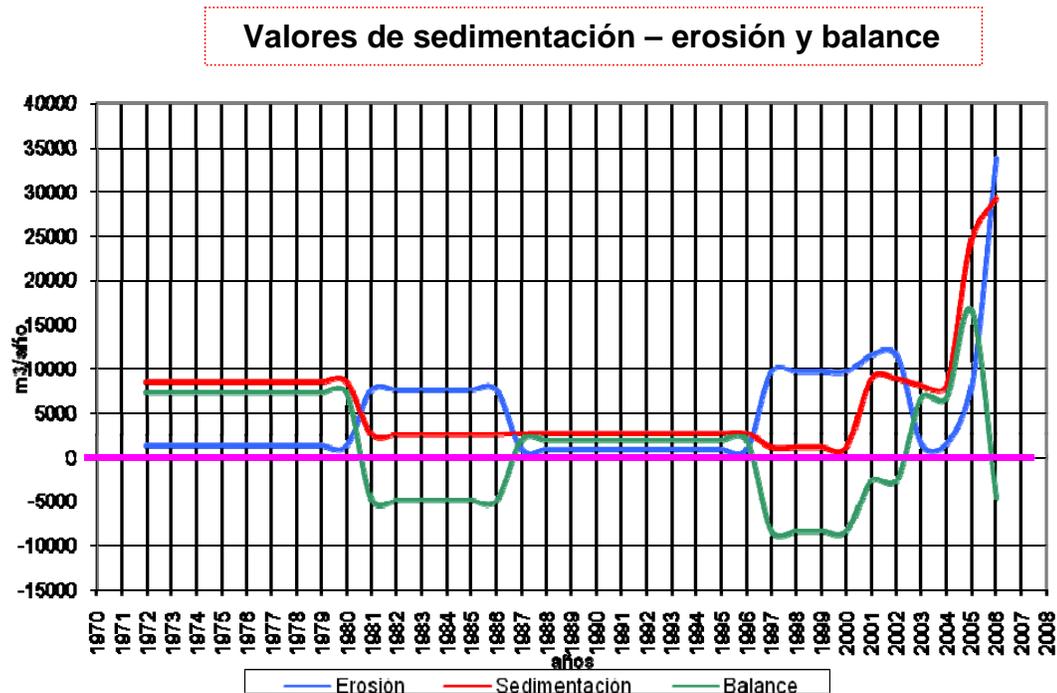


Gráfico 4.3. Diferencia entre el proceso erosivo y sedimentario de playa El Yaque.

En general hubo un equilibrio entre los períodos erosivos y sedimentarios, procesos aparentemente cíclicos por lo que puede observar, aunque entre los años de 1987 hasta 1996 se presentó una etapa estable entre lo que corresponde a la sedimentación y erosión de toda la zona de estudio, sin embargo, a partir de este año comienza el proceso erosivo bien marcado que hace que se produzca un desbalance que luego va cambiando con la inclusión de las obras en el año 2003 llevando a valores de estabilidad a medida que se alcanzaba el equilibrio en la zona.

En cuanto a los estudios realizados que se hicieron en toda el área para la comprensión de la situación encontramos oleaje (clima y Derivación de oleaje) y su influencia, las direcciones de mayor ocurrencia, batimetría (perfiles batimétricos), movimiento de las mareas, vientos en la zona, corrientes y perfiles batimétricos en el área de influencia de la laguna Las Marites, ubicación de las praderas de *Thalassia*, transporte de sedimento litoral y eólico, catastro y ubicación de las edificaciones frente a la costa, levantamiento de línea costera.

Uno de los estudios adicionales realizados y de gran importancia para conocer el proceso de acreción y erosión en la zona de El Yaque es el estudio de la difracción.

4.3 OTRAS VARIABLES QUE AFECTAN LA MORFOLOGÍA DE LA COSTA EN PLAYA EL YAQUE.

4.3.1 Influencia de las corrientes de la Laguna las Marites sobre la zona de estudio.

Uno de los estudios de gran importancia para entender el proceso de acreción y erosión en la zona del Yaque es el estudio de la influencia de la laguna Las Marites y las corrientes de mareas que se forman en sus bocas; el hecho, de que una de las bocas de la laguna desemboque directamente en playa El Yaque, nos hace pensar que las variaciones existentes en la línea de costa pudieran tener alguna relación con las descargas directas de efluentes de la planta de tratamiento dentro de la laguna, la cual estaría incrementado el caudal en la salida de la boca, creando una corriente que desvía el movimiento normal de los sedimentos, produciendo su deposición una distancia considerable, hacia la lengüeta que se estaría formando al oeste de playa El Yaque; para poder comprobar esta hipótesis se realizó un

seguimiento de las corrientes en la boca denominada Boca Victoria, que es la más cercana a nuestra zona de estudio; no se tomo en cuenta la boca denominada Boca nueva por estar inactiva debido a un proceso severo de sedimentación, el cual no permite un flujo significativo a la parte interna de la laguna.

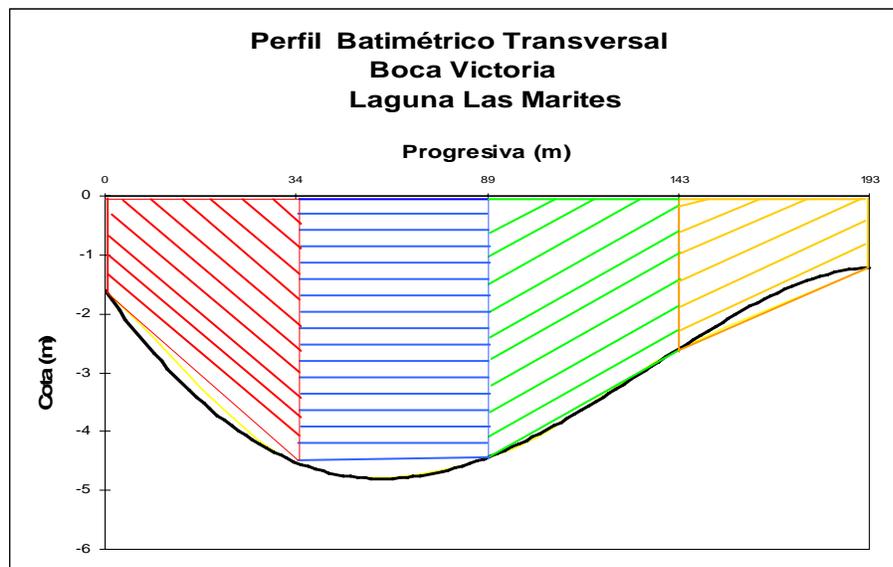
Para determinar la dirección y velocidad de las corrientes, se utilizaron flotadores de diferentes tamaños para poder realizar las mediciones a diversos profundidades (superficial, 0.5m, 1m, 1.5m). Estas mediciones se realizaron los días 01/07/05 comenzando a las 11:43 am y el día 02/07/05 a las 6:16 am; se puede verificar en la tabla de marea en la Información Básica, que para el día 1/07/05 las condiciones de marea eran de marea creciente y para el día 2/07/05 la condición de marea era de vaciante, pudiéndose observar como era de esperar, que para el caso de marea creciente el nivel del mar está aumentando mientras la laguna se va llenando, lo que origina una corriente que hace entrar los flotadores a la parte interna de la laguna. Los valores de velocidades determinados por tramos en este caso no presentaban variaciones considerables entre cada uno.

Para el caso de marea vaciante se pudo observar la condición contraria, donde el nivel del mar disminuye y la laguna se va vaciando de manera gradual, lo que origina una corriente que saca los flotadores de la parte interna de la laguna, enviando a la playa al flotador superficial y al de 0,5m muy cerca del espigón N° 3, los flotadores de mayor tamaño fueron empujados hacia el sur alejándolos de la boca, hasta que la corriente que sale de la laguna pierde su fuerza y los flotadores arrastrados por el oleaje son devueltos a la costa, esa hipótesis la podemos validar considerando las velocidades por tramo de cada uno de los flotadores.



Figura 4.34. Movimientos de las corrientes Boca Victoria Las Marites. Año: Julio 2005. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Al realizarse la medición en la salida de la boca llamada Boca Victoria el día 2 de julio a las 6 de la mañana se observó en la *Figura 4.34* que los flotadores se desplazaron paralelo a la línea costera con una velocidad relativamente alta comparado con las velocidades regulares que presentaban, esto es indicio de una corriente de la boca la cual al reducirse el área de la sección y tener un caudal circulante de salida aumente la velocidad.



Gráfica 4.4. Aforo del perfil transversal Boca Victoria - Las Marites. Año: Julio 2005.

En condiciones de marea llenante y vaciante podemos determinar:

- Condición vaciante de la laguna :
 $V_m=0,37$ m/s y Área aproximada= $940,65$ m²
El Caudal vaciante (Q_{vaciante}) = $348,04$ m³/s.
- Condición llenante de la Laguna:
 $V_m=0,17$ m/s y Área aproximada= $940,65$ m²
El caudal llenante (Q_{llenante})= 158 m³/s

En este caso el caudal de la condición de marea vaciante, es considerablemente mayor que en la condición de llenante lo que implica un mayor flujo de líneas de corrientes que impulsa a los bastones flotadores hasta que su energía es disipada por el cambio de área de la sección en la salida (ensanchamiento), ver **ANEXO (8);(9)**, esto produce que los flotadores disminuyan la velocidad considerablemente, luego se produce un nuevo aumento de la velocidad y se divide el recorrido en dos direcciones fundamentales, los flotadores que agrupan los de menor tamaño (superficial y 0,5m), se mueven en el sentido del oleaje hacia la costa y los más profundos o de mayor tamaño (1m y 1,5m) tienden a moverse hacia aguas adentro hasta reducir nuevamente la velocidad para luego tomar el sentido del oleaje hacia la costa.

Estos cambios de velocidades de los flotadores son indicativos de la existencia de corrientes a diferentes profundidades, es de notar que cercano al morro cuando se produce nuevamente el aumento de la velocidad, los flotadores más superficiales se mueven hacia la costa más rápidamente que los flotadores de mayor longitud y las corrientes más profundas actúan sobre los flotadores más largos, alejándolos de la costa hasta que cesa su acción, dejándolos libre para que la fuerza del oleaje los empuje de nuevo hacia la línea costera.

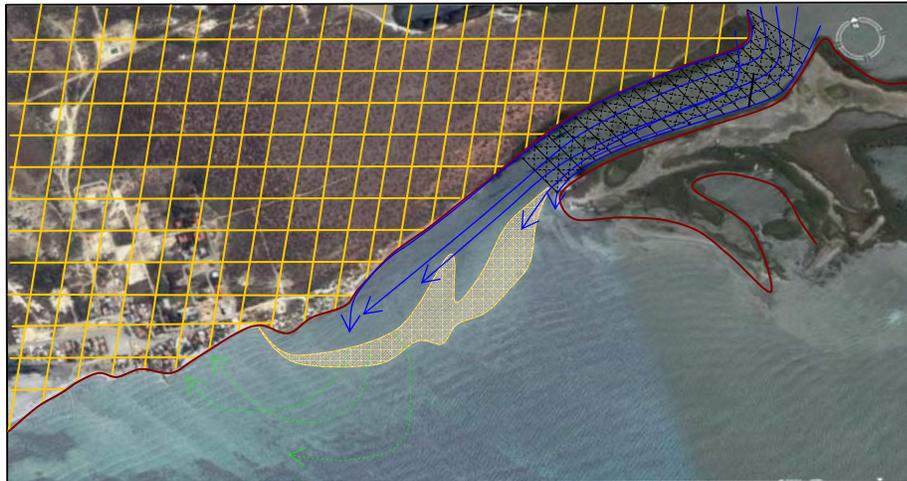


Figura 4.35. Líneas de corrientes Boca Victoria a playa El Yaque. Año: 2005. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Estas mediciones de corrientes fueron hechas para determinar la trayectoria en función de la acción que presenta la laguna sobre la zona de estudio, sin embargo la influencia de todo el sistema de corrientes en la zona es diverso y proviene de otros puntos, para ello se tendría que realizar un estudio más profundo de estos movimientos para determinar con exactitud su trayectoria y poder establecer conclusiones al respecto. (Ver Figura 4.35).

Se pudo determinar según información técnica de la planta de tratamiento de Los Bagres que el efluente entregado por la planta de tratamiento es de apenas 200 lts/seg ($0,2\text{m}^3/\text{s}$), lo que no tiene una influencia directa en el movimiento de la corrientes en la boca de la laguna, debido a que el caudal que pasan por esta ronda los $350\text{ m}^3/\text{s}$, adicionalmente su descarga la hace por escorrentía a través del cauce de una quebrada que llega a la laguna a una distancia considerable de las bocas de la laguna. (Ver Figura 4.36).



Figura 4.36. Área de descarga de efluentes de Los Bagres
Año: 2005. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Esta dinámica de movimiento de los flotadores es la misma que rige a los sedimentos que son transportados por el frente de la boca de la laguna y evidencia que existe una corriente de agua que envía a los sedimentos mar adentro para ser devueltos a su curso normal por el oleaje.

Siguiendo la trayectoria de las líneas de corriente los sedimentos se mueven hasta perder ésta energía y son depositados formando una barra continua que une la playa con la Isla La Placeta.

Esto produce un crecimiento de la duna ocasionando una disminución en la profundidad que hace que las líneas de corriente sean disipadas en esa área, al igual que cambia el clima de oleaje ya que se produce fricción de la onda con el fondo marino causando el rompiendo de la ola. Ver **ANEXO (10)**. En el lado Este, cercano al morro emerge la barra cuando existe marea baja y se mantiene sumergida con una profundidad relativamente pequeña cuando existe marea alta. (Ver Fotografía 4.29).



Fotografía 4.29. Barra de deposición al Este de la playa El Yaque.
Año: Enero 2004. Fuente: PROPIA

Hay que considerar que los sedimentos que confluyen en la playa puede tener diferentes orígenes, básicamente marítimo y eólico. Los marítimos descritos anteriormente se pueden diferenciar de dos maneras: Transporte Litoral (paralelo a la costa) y Transporte Normal (perpendicular a la costa). Aunque se desagruparon en dos partes para efecto de comprensión y de cálculo son movimientos que se dan en conjunto, forman parte un solo fenómeno.

Los sedimentos pudieron ser clasificados a través de un estudio granulométrico realizado en laboratorio en el cual se determinó que el tamaño de promedio del grano (D_{50}) de las arenas estaba en 0,21 mm.

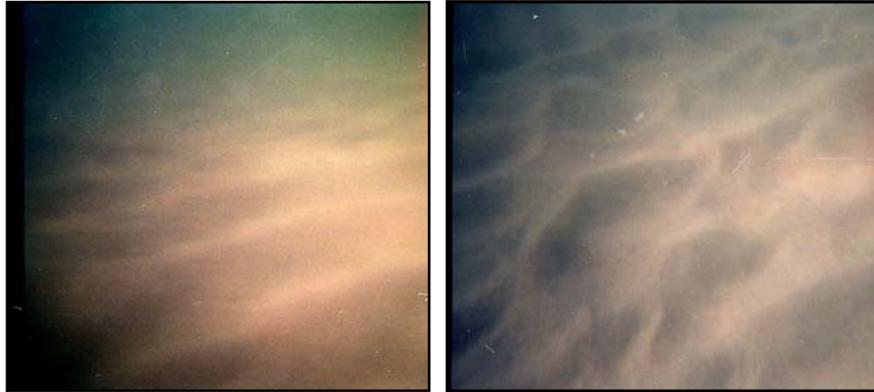
Al hacer las diferentes tomas de sedimentos se pudo determinar que las arenas de diámetro menor se estaban depositando a una distancia considerable de la línea costa, en aguas de mayor profundidad y los granos de mayor diámetro (por encima de 0,21 mm) en la orilla de la playa. Sin

embargo, las diferencias del grano que llegan a la orilla con respecto al grano que se queda fuera de la costa es relativamente pequeña, no es mayor de un 10 % en promedio del valor del diámetro de D_{50} , no tomando en cuenta los que provienen de la población de la Isleta y la boca de la laguna que son de mayor tamaño.

Este grano de sedimento fino es arrastrado básicamente, por corrientes producidas por el oleaje hacia todo el litoral. La causa que produce que el grano de diámetro mayor llegue a la orilla y el de menor diámetro se deposite más alejado de la costa, es debido a que no está afectado directamente por el oleaje, a medida que nos acercamos a la zona rompiente, la dinámica de la zona de rompiente hace que los sedimentos finos estén en suspensión en el agua y en el lecho marino los granos más gruesos. También se observa el mismo fenómeno si analizamos los sedimentos del Este hacia el Oeste, consiguiendo mas granos finos al Oeste de la playa que al Este, donde actúan las corrientes litorales generadas por el oleaje que proviene en el mismo sentido, arrastrando el sedimento mas fino.

La acción que determina esto es el movimiento del oleaje en la costa, el cual se determinó que provenía en un mayor porcentaje de la zona Este con 51,39% de ocurrencia y con incidencia costa de forma oblicua lo que es indicativo de que el transporte litoral y su cantidad sea la de mayor influencia en la zona comparada con las otras direcciones actuantes.

Debido a ésta particularidad, es posible observar en el fondo marino algunos *ripples* o hileras sumergidas de pequeñas elevaciones que son formadas cuando el material en suspensión comienza a sedimentarse de forma rápida en comparación con la migración de los *ripples* y comienzan a trepar sobre el dorso de los que estaban ya formados aguas abajo. La formación de los *ripples* trepadores indica una alta velocidad de sedimentación de arena fina o limo en condiciones de corriente con baja energía.



Fotografía 4.30. Ripples de cresta recta y cresta sinusoidal en playa El Yaque. Fuente: PROPIA

Los *ripples* formados a menor velocidad tienen las crestas rectas y van cambiando a formas sinuosas cuando la corriente se torna más rápida. (Ver Figura 4.30).

En la siguiente *Figura 4.37* se puede observar los ripples formados en la zona de El Yaque.

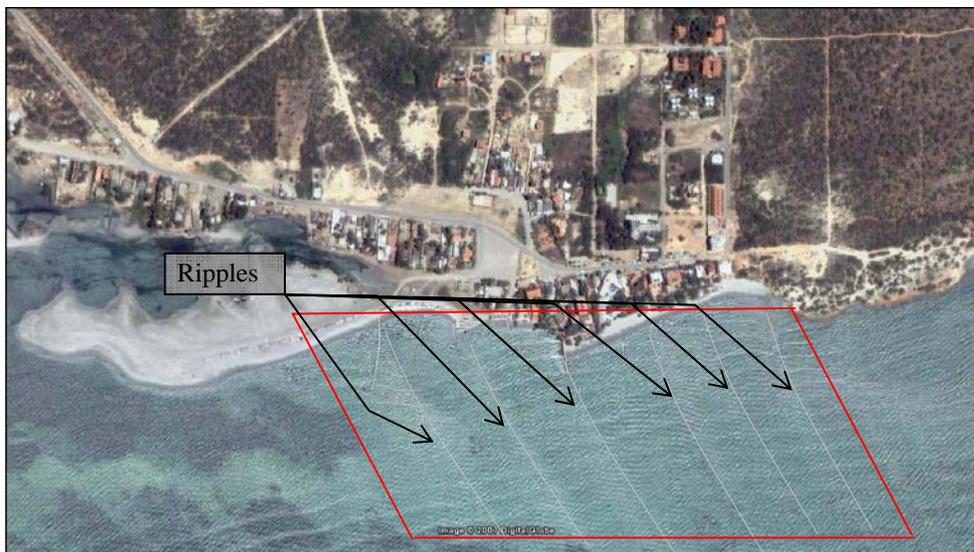


Figura 4.37. Zona de formación de ripples al Este de la playa El Yaque. Año: Enero 2004. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

4.3.2 Influencia de la barra de arena frente al morro (efecto de Difracción).

En el movimiento de aproximación a la costa del oleaje, desde aguas profundas hacia aguas someras, las olas encuentran diferentes obstáculos que interrumpen su avance, estos pueden ser cabos, islas o estructuras costeras como espigones o muelles; la difracción del oleaje, ocurre cuando la ola choca con el obstáculo y lo rebasa, adoptando un frente de ola de forma circular, propagándose en la zona de calma protegida por el obstáculo, produciéndose un fenómeno de transferencia lateral de energía.

Esta transferencia lateral de energía también puede ser ocasionada por discontinuidades en la altura del oleaje a lo largo de un frente, la cual está asociada a la refracción del oleaje por efecto del fondo. Esta es la razón por la que los fenómenos de refracción-difracción están casi siempre asociados y son especialmente relevantes en zonas sometidas a la influencia de estructuras costeras.

Para este trabajo se estudio, la altura del oleaje modificado por efecto de la difracción, y las consecuencias que este causa en la costa oriental de playa El Yaque. El área de estudio abarca la zona donde se encuentran ubicados los hoteles, que comprende la extensión de costa que va desde el espigón número 3, hasta El Morro al Este de playa el Yaque, y una distancia mar adentro de 160 m, desde el borde de la línea de costa (ver figura 4.33).

El punto inicial para realizar el estudio de difracción, se tomo al Este de la playa, al extremo de un montículo de arena sumergido, el cual está ubicado 100 metros al sur del morro, este ocasiona una discontinuidad del frente de oleaje como consecuencia de la disminución de la profundidad, produciendo una modificación en la altura del oleaje por difracción en la zona ubicada entre el montículo y el morro.

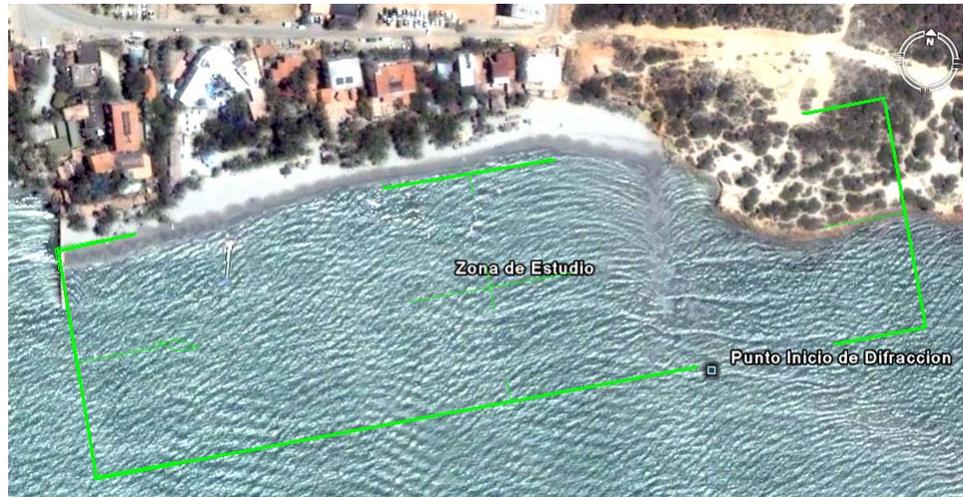


Figura 4.38. Zonas de erosión y sedimentación de la zona de playa El Yaque. Año: 2006. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Al disminuir la profundidad drásticamente, cuando el oleaje choca contra el montículo, parte del frente del oleaje se deforma y rompe disipando su energía, formándose a continuación un área de bajo oleaje, que denominaremos zona de sombra o de calma, la cual puede variar según sea la inclinación del oleaje incidente, contra el punto de control o punto de difracción, en esta zona el movimiento del frente de oleaje es dominado por los efectos de difracción, donde se forma un frente de oleaje circular, con proyección radial desde el extremo del obstáculo.



Figura 4.39. Área de estudio El Yaque. Año: 2006. Fuente Foto: PROPIA

El área donde el oleaje sigue su trayectoria desde mar adentro hasta la costa, la denominaremos zona iluminada o zona activa, que es la zona donde el oleaje sigue su trayectoria, sin ser modificada por efecto de la difracción; en esta zona los efectos de refracción son los más importantes, debido a que el obstáculo en este caso el montículo de arena, no tiene ninguna influencia sobre la trayectoria del oleaje.

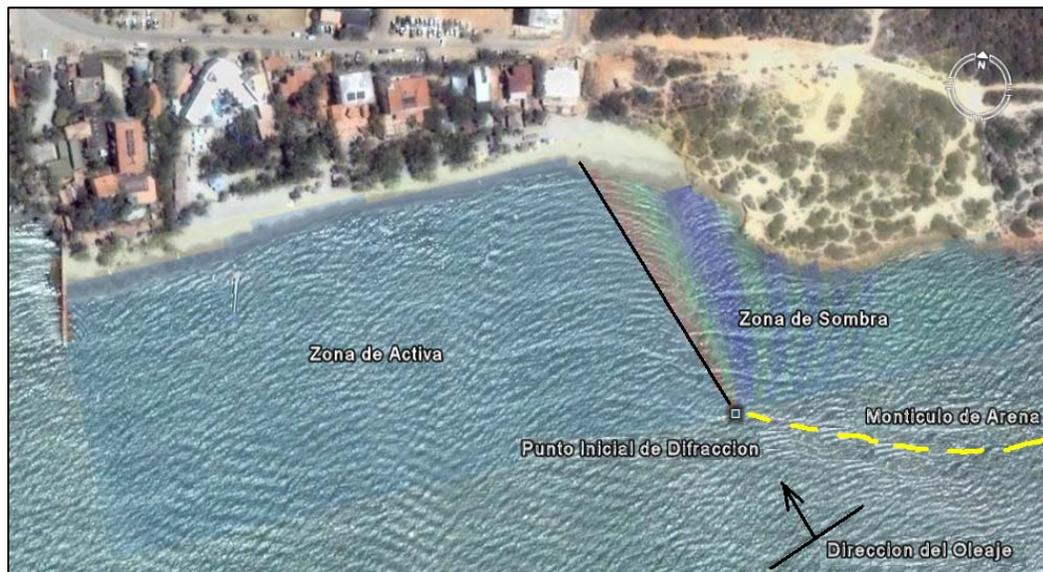


Figura 4.40. Zona difracción de oleaje Playa El Yaque.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Para calcular la altura del oleaje por difracción, primero se debe calcular el coeficiente de difracción K_d , para este cálculo se utilizó el método de la espiral de Cornú, el cual permite calcular este coeficiente, con la ayuda de una hoja de cálculo, en la cual se elaboró una malla de puntos coordenados, cuyo origen está ubicado en el extremo del montículo de arena que se encuentra enfrente de la playa; con esta malla se calcularon los valores de K_d para cada punto coordenado, y finalmente los valores de la altura de la ola modificada por la difracción H_d , con la ayuda de la expresión:

$$Kd = \frac{Hd}{H} \quad Kd \text{ adimensional (IV.1)}$$

Siendo H la altura de la ola inicial en el punto de difracción y Hd la altura de la ola en difracción.

Las direcciones de oleaje utilizadas para el estudio de la difracción, fueron las direcciones de oleaje más representativas, con mayor porcentaje de ocurrencia que tienen influencia en la zona, siendo la dirección Este la de mayor porcentaje de ocurrencia con el 51,39%, seguida de las direcciones Sur-Este con 9,71%, Sur con 2,16% y Sur-Oeste con 0,99%.

Los datos de entrada para el cálculo de la altura de oleaje por difracción, fueron tomados para cada dirección, de la tabla de derivación de oleaje, en la progresiva 160 m, que es la distancia perpendicular, que separa el punto de difracción del punto más alejado de la costa. Los valores tomados de esta tabla fueron: Altura de ola refractada H en la progresiva seleccionada, ángulo de inclinación del frente de ola con respecto a la línea de costa y longitud de onda.

Estos valores fueron tomados de las tablas de derivación de oleaje, para las alturas de ola observadas más importantes, como son 0,5 m, 1m, 2m, 3m. La altura de ola 0,5 m, es la altura del oleaje cotidiano o más frecuente, que se presenta en la costa de playa el Yaque.

Luego de los cálculos, se representaron los valores de altura de ola obtenidos, de forma grafica sobre una malla coordenada, donde la altura de oleaje por difracción, se simboliza con diferentes colores, los cuales representan las diferentes alturas que puede adquirir el oleaje en la zona de sombra. El color azul representa la mayor altura de oleaje, el color verde la

altura intermedia y el color rojo la menor altura. Para cada dirección de oleaje, la grafica resultante es la misma, para las diferentes alturas de olas iniciales, variando únicamente los valores de altura de ola para cada color.

La elaboración de estos cálculos son para determinar, la influencia de de la difracción, en el modelaje de la costa. Por esta razón se analizo la intervención de este fenómeno en la formación de una barra de arena que se encuentra al este de la playa, la cual tiene conexión con el montículo de arena, que origina la difracción. (Ver Fotografía 4.31)



Fotografía 4.31. Área de estudio El Yaque. Año: 2006. Fuente Foto: PROPIA

Esta formación arenosa, crece formando un apéndice de la costa, adentrándose al mar unos 50 metros, observándose en ocasiones que su tamaño puede variar, aumentando o disminuyendo, según sea el estado de la marea. Esta zona debe su forma a la acción de varios fenómenos combinados como son la refracción, la reflexión del oleaje contra el morro y la difracción que ocasiona el montículo de arena sumergido. (Ver Figura 4.41).



Figura 4.41. Vista de planta del montículo de Arena. Año: 2006.
Fuente: GOOGLE EARTH

La difracción ocasionada por el oleaje en la dirección Este, es la más importante debido a que este oleaje incide contra la costa un 51,39% del tiempo, siendo la altura de 0,5 metros en aguas profundas, la de mayor visualización en el tiempo, por esta razón estas condiciones son las de mayor influencia sobre la costa, por lo tanto la difracción de oleaje se originará en mayor proporción con estas condiciones, seguido de la dirección Sur-Este y las alturas de oleaje en aguas profundas de 0,5 y 1 metro de altura.

En general se puede observar para todos los casos como la difracción, hace que se formen bandas de diferentes colores, siendo la banda roja, la que crea una frontera entre la zona activa y la zona de sombra. Debido a la disminución de la altura de ola, en las proximidades de esta banda, existe una tendencia a sedimentar, a diferencia de la banda azul oscuro donde el oleaje se amplifica con respecto al inicial, creando una sedimentación de menor proporción.

Este comportamiento de la altura del oleaje en la zona de sombra puede explicar la formación del apéndice de arena, que se origina al Este de la playa en las proximidades del morro, debido a que las difracciones obtenidas para las direcciones Este y Sur-Este, la banda roja de menor altura de oleaje coincide con el área sedimentada en la playa (ver *Figuras 4.59 y 4.60*), de la misma manera se puede decir que la forma alargada que tiene esta área sedimentada, es producto de la forma de las bandas.

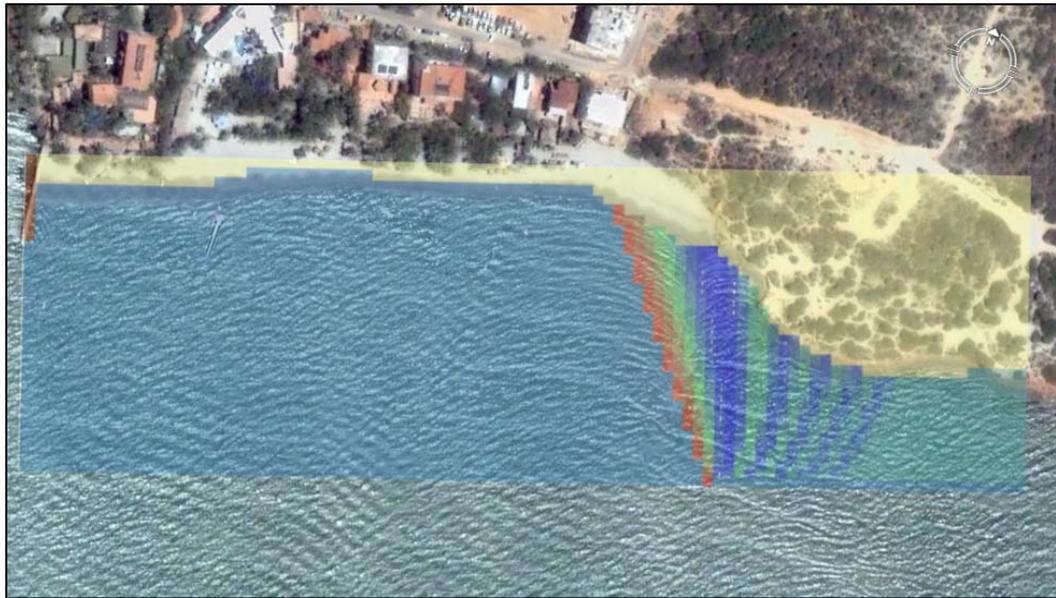


Figura 4.42. Difracción de oleaje dirección Este. Año: 2006.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Para el análisis de difracción en la dirección Sur-Este, la altura de oleaje de 0,5 metros es la única altura que influye, en la formación de un área de difracción, debido a que al estudiar la altura de oleaje de 1m en aguas profundas, la altura inicial de oleaje en el punto de difracción es de 1,16 m, esto según la derivación de oleaje, significa que esta altura ya supero la zona de rompiente, por lo que se considera que esta altura de oleaje, en esta dirección no tiene ningún tipo de influencia sobre la costa.

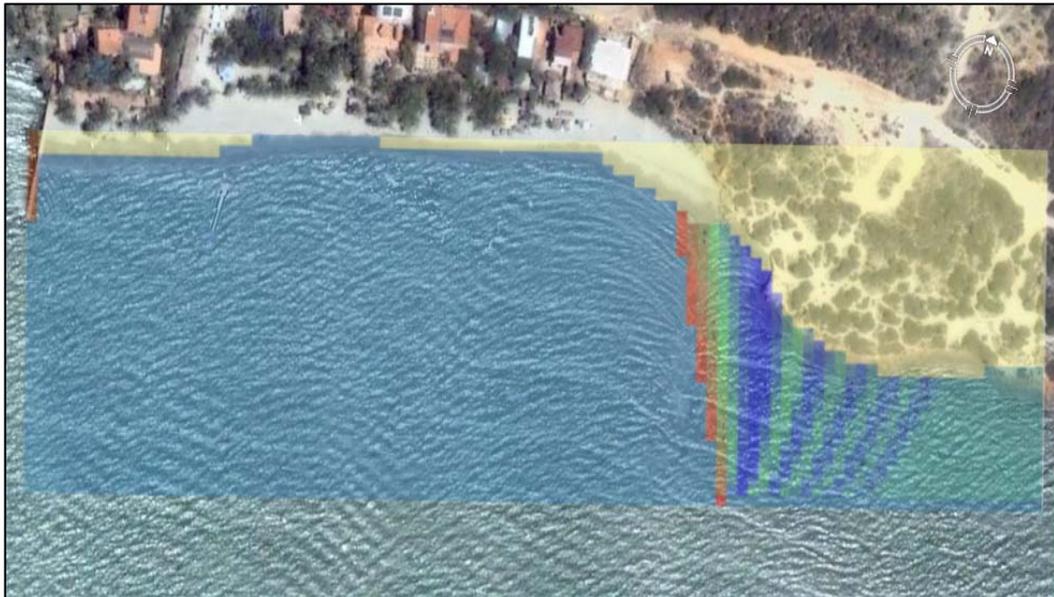


Figura 4.43. Difracción de oleaje dirección Sur Este. Año: 2006.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Cuando el oleaje proviene del Sur y Sur-Oeste, las líneas del oleaje difractado se mueven hacia el este, afectando solamente las aguas enfrente del morro. Las bandas de altura del oleaje resultante son muy parecidas para estas dos direcciones, y la zona de sombra de menor tamaño que la formada para las direcciones Este y Sur-Este, lo que ocasiona que la zona activa tenga un mayor tamaño. (Ver Figura 4.42 y 4.43).

Para la dirección Sur, cuando la altura de oleaje es de 1m, 2m o 3m el frente de oleaje ya ha rebasado la zona de rompiente cuando llega a el punto de difracción, lo que ocasiona que no se forme una difracción o que se llegue a formar con alturas muy bajas de oleaje por lo que podemos decir que esta dirección no influye en la modificación de la costa por difracción. (Ver Figura 4.44).

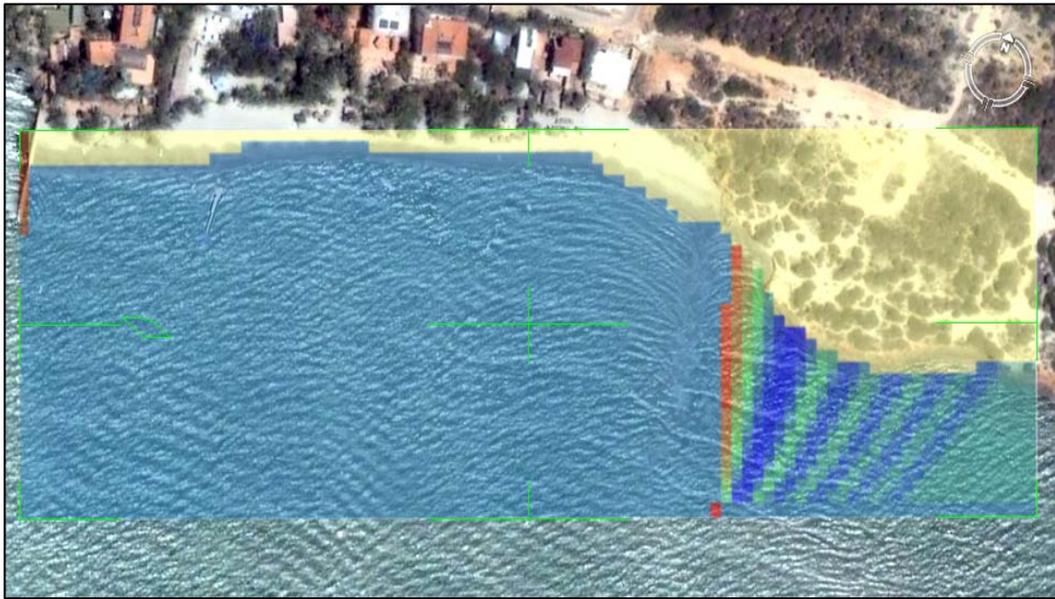


Figura 4.44. Difracción de oleaje dirección Sur. Año: 2006.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

La dirección de oleaje Sur-Oeste, es la que tiene menos porcentaje de ocurrencia 0,99%, debido a esto la posibilidad de cambiar la morfología de la playa es mínima o casi nula, debido a que no se puede presentar oleaje en esta dirección sostenidamente o por varios días. (Ver Figura 4.45).

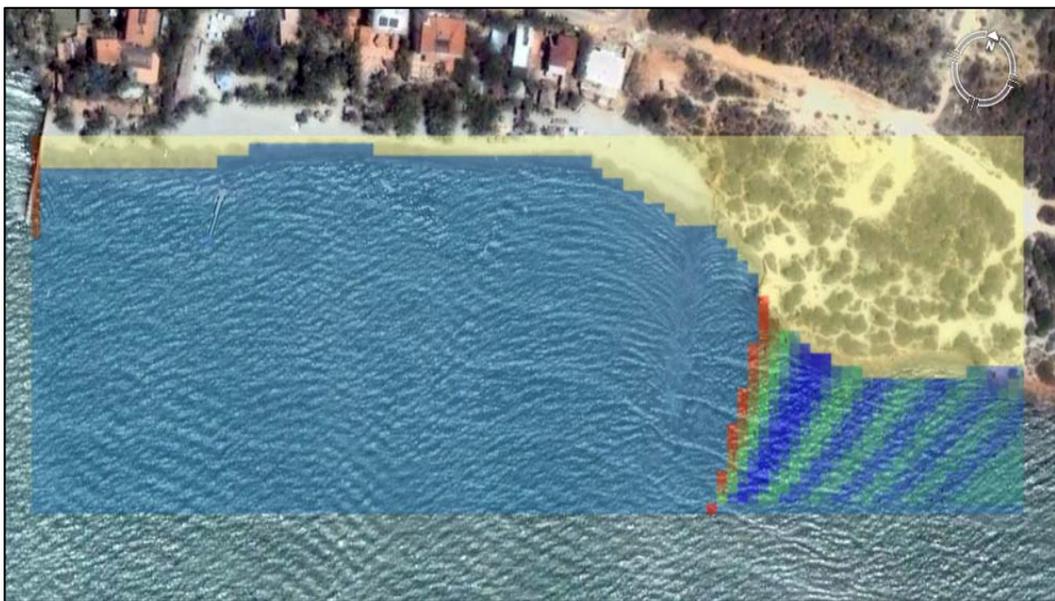


Figura 4.45. Difracción de oleaje dirección Sur - Oeste. Año: 2006.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

En general para todas las direcciones, las alturas de oleaje de 2 y 3 m en aguas profundas, la zona de rompiente se produce antes del punto de difracción, lo que disipa la energía del oleaje, antes de que esta llegue al punto de difracción, por lo que la difracción originada no tienen ningún tipo de influencia sobre la costa. Estas alturas de oleaje son el producto de perturbaciones meteorológicas, las cuales pueden modificar la línea de costa mientras dura el evento, al terminar esta playa vuelve a retomar el equilibrio morfodinámico que se venía presentando.

4.3.3 Influencia del viento sobre la zona de estudio.

Es de considerar también, que una parte de la partículas finas en la parte alta de la playa es proveniente de El Morro debido a que se observo que existían una relación del tamaño de grano de las muestras tomadas en la playa y la parte alta de dicho morro.

Según informaciones recabadas de la zona por lo pobladores se indicaba que El Morro era una fuente de suministro de sedimentos en épocas donde no existía una cantidad de vegetación abundante.

Para ello se obtuvieron mediciones de vientos desde el mareógrafo de Punta de Piedras de la Fundación La Salle-EDIMAR los cuales fueron apoyados con información obtenida a través de la Internet de la estación cercana al aeropuerto y mediciones en campo.

El valor de las velocidades está entre 15-18 km/h y las dirección predominante es Norte con tendencia la NE; estas medidas nos son referidas a la zona de estudio pero sirven para tener un factor de comparación con los calculados estadísticamente y medidos en campo.

Para las costas venezolana la dirección dominante es NE, sin embargo, en la zona de El Yaque el viento medido predominante fue en

dirección E y SE, adicionalmente SW y S con velocidades similares a las especificadas en el rango anterior. Estas diferencias son posibles a una cadena montañosa que se encuentra hacia la parte oriental de la isla la cual produce un desvío en las direcciones originales. (Ver Figura 4.46).

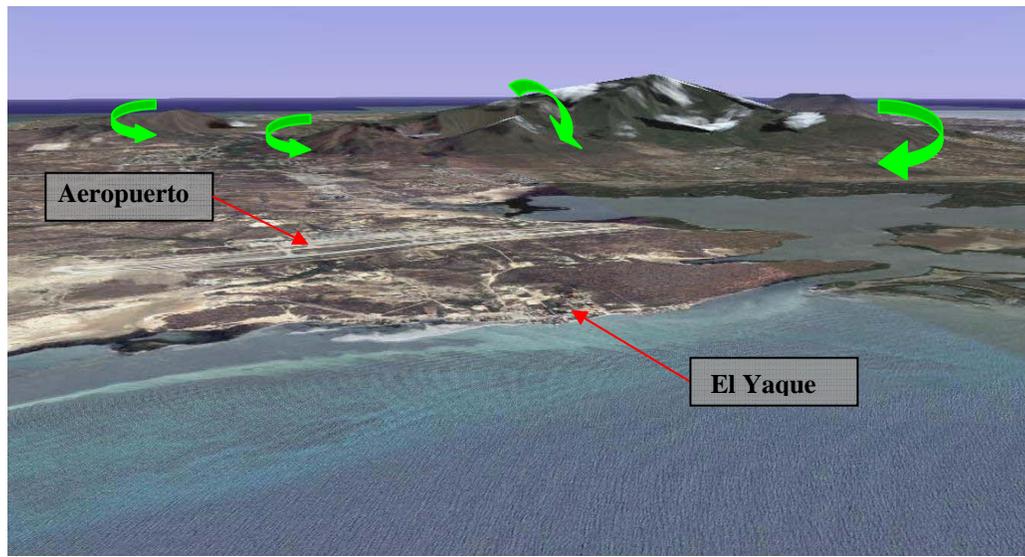


Figura 4.46. Direcciones de los vientos en la zona
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

A través del procesamiento de la información recabada pudimos determinar los meses en que ocurren vientos más fuertes en la zona el cual pudiera afectar el transporte eólico. Ver **ANEXO (42);(43)**

Se observó que los meses de mayor velocidad de viento son:

Tabla 4.3. Velocidades de los vientos en la zona

Vientos	Meses	Velocidad promedio
Fuertes	Marzo a Junio	De 25 a 30 km/h con ráfagas de 35 hasta 40 km/h
Moderados	Julio- Febrero	De 15 a 20 km/h con ráfagas de 25 a 30 km/h.

El cálculo el transporte de sedimento en forma eólica se realizó a través del CREES, software desarrollado por la Universidad TUDELFT de Holanda. Este software tiene en una de sus secciones el cálculo de transporte de sedimento de tipo eólico a través de diferentes formulas, para este caso usamos la formula de White, Kamurga y Arens y corroborada con la de Lettau y Letta.

Las fórmulas y Lettau y Lettau para la taza de transporte eólico (q_{eq}):

$$q_{eq} = 2,61 \frac{\rho_a}{g} \sqrt{D_{ref}} (U_{sc} - U_{st}\phi) \times (U_{sc} + U_{st}\phi)^2 \quad (IV.2); \text{ White, Kamurga y Arens}$$

$$q_{eq} = 4,2 \frac{\rho_a}{g} \sqrt{D_{ref}} (U_{sc} - U_{sCr}) \times U_{sc}^2 \quad (IV.3); \text{ Lettau y Lettau}$$

El coeficiente de corrección por pendiente $U_{sCr} = 0,36$ m/s; es usado en la formula de Lettau y Lettau.

Los otros factores que implican es la densidad del aire (ρ_a); la aceleración de gravedad (g); el diámetro del grano (D_{ref}); la velocidad cortante cuando hay vegetación (U_{sc}).

Tabla 4.4. Rata de transporte eólico

Parámetros	White, Kamurga y Arens		Lettau y Lettau	
Velocidad de viento	4 m/s		4 m/s	
Altura	1 m		1 m	
Rugosidad	0,1m		0,1m	
Diámetro	0,21 mm		0,21 mm	
% de cobertura vegetal	0	50	0	50
Velocidad de iniciación del movimiento (U_{crit})	0,71 m/s	0,71 m/s	0,71 m/s	0,71 m/s
Velocidad fricción (U^*)	0,19 m/s	0,19 m/s	0,19 m/s	0,19 m/s
q_{eq}	0,1403 Kg/m/s	0,00 Kg/m/s	0,00 Kg/m/s	0,00 Kg/m/s

En los dos métodos aplicados usando el CRESS se puede notar que existen diferencias en los valores obtenidos de la rata de transporte debido a la sensibilidad de las formulas en función de los datos suministrados. Los valores obtenidos de la taza de transporte no es significativa, aún para superficies con ninguna vegetación, es posible observar que con 50% de cobertura vegetal el valor de la rata de transporte es 0,0 kg/m/s.

Para una superficie con 0 % de capa vegetal la formula de ARENS del CRESS para el transporte de sedimento eólico da como resultado 0,1403 kg/m/s lo que se traduce en 140,3 gramos de sedimento por cada metro de longitud recorrido en un segundo, este valor es relativamente significativo porque representa un movimiento importante anual.

Si calculamos con esta rata de transporte y tomando en cuenta el porcentaje de ocurrencia al año de la dirección de los vientos, podemos obtener el valor de 1.687,18 m³/año lo que representa un 5,24 % de la capacidad de transporte litoral de esa costa.

Cuando se consideran todas las direcciones el valor de la capacidad de transporte eólico real es:

Tabla 4.5. Capacidad de transporte eólico anual para vientos a 15 km/h promedio

0% de vegetación	E	SE	S	SW
Porcentaje de ocurrencia	51,39 %	9,71 %	2,16 %	0,99 %
Capacidad de transporte eólico (m ³ /s)	1.687,38	318,83	70,92	32,51
Valor de aporte al año (en porcentaje)	5,74	1,08	0,24	0,11

Para un grano de diámetro 0,21 mm la velocidad de iniciación del movimiento es 1,22 m/s, esto tiene un significado de importancia ya que

4m/s, que es la velocidad promedio del viento en la zona, produciría el movimiento de las partículas de manera eólica y considerando el tamaño de grano promedio se produciría por medio de saltación en la cual un grano choca con otro grano transmitiendo esa energía provocando que éste salte también o por arrastre en el cual rueda sobre superficie de otros granos, trasladándose de un sitio a otro.

Si consideramos que los vientos entre los meses de Enero a julio son mayores en velocidad pudiéramos determinar que la aumentaría la capacidad de transporte eólico lo que reflejaría un valor de aporte anual considerable.

Tabla 4.6. Capacidad de transporte eólico anual para vientos a 27 km/h promedio

0% de vegetación	E	SE	S	SW
Porcentaje de ocurrencia	51,39 %	9,71 %	2,16 %	0,99 %
Capacidad de transporte eólico (m ³ /s)	11.162,64	2.109,07	469,17	215,03
Valor de aporte al año (en porcentaje)	37,95	7,17	1,59	0,73

Con vientos aproximados de 7,6 m/s aumenta significativamente el valor de transporte de sedimento por año en comparación con el aporte que se produce por vía costera. Considerando que la época en donde se producen los vientos de mayor velocidad representan prácticamente la mitad del año hay que tomar en cuenta éste aporte para la restitución de la zona.

En campo se observo en la *Figura 4.47* la elevación de grupos de granos de arenas por efecto del viento sobre todo en la parte de la lengüeta

lo que evidencia que hay existencia de sedimento fino con diámetros inferior al promedio que es posible se elevado unos pocos centímetros del suelo.



Figura 4.47. Trazas de sedimento fino en suspensión al Este y lengüeta de playa El Yaque. Fuente Foto: PROPIA

Por otro lado, el aporte que pudiera hacerse desde la parte Norte de la zona hacia la playa no es significativo debido a que el tipo de suelo es de un alto componente de arcilla más que arenoso y a través de las pruebas granulométricas, el porcentaje de limos y arcillas no son característicos de ser parte importante del relleno de las superficie seca de la playa.



Fotografía 4.32. Suelo presente en la zona.
Fuente: PROPIA



Fotografía 4.33. Vegetación predominante en la zona. Fuente: PROPIA



Figura 4.48. Posibles formas de transporte de sedimento hacia el morro Fuente Foto: PROPIA

El aporte hacia el morro es de origen eólico y se ha dado a través de los años; una posible fuente cercana a está en la Isla La Placeta, prominencia que está compuesta por arena recibida del transporte litoral proveniente de la corrientes marinas que pasan por ésta parte de la isla y lo mueve por medio de ellas hacia las playas anexas conectadas al morro la cual por acción del viento lo lleva a su parte elevada utilizando cualquier de las formas o movimientos del transporte eólico. (Ver Figura 4.48)

Adicionalmente la posible área de contribución de sedimento como una fuente eólica de aporte importante y directa a la playa es el morro, los demás alrededores no lo serían, debido al tipo de material que compone el suelo y a la gran cantidad de vegetación muy rala que alternan desde el espinar hasta la maleza desértica que cubre toda la llanura hasta Punta Mosquito.



Figura 4.49. Posibles áreas de movimiento de sedimento eólico en la zona.
Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Adicionalmente por las direcciones en que se mueven los vientos en esa área E y ENE desde tierra y algunas desde el mar como WSW y SE no impactan directamente en la parte posterior de las edificaciones.

Las edificaciones son estructuras de 12 a 15 m de alto ubicada a todo lo largo de la vía principal, aproximadamente a 70 m de la costa en algunas secciones y 120 m en otras dependiendo de la acreción que exista en ese momento.

Este tipo de estructuras constituyen básicamente el eje turístico de la zona, muchas de ellas ya existían desde años atrás en períodos de agresión a la costa al igual que se mantenían en períodos de recuperación.

El suelo donde se erigen estas edificaciones son suelos consolidados con altos componentes de arcilla y con grandes cantidades de mineral de calcio y hierro por la coloración que se observa además de material granular tipo grava.

No se observo material sedimentario acumulado en las edificaciones para considerar que dichas estructuras estén en contraposición a la deposición de sedimentos en la costa de manera eólica. Sin embargo, es de considerar hacer estudios más profundos en cuanto transporte de sedimento vía eólica. (Ver Fotografía 4.34).



Fotografía 4.34. Zona de edificaciones hoteleras al Este de la playa El Yaque. Año: Enero Diciembre 2006. Fuente: PROPIA

4.3.4. Influencia de la THALASSIA en la zona de estudio.

En cuanto a la fanerógamas marinas como la thalassia se observa que se ha estado desplazando hacia el lado Oeste, las fotografías que se tiene registrada desde los años 80 hasta 2005 así lo evidencia. Es posible que estos campos o praderas se estén reduciendo debido a la posible deposición de sedimentos que se presenta movidos por las corrientes hacia el SW que pasan cercanas a la orilla.

El campo que se observa libre de thalassia en un área de 537.283 m² aproximadamente y a una distancia promedio desde la línea de costa de 300 m lineales desde la parte central, adicionalmente se observan praderas en la parte de la lengüeta occidental desde profundidades muy pequeñas como a 0,5 m hasta los 10 m debido a su claridad de la aguas. (Ver Figura 4.50).

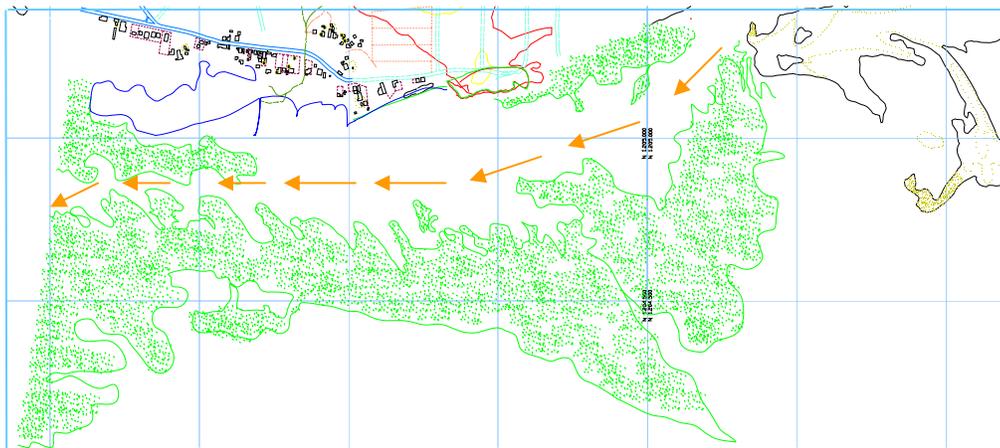


Figura 4.50. Zona de formación de Thalassia al Este de la playa El Yaque.

El área libre de fanerógamas a través del tiempo desde que se tiene registro (1980) ha aumentado progresivamente, ésta información es referida a la zona de estudio, sin embargo hay que notar que para esta fecha la infraestructura turística-hotelera no estaba totalmente consolidada para ser considerada como un factor de perturbación en el desarrollo de las fanerógamas en esa zona, así como también una intervención directa del hombre que permita que se presente esta particularidad. (Ver Gráfico 4.5).

La involución de los campos a lo largo del tiempo representado en la gráfica:

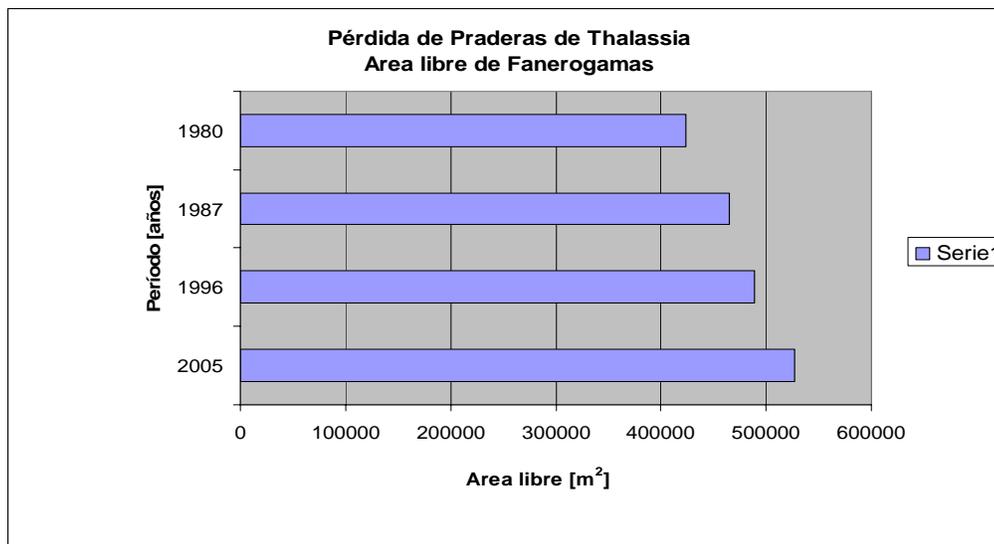


Gráfico 4.5. Área libre de Thalassia a de la playa El Yaque.

El proceso de desaparición de ésta es determinado por el paso de sedimentos de manera continua que se produce en esa zona motivada al transporte de sedimento litoral a lo largo del tiempo.

Esta pérdida creciente de la zona central que se extiende hacia el Oeste es debida a la deposición de sedimentos de manera que se va cubriendo los campos de *thalassia* progresivamente.

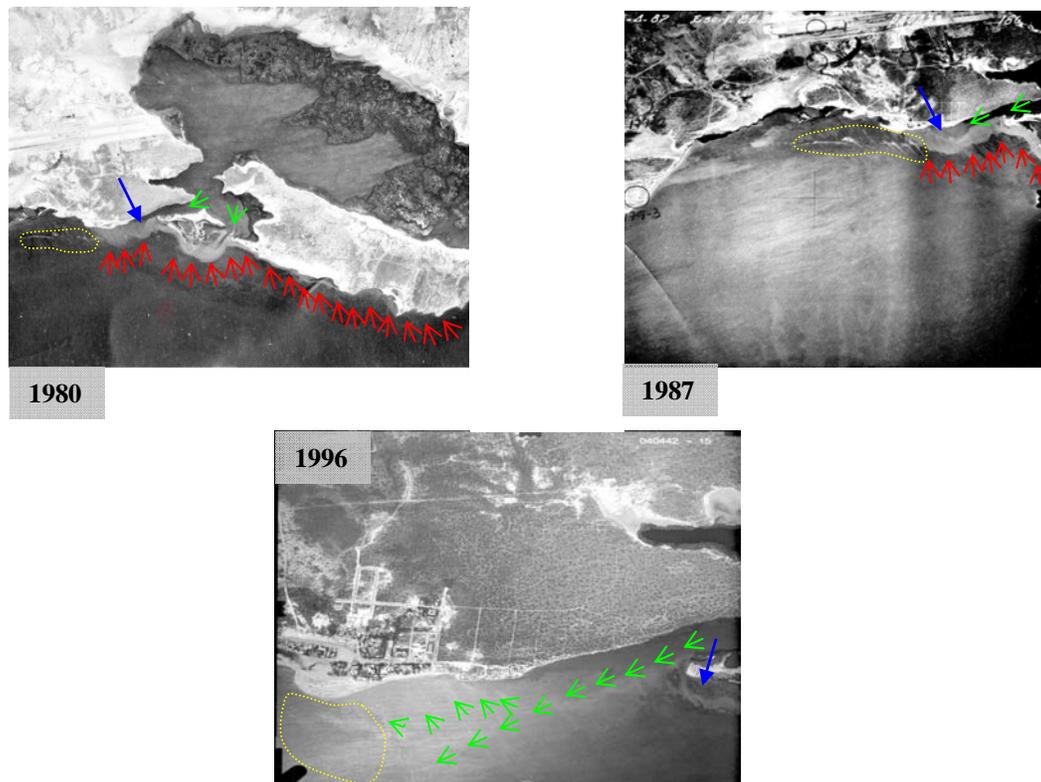


Figura 4.51.Pluma de sedimento y pérdida de praderas de *Thalassia*. El Yaque. Año: 1980-1996. Fuente Foto: TRANAR-MARNR

En la figura 4.51 se puede notar que para el año 1980 existe un transporte de sedimento litoral que viene marcado por una franja de color claro desde Punta Mosquito (lado más Sur y Este de las Isla) pasando por todo el borde de la playa hasta la población de La Isleta. Luego esta franja se une con un sedimento que sale de Boca Nueva en la laguna de Las Marites formando una zona ancha en forma de lóbulo la cual siguiendo el curso del trasporte litoral, sigue aportando sedimento hacia la playa bordeando la isla La Placeta, cruzando la Boca Victoria y continuando el borde longitudinal de la playa. Adicionalmente la contribución de las corrientes provenientes de la Boca Victoria el sedimento es empujado y esparcido siguiendo la misma trayectoria que se observo en los flotadores manteniendo un área sedimentaria de considerable magnitud eliminando toda pradera de *thalassia* que allí pudieran haber existido antes de este año.

Si comparamos con la foto de 1987 donde escasamente se aprecia una pequeña porción de la pluma de sedimentos que se mantiene prácticamente en la misma condición de transporte de sedimento desde Punta Mosquito bordeando, se observa también, que la *thalassia* se pierde en pequeña proporción en determinado por marcados claros en la parte occidental.

Con respecto al año 1996 se observa un área libre mayor de plantas fanerógamas, con la particularidad que la franja de sedimento que proviene del transporte litoral desde Las Isleta, Boca Nueva y Punta Mosquito se pierde considerablemente haciendo que la fuente de suministro del sedimento que proviene de la laguna prácticamente salga por la Boca Victoria posiblemente con mayor velocidad que la que podía tener cuando las dos bocas actuaban como vasos comunicantes entre el mar y la laguna, lo que cambiaría el régimen de corrientes e impulsaría el sedimento hacia una mayor distancia ampliando el área libre de *thalassia*.

4.3.5. Influencia de las Tormentas.

También hay que considerar el comportamiento de la costa en condiciones meteorológicas adversas. Como fue el caso del paso del huracán Iván, en los primeros días del mes de septiembre del 2004, este fenómeno meteorológico se presentó, con una trayectoria que estaba considerada a través de las islas del Caribe pasando por República Dominicana, Cuba hasta las costas de La Florida –E.E.U.U. El cono de vientos arrojaba una extensa área del mar Caribe y aunque no afectaba de manera directa a la Isla de Margarita la acción de sus vientos si tenían afectación en la zona.

En esta ocasión se pudo observar en las *Figuras 4.52 y 4.53* la pérdida de la línea costera, así como el daño en el espigón N° 3, además de

gran cantidad de material vegetal arrancado del fondo por el fuerte oleaje, debido al viento originado por los coletazos del huracán. Esto demuestra la fragilidad en el equilibrio entre la erosión y deposición de sedimentos que se presenta en éste sistema costero.

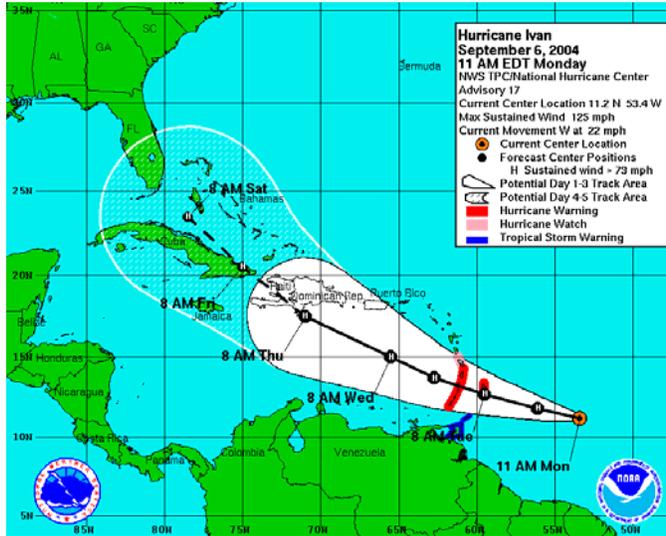


Figura 4.52. Área de acción del Huracán Ivan. Año: Septiembre 2004. Fuente: NOAA



Figura 4.53. Comparación de Fotografías de la Línea de Costa de la zona Este ANTES y DESPUÉS del paso del Huracán Ivan. Año: Septiembre 2004 Fuente: ASOYAQUE

A mediados del mes de julio de 2005, se presentó una tormenta tropical denominada Emily, cuya trayectoria tenía posible impacto contra la isla de Margarita. Sus velocidades de viento eran de 45 a 55 nudos (84 a 102 km/h) sostenido y una altura de oleaje promedio de 2,3 m, se apreciaron olas de hasta 3m cercanas a zonas costeras. (Ver Figura 4.54).



Figura 4.54. Área de acción del Tormenta Emily.
Año: Julio 2005. Fuente: NOAA

En esta ocasión se pudo determinar las líneas de costa antes y después del evento, así como también se recopiló material fotográfico de la zona de estudio después del paso de la tormenta. (Ver Figura 4.55).



Figura 4.55. Comparación de la línea de costa año 2005 y la generada por el paso del Tormenta Emily. Año: Julio 2005. Fuente: PROPIA

La forma de la costa obtuvo algunas variaciones sobre todo en la parte Este de la playa (Frente a los hoteles), se observa una erosión fuerte en esa área adicionalmente el comportamiento en las otras zonas fue similar salvo en las cantidades de sedimento perdidos.



Figura 4.56. Línea de costa zona Este luego de la acción del Tormenta Emily. Año: Julio 2005. Fuente Foto: PROPIA

Hay que notar la forma escalonada que se presenta en la playa a todo lo largo, signo de un fuerte y agresivo proceso erosivo en donde el oleaje es un papel importante en el moldeado de la costa.

La pendiente de la playa se presentaba más pronunciada, en la cual se evidencia el fuerte arrastre hacia aguas adentro de los sedimentos por efecto del fuerte oleaje, como se observa en la *Figura 4.56*.

El viento para ese momento se presentaba en sentido contrario a que comúnmente se presenta, o sea, en sentido WSW.

La zona que corresponde al espigón ya colapsado llamado Espigón N° 2 también sufrió una erosión de considerable cuantía. Se puede apreciar el campo de despojos comprendido por el material vegetal (*thalassia*) arrancado por el oleaje de fondo que se presenta, al igual que afloran las capas de suelo arcilloso cuando la erosión es muy fuerte y quita el material granular de su superficie. Lo que evidencia que el sedimento no es un material originario de esa zona sino que es producto de la deposición por el transporte y que la capacidad de la costa de transportar no es de gran cuantía. (Ver figura 4.57.)

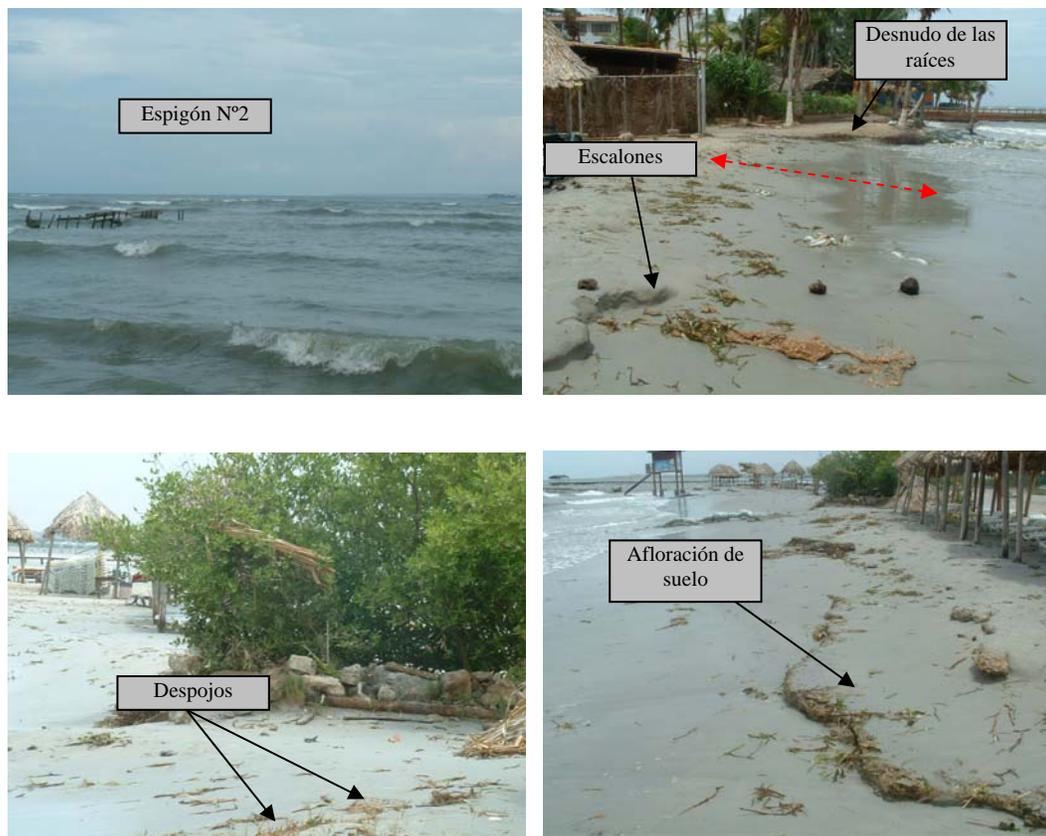


Figura 4.57. Efectos producidos por el oleaje en el paso de Tormenta Emily. Año: Julio 2005. Fuente Foto: PROPIA

Los Mini -Espigones de sacos de arena también sufrieron destrozos a causa de los embates del fuerte oleaje, de hecho, fueron sacados de su sitio original y rotas sus bolsas contenedoras de material de relleno.



Figura 4.58. Daños producidos por acción del oleaje de la Tormenta Emily. Año: Julio 2005. Fuente: PROPIA

La exposición de las raíces de árboles que se encontraban en la orilla de la costa es un elemento predominante en la zona cuando se producen estos eventos.

En la parte Central hacia la lengüeta presentan la misma forma de escalones en la arena donde la pendiente es bastante pronunciada hasta vertical en algunos casos con profundidades de hasta 1 metro, como indicio de una gran fuerza ejercida por el oleaje sobre la costa. Hay que tomar en cuenta que para esa zona no existe espigones que produzcan un reservorio

de arena adicional que permita se deslice el oleaje y haga el proceso de *Run Up* y *Run Down* moldeando la arena de manera más suave, sino mas bien es una zona libre donde el oleaje golpea de manera frontal y su fuerza produce este tipo de cortes. (Ver Figura 4.58).

La agresividad del proceso se puede evidenciar en algunas estructuras comunes que se encuentran a orilla de playa. (Ver Fotografía 4.35 y 4.36).



Fotografía 4.35 . Afectación de estructuras cercanas a la costa por acción del oleaje de la Tormenta Emily. Año: julio 2005. Fuente: PROPIA



Fotografía 4.36. Modificación de la línea de costa en la lengüeta por efecto del oleaje de la Tormenta Emily . Año: Julio 2005. Fuente: PROPIA

La recuperación de la playa es posible es con el tiempo, dependiendo de la capacidad de transporte de la playa y de que existan condiciones meteorológicas favorables.

4.4 COMPARACION DEL APOORTE A LA PLAYA DE SEDIMENTO VIA LITORAL CON EL APOORTE DE SEDIMENTO VIA EÓLICA

Una relación importante es hacer una comparativa entre el aporte de sedimento movido por el transporte litoral y el transporte eólico como se puede observar en las siguientes tablas:

Tabla 4.7. Aporte y transporte litoral anual

LITORAL	SW	S	SE	E
% OCURRENCIA *	0,99	2,19	9,71	51,39
APORTE TOTAL	30.592,71 M ³ /AÑO			
% DE APOORTE AL AÑO	0,60	1,31	19,48	78,60
TRANSPORTE PARCIAL (M ³ /AÑO)	184,2	400,5	5.961	24.047
TRANSPORTE TOTAL	29.423,11 M ³ /AÑO			

Tabla 4.8. Aporte y transporte eólico anual para vientos a 15 km/h sostenido

EÓLICO VM= 15 KM/H	SW	S	SE	E
% OCURRENCIA *	0,99	2,19	9,71	51,39
APORTE TOTAL	2.109,64 M ³ /AÑO			
% DE APOORTE AL AÑO	0,11	0,23	1,04	5,52
TRANSPORTE PARCIAL (M ³ /AÑO)	32,51	70,9	318,8	1.687
TRANSPORTE TOTAL	1.902,78 M ³ /AÑO			

Se puede evidenciar que el aporte a la playa vía litoral es superior al aporte eólico considerando las direcciones predominantes en la zona y un período de un año, con ello se realiza una grafica comparativa con tres combinaciones Transporte Litoral, eólico a 27 kph y 15 kph sostenido y con 0% de vegetación superficial. Ver **ANEXO (44)**.

Si el aporte total litoral es de 30.592,11 m³ al año esto implica que el aporte total de la zona por vía eólica en condiciones de 0 % de vegetación superficial y con vientos sostenidos de 27 kph durante todo el año soplando en las direcciones predominantes observadas, representa el 45,62% del aporte total litoral y con vientos de 15 kph sostenidos durante todo el año es solo del 6,90% del aporte total litoral, lo que es indicativo que el mayor aporte es litoral.

4.5 DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DEL SEDIMENTO

Para conocer las posibles soluciones a la problemática planteada en playa El Yaque es necesario conocer los diferentes orígenes de los sedimentos encontrados en la zona.

Para ello se dispuso del análisis por microscopía electrónica de barrido el cual permite dar indicios de donde y como pudieran estar relacionadas las muestras tomadas por medio de un análisis elemental, buscando la relación entre % en peso de los elementos básicos como Calcio y Sílice que componen dichas arenas.

Aunque este análisis no es totalmente predictivo en cuanto al caso debido a que es requerida una toma de sedimentos mayormente distribuida en la zona, al igual que particularizar ésta en puntos específicos que se consideren claves para una caracterización de este tipo, nos pudo dar una

idea inicial de donde pudiesen provenir éstos. Como se presenta en las *Tabla 4.9*.

En cuanto a los elementos comunes encontrados podemos indicar que son el Calcio (Ca) de densidad 1.550 kg/m^3 , mayormente proveniente de la disgregación de los componentes orgánicos encontrados en las aguas y el sílice (Si) de densidad 2.330 kg/m^3 que uno de los mayores componentes de las arenas continentales. Para ello se cruzo información de estos elementos bases que componen las arenas con cada una de las muestras tomadas en la zona de estudio y en función de de sus cantidades por componente (% en Peso del elemento en la muestra) se elaboraron los gráficos de frecuencia con que aparecen estos elementos en un rango determinado de cantidades.

Tabla 4.9. Comparativa de % en peso en Ca y Si del sedimento

Mayores en Ca (% peso)	Muestra	Ubicación
57,36	M50	Morro (parte alta)
57,83	M31	Morro (parte alta)
56,60	M53	Isleta

Mayores en Si (% peso)	Muestra	Ubicación
50,30	M5	Costa afuera frente Morro
49,98	M11	Costa afuera frente Hoteles
47,62	M6	Costa afuera frente Morro

En cuanto a las muestras comunes en proporciones similares en Calcio, se pudo determinar que pertenecían a tres puntos en específico como lo es La Isleta (sumergida) y el Morro (parte alta) de las cuales el % en peso de los elementos que lo conforman son muy similares dando indicios que el transporte de sedimento desde la isleta hasta el morro sea vía litoral para luego moverse eólicamente hacia la parte alta del morro.

También se establecieron relaciones con respecto al porcentaje en peso de Sílice (Si) en donde se pudo observar como éste grupo de muestras sumergidas viene desde aguas profundas en sentido del oleaje hacia la costa en la playa frente al área hotelera.

Es importante considerar que las densidades de estos elementos difieren en cantidad, por ejemplo, los elementos cálcicos son menos densos que los elementos de silicio, esto implica que puedan ser transportados eólicamente y los de silicio sean movidos mayormente por vía litoral.

Por otro lado se compararon dos muestras que resultaron muy similares en su valor de % en peso en Ca y Si como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 4.10. Comparativa de % peso misma proporción en Ca y Si del sedimento

Comunes en Si (% peso)	Comunes en Ca (% peso)	Muestra	Ubicación
32,03	32,60	M61	Playa. Cerca Muelle Turístico
31,49	32,94	M30	Base del morro

Es de notar que estas muestras son mezcladas, con los dos componentes que en mayor proporción conforman éstas arenas, la muestra M30 pertenece a la playa (parte superficial) en la base donde se encuentra el morro y la muestra M61 se encuentra localizada hacia el Oeste de la playa donde se encuentra el Muelle Turístico. La composición de estas muestras nos indica que posiblemente ese material tiene el mismo origen y que ha sido trasladado en sentido de las corrientes desde el Este al Oeste, alimentando ese lado de la playa.

También existe la misma particularidad para la muestras M53 y M50 que aunque pertenecen mayormente a la clasificación de origen Cálcico,

entre ellas tienen la misma proporción en % en peso, lo que es indicativo de que provengan de la misma fuente. (Ver Figura 4.59).



Figura 4.59. Puntos de ubicación de las muestras comunes en % en peso de sus elementos bases. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

También se establecieron enlaces de muestras con elementos comunes en proporciones de % en Peso menores a 1 % y 2 % entre ellos, el cual amplió el espectro de muestreo. Se observó las diferentes posibilidades en que las muestras se relacionan entre sí, en donde pudieran ser originarias; sin embargo esto no resulta tan confiable porque se presenta un mayor error debido a que en el rango de mayor % en peso pueden entrar mayor cantidad de muestras. Ver **ANEXO (45); (46)**.

CAPÍTULO V

SIMULACIÓN DE LA COSTA A TRAVÉS DE UN MODELO MATEMÁTICO

5.1 INTRODUCCIÓN

Con la introducción del computador hace una posible analizar y resolver ecuaciones complejas, las cuales utilizando métodos numéricos sirven para diseñar obras de ingeniería.

Para el trabajo de investigación desarrollado se consideró utilizar esta herramienta para realizar simulaciones de la costa en diferentes etapas al igual que en diferentes épocas. El modelaje matemático resulta ser de gran utilidad para la toma de decisiones a la hora de proyectar una obra de ingeniería, ya que mediante ésta se puede conocer a priori las consecuencias de la construcción de obras hidráulicas sobre la costa.

La dinámica costera de playa El Yaque está caracterizada principalmente por la influencia directa del clima de oleaje, dominada por los vientos, las corrientes marinas y el volumen de sedimentos transportado; aunado a esto, existen obras hidráulicas que están modificando de forma drástica la evolución natural de esta costa.

Como consecuencia de esto, la erosión y deposición que existen en la zona cambian con gran intensidad según las condiciones meteorológicas, la posible influencia que ejerce la laguna Las Marites sobre el área por el movimiento de corrientes a través de su boca activa, el transporte litoral y las obras hidráulicas ubicadas a lo largo de la costa.

Debido a estas particularidades, estimar el transporte de sedimentos, la erosión y deposición en el sistema es más complejo.

El propósito de modelar es el de tratar de conocer en detalle la evolución de la línea de la costa y determinar cuáles son las obras hidráulicas y medidas a ser implementadas para estabilizar la línea costera y minimizar el efecto erosivo que se viene observando en los últimos años.

Para ejecutar esta fase del estudio se utiliza el simulador GENESIS95 Vers.1.5, desarrollado por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de Costas de la Armada de los Estados Unidos en conjunto con el Instituto de Tecnología LUND (*COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER & LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY*), el cual se aplicará para modelar la costa y determinar su tendencia en cuanto a los procesos de erosión y deposición por la inclusión de nuevas obras hidráulicas.

5.2. MODELO UNIDIMENSIONAL DE MORFOLOGÍA COSTERA GENESIS95

5.2.1 Descripción del Modelo

El GENESIS95 es un software, en su versión demostrativa (*shareware*), especializado para el modelaje del transporte de sedimento no cohesivo bajo la acción de olas y corrientes, transporte de litoral y evolución de líneas de Costeras. Este modelo es precisamente clasificado en la categoría de unidimensional debido a que no considera las condiciones meteorológicas como tormentas cuya duración es de horas, ni condiciones estacionales (Primavera, Veranos, Otoños o Inviernos); al igual que sus períodos de ejecución son de larga data (años). Adicionalmente, un modelo unidimensional simula las características esenciales de una costa como la

línea de contorno considerando un perfil transversal uniforme a todo lo largo de la playa sin ser capaz de simularlo.

Entre las aplicaciones básicas del GENESIS95 se incluyen:

- Movimiento de sedimento a lo largo de playas arenosas.
- Evaluación del impacto debido a trabajos costeros.

El GENESIS95 está compuesto por varios módulos que trabajan relacionados entre si y los cuales son utilizados para determinar y para valorar los procesos erosivos en conjunto (línea de costa y sedimentación).

- *START.DAT*: Se encarga de recibir la data esencial para realizar los cálculos de oleaje y transporte de sedimento, adicionalmente las variables de calibración y las obras que van a representarse en la costa.
- *SHORL.DAT*: Comprende la información de la línea d costa inicial la cual es introducida mediante distancias de puntos consecutivos.
- *SHORM.DAT*: Comprende la línea de costa esperada introducido de la misma manera que la línea de costa inicial.
- *WAVES.DAT*: Basado en los datos medidos en campo y ordenados por periodo, altura de ola y ángulo de aproximación a la costa. Se desarrolla en función tiempo de modelado de manera diaria.

Para poder aplicar el simulador es necesario definir cuales van a ser los campos de datos que van a ser incluidos en los cálculos y como van a ser esquematizados, es decir, de qué manera van a ser presentados y alimentados al software para que éste los reconozca como tales, estos campos son:

- *Geometría*: está definida por la línea de costa y por las secciones normales a ésta. Para el modelo se utilizó la costa en completa que refiere la zona estudiada de 1,6 km.
 - Distancia a la línea de costa desde la línea base (puntos representativos del contorno de la línea costera Inicial y esperada).
 - Alto de la Berma o distancia vertical medida desde el nivel medio del mar hasta la proyección horizontal de una línea sobre la superficie seca.
 - Profundidad de cierre o *Depth of Closure* (h_c): profundidad del punto desde donde el modelo comienza a simular, comúnmente es el punto donde existe un cambio de profundidad en el fondo por efecto de tormentas o cambios estacionales. También es considerado como la altura de oleaje “efectivo” que solo es superada 12 horas al año en referencia a su media. Esta variable se ve determinada por la altura del oleaje (H_e) y el período desde aguas profundas (T_e).

$$h_c = 2.28H_e - 68.5\left(\frac{H_e^2}{gT_e^2}\right) \quad \begin{matrix} H_e: \text{ metros} \\ T_e: \text{ segundos} \end{matrix} \quad (V.1)$$

- *Condiciones del Oleaje Local*: este debe ser definido con los siguientes parámetros:
 - Período de la ola
 - Altura de la ola
 - Ángulo de incidencia del oleaje costa afuera
 - Profundidad costa afuera del oleaje en el área donde se tienen los datos.
 - Fecha de inicio de la simulación

- Fecha final de la simulación
 - Fechas intermedias (entre la inicial y la final), en la cual se desea mostrar la evolución.
- *Aportes de Sedimentos*: en el caso de las costas donde se pretende simular una restitución artificial y el transporte de sedimentos son definidos por los siguientes parámetros:
 - Diámetro medio (D_{50})
 - Definición zona donde se va a realizar la restitución
 - El período de tiempo de la restitución
 - Ancho de la zona a restituir
 - *Estructuras*: en el GENESIS95 se pueden definir tres tipos de estructuras hidráulicas los espigones perpendiculares a la costa (*Diffracting y No Driffracting Groins*) los cuales representan espigones largos o obras que superen la zona rompiente y los cortos los cuales comúnmente no superan dicha zona respectivamente y los Rompeolas (*Breakwaters*). La principal diferencia que tienen los espigones cortos y los largos en cuanto a los cálculos internos del software es que para los cortos el cálculo de la erosión se hace de una manera más esquemática y simple que para los espigones largos, donde la difracción es importante).

En cuanto a los rompeolas a la costa se realizan los cálculos basados en el coeficiente de transmisión de oleaje. Se definen, con la ubicación de ambas puntas y hay que tener consideraciones especiales para la esquematización de estos, ya que no se pueden colocar solapados pero si pueden ser perpendiculares, oblicuos, paralelos y segmentados; debido a que los efectos combinados de difracción

(superposición de las zonas de sombras proyectadas por cada espigón) no son considerados en un modelo unidimensional como el GENESIS95.

Básicamente los pasos para el cálculo en el GENESIS95 siguen el orden siguiente:

1. Inserción de los puntos de la línea de costa donde se comienza la simulación y la línea final esperada, a través de una tabla tomando en cuenta una línea base para la representación de estos puntos y definiendo la zona de influencia.
2. Creación de la tabla de valores de oleaje de una sección dada, para un rango de oleaje costa afuera incluyendo altura, dirección, período de entrada.
3. Para la sección de cálculo, el programa interpola los valores existentes en las tablas creadas y define la derivación de la ola en el momento y en el lugar indicado.
4. Con éstas características de oleaje y sedimento, se determina el transporte y la capacidad de la zona.
5. De acuerdo a la capacidad de transporte de la sección se simula el comportamiento de la costa en las condiciones dadas y en un período de tiempo específico.

A continuación se describirán las variables utilizadas para el desarrollo del modelo en el área playa El Yaque.

5.3 GEOMETRÍA

La geometría utilizada para el desarrollo del modelo está basada en la información obtenida en campo durante el período 2005-2006, la cual está conformada por trazados de líneas costeras desde la playa (orilla) en su contorno por toda la zona estudiada.

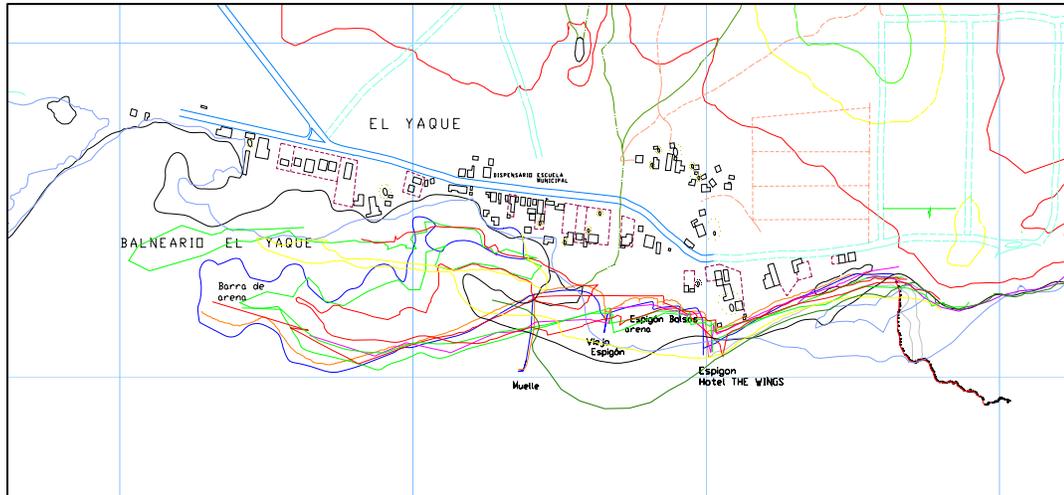


Figura 5.1. Diferentes líneas de costa medidas en campo de la zona de estudio.

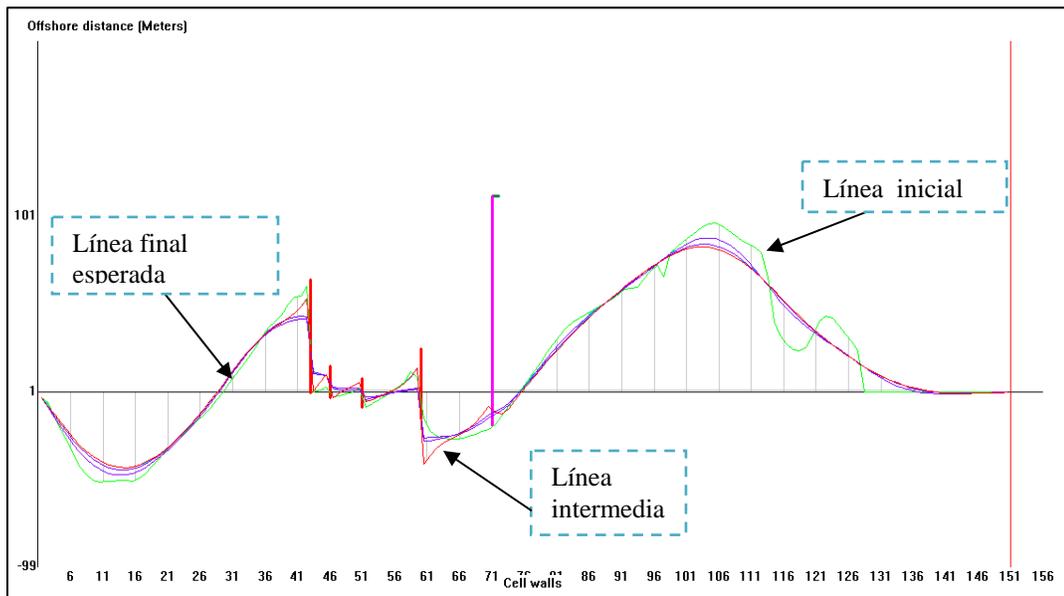


Figura 5.2. Líneas de de costa representadas por el simulador

Además de esta información se requirió utilizar valores batimétricos, debido a que los datos de oleaje (altura, período y dirección de procedencia) fueron obtenidos costa afuera, en la zona de aguas profundas, sector en el cual se puede aplicar el clima de oleaje obtenido de la información proveniente del V.O.S. (*Visual Observation System*).

Para la calibración del modelo se utiliza el contorno de la línea de costa proveniente del levantamiento del 01 de Julio del 2005 y en cuanto al desarrollo del modelo el contorno de la línea utilizada es la del último levantamiento realizado en Diciembre del 2006. Para ambos casos (calibración y desarrollo del modelo) se utilizan los valores de las pruebas realizadas en campo para el año 2005, como mediciones de diferentes recorridos de la costa y clima de oleaje.

Hay que señalar que se esquematizó ésta información para poder alimentar al programa, la línea de la costa se dividió en celdas con una separación de 10 metros, esto es fue considerado según el siguiente análisis:

- La línea de la costa, se inició la simulación con un ancho de celda de 100 metros, la cual fue muy abierta y debido al número limitado de celdas que procesa el programa no se logró definir completamente la forma de la costa durante las simulaciones, se requirió densificar más el ancho de la celda llevándolo a 10 metros. El usar ésta opción permitía obtener un mayor nivel de precisión pudiendo colocar un contorno completo en un solo conjunto que comprende la línea de la costa incluyendo la lengüeta.
- Para la determinación de la altura de la berma de la costa, se realizan cálculos en función de los perfiles normales a la costa. Se particulariza el perfil en los primeros 50 m y su medición vertical desde el nivel medio del mar (NMM) hasta la proyección horizontal de una línea sobre dicha berma en la orilla de la playa. Ver **ANEXO (47)**

Todos los datos geométricos relacionados con posición (coordenadas) y profundidades fueron preparados para ser utilizados en los modelos ya descritos.

En los anexos: **ANEXO (1) PLANO 9; 18 y 20** al igual **ANEXO (7)** se puede observar un plano detallado de contornos de profundidades utilizado para el oleaje, las líneas de la costa empleada y el perfil batimétrico incluido dentro del modelo.

5.4 CONDICIONES DE BORDE DEL MODELO

5.4.1 Clima de Oleaje

Como ya fue mencionado el clima del oleaje local utilizado en modelo fue resultado del análisis de la información existente en el Sistema de Observación Visual (V.O.S), el cual fue analizado de la siguiente manera:

- *Altura de Oleaje:* Esta información se tomo a partir del informe de V.O.S., para lo cual se construyo la tabla de altura de oleaje y su respectivo % de ocurrencia el cual nos indicio que el oleaje más frecuente o cotidiano es de 0,5 m de altura.
- *Período y dirección del Oleaje:* Estos valores se tomaron de los datos del V.O.S., los cuales tuvieron que adecuarse al ángulo de inclinación que posee la costa y el porcentaje de ocurrencia para cada rango de períodos de oleaje (donde el 100% corresponde a cada caso). Estos porcentajes de ocurrencia después fueron transformados a números de días que representan en todo un año cada dirección.

Hay que mencionar que esta combinación de los datos de las dos fuentes se hizo basándose en dos aspectos:

- El V.O.S. es un sistema donde, como su nombre lo indica, se basa en el análisis estadístico de las observaciones visuales hechas constantemente por los navegantes, por lo tanto es de suponer que por efectos visuales la altura de oleajes pequeños es mucho más difícil de determinar que el período y la dirección del mismo.
- Mediciones puntuales fuera de costa (*offshore*), realizadas en campo, como base para la corroboración de los valores obtenidos mediante investigación.

Todas las gráficas y tablas utilizadas para el análisis y determinación del clima de oleaje definitivo, se muestran en los anexos.

5.4.2 Derivación del Oleaje

En vista de que las curvas batimétricas de la costa son apreciablemente lineales y paralelas entre sí, la derivación del oleaje a lo largo de todos los perfiles de la costa es muy similar y no amerita el uso de un modelo bidimensional o un modelo de refracción para la derivación del oleaje desde costa afuera hasta cada una de las secciones, por lo que el oleaje cotidiano estimado del análisis anterior, es elaborado directamente por el GENESIS95 para la sección que conforman el esquema de la costa.

Esta derivación realizada desde principio de la sección hasta la zona de rompiente (punto hasta donde son válidas las formulaciones aplicadas de Teoría Lineal) es calculada en el mismo modelo unidimensional, tomando la data ingresada e interpolando los valores de las tablas de oleaje construidas y los valores geométricos agregados al modelo.

5.4.3 Otros Parámetros

Adicional a los parámetros anteriores definidos utilizados para el modelo de morfología de la costa, también existen otros parámetros que no han sido mencionados y no por eso dejan de ser importantes, estos son:

- *Factor de tiempo de la corridas o SIMULACIONES:* El campo de *time steps* es la cantidad de tiempo en horas en que el programa toma un valor del archivo de oleaje para hacer los cálculos de refracción de manera diaria. Si se coloca 24 horas, el programa toma un solo valor del archivo de oleaje agregado en el *waves.dat*, si se coloca 12 horas, éste toma 2 valores de oleaje por día de dos direcciones predominantes y si se coloca 6 horas el simulador toma 4 valores por día. Para los efectos de cálculo el simulador se tomaron valores cada 6 horas a fin de obtener mayor precisión en los cálculos de derivación de oleaje.
- *Fecha de Inicio, Intermedias y final de la simulación:* la colocación de las fecha de inicio es cónsona con la fecha que se tomo la medición del contorno de la línea de costa, las intermedias son las que se espera conocer en función a la dinámica costera representada por el programa y la final esperada es la última línea medida al completarse el proceso de modelaje
- *Profundidad de entrada del oleaje fuera de costa:* el valor de la profundidad de entrada es importante en el GENESIS95 para el cálculo interno de la refracción del oleaje hasta zona rompiente. Este valor representa la profundidad fuera de costa de donde se considera que se va se inicia los cálculos para la simulación, para nuestro caso esta profundidad es 13,40 m medida a 1,05 Km desde la costa.

- *Coeficiente de calibración para el Transporte de sedimento litoral:* este valor es importante para el cálculo del transporte de litoral por el método de *CERC*, utilizado para afinar los cálculos de estimación del transporte de litoral. Los valores se consideran en $K1 = 0,77$ y $K2 = 1,15$ para dar una mejor aproximación y se utiliza para la calibración y verificación del modelo de manera que se asemeje a la situación real. Cabe mencionar que este fue un parámetro de calibración, ya que se requirió adecuar el mismo a la capacidad de transporte obtenida utilizando la formulación de Queen.
- *Características del sedimento existente en la costa:* en vista de que se disponían las curvas granulométricas correspondientes a las secciones transversales de la costa al igual que en la orilla de la playa el sedimento tiene un tamaño aproximado D_{50} de 205 μm .

5.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Ya una vez evaluados los datos de entrada del modelo, se procede a la calibración del mismo, lo cual significa, la adaptación de ciertos parámetros propios del cálculo de la morfología de la costa, hasta lograr llegar a un modelo matemático que simule lo más certero posible la realidad de la costa, el parámetro de comparación será el movimiento de la costa, para lo cual existen varios levantamientos de la misma. Para los efectos de la calibración, se decide tomar los levantamientos realizados el realizado entre Julio del año 2005, con la finalidad de tener una evolución de la línea de la costa como consecuencia de la colocación de los nuevos espigones colocados, bajo un período de tiempo prudencial en donde se pueda haber estabilizado la costa, bajo su nueva configuración.

Con la información geométrica (perfiles y línea de costa inicial para Julio del 2005), la información sobre las características de la arena ubicada en la costa y con el transporte de sedimento estimado para el período en estudio, se calibra el modelo hasta poder representar lo más cerca posible, los cambios morfológicos que resultaron en la nueva línea de costa medida en Diciembre del 2006.

5.5.1 Variables calibradas en el Modelo

Para que el modelo computacional pueda representar el comportamiento de la nueva línea de costa, es necesario calibrarlo, para lo cual se van cambiando ciertas variables intrínsecas en los cálculos realizados por el modelo, los parámetros considerados para la calibración son los siguientes:

5.5.1.1. Variables referentes al Transporte de Sedimento:

- Coeficientes K_1 y k_2 de la fórmula del CERC: Al incluir valores muy altos o bajos que se no se correspondan con los rangos de valores establecidos en el programa para la aplicación en la fórmula del CERC, se produce inestabilidad en el modelo, el rango está establecido para playas arenosas de K_1 entre 0,1 – 1,0 y K_2 entre $0,5_{K_1}$ - $1,5_{K_1}$. Es posible notar que un aumento o disminución considerable de estos valores puede traer cambios bruscos en la cantidad de sedimentos transportados, por eso se utilizaron estas variables de calibración para el transporte de sedimento en el programa GENESIS95 como es indicado por sus creadores.

El valor de calibración que más asemejaba la forma de la costa medida para el año 2005, está en el orden de magnitud de 0,77 para K_1 y 1,15 para K_2 .

La sensibilidad del modelo con respecto a estas variables es realmente considerable, se manejó dentro de los parámetros indicados por el programa hasta ajustarse a las condiciones de costa que se deseaban.

5.6 SIMULACIONES DEL COMPORAMIENTO DE LA COSTA

Los valores más importantes para poder definir o estimar el comportamiento morfológico de una costa es el transporte de longitudinal y el normal a la ésta, el primero se puede definir como la capacidad que tiene la costa para transportar el sedimento en dirección a la línea de costera y el segundo es el dirección perpendicular a la costa.

Los escenarios a simular están definidos por las fechas donde se conocen los distintos casos respecto a los cambios del contorno debido a algunas obras hidráulicas colocadas y por los criterios de las diferentes modificaciones de acuerdo consideradas según las características de la costa.

5.6.1. Simulación 2005 -2006 con Mini-Espigones

Para el año 2005 fecha en que se hizo la campaña de mediciones en campo existían una variedad de obras hidráulicas como el Muelle-Espigón hacia el hotel The Winds en la parte Este de la zona, tres (3) estructuras hidráulicas llamadas Mini- Espigones de sacos de arena de diferentes longitudes en la parte Central y el Muelle Turístico de pilotes de madera en la parte Oeste de la zona de estudio.

Al realizar la simulación se utilizó la costa inicial del 01 de julio 2005 medida en campo, donde se representaban las obras hidráulicas conocidas como:

- Muelle-Espigón: estructura de 62 m de largo de láminas de madera colocadas de tal manera que conforman un cajón cerrado de estructura impermeable. Ubicación: a 430 m desde la línea base en el morro frente al hotel The Winds, lado Este de la playa.
- Mini- Espigones de sacos de arenas: comprenden tres mini espigones ubicados a 30, 80 y 170 m desde el Muelle-Espigón de 15m, 8m y 25m respectivamente de longitud, colocados perpendicularmente a la costa.
- Muelle Turístico: estructura en forma de L de 112 m de largo por 10 m en su parte perpendicular conformada con soporte de pilotines de madera de permeabilidad alta (alrededor del 80 % de permeabilidad). Ubicación: a 283 m desde el Muelle-Espigón hacia el lado Oeste de la playa.

Costa Inicial: Representa la forma de la costa para el 01 de Julio de 2005.

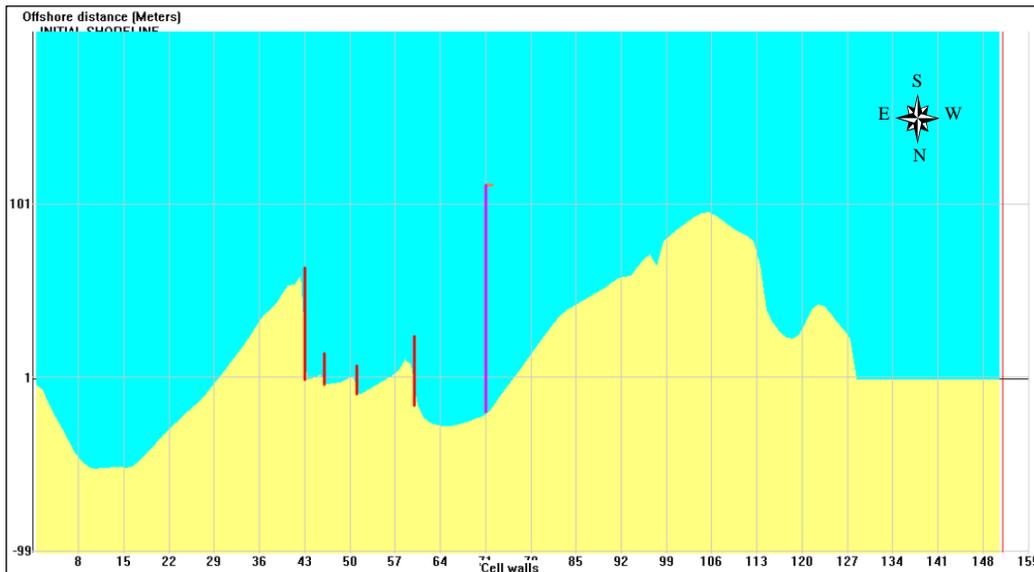


Figura 5.3. Costa inicial simulada 2005-2006 . Fuente: GENESIS95

Costa intermedia simulada: Línea de costa simulada para el 01 de Octubre de 2005.

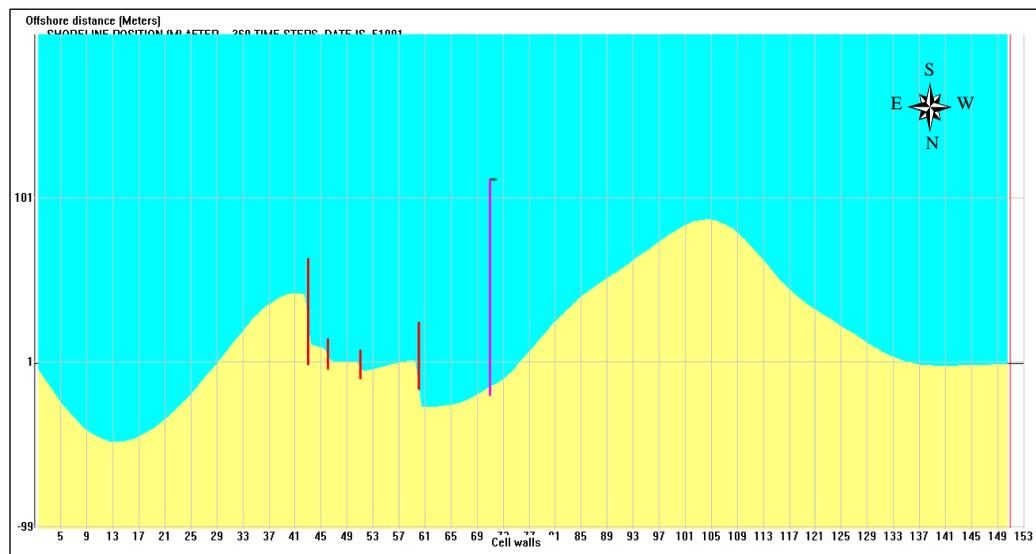


Figura 5.4. Costa intermedia simulada 2005-2006. Fuente: GENESIS95

Se observa como la línea de costa presentaría un cambio detrás del Muelle-Espigón. Los Mini-Espigones trabajan y se presenta una acreción de sedimentos importante en su costado más oriental donde se estabiliza la

costa convenientemente, al igual y como era de esperarse, un incremento del proceso erosivo en el último mini espigón considerando que es uno de los más largos de éste tipo. La zona Oeste de la lengüeta tiende a disminuir en tamaño, o sea, que existe una erosión en esa zona debido al transporte litoral constante que se produce en el área.

Costa final: Representa la forma de la costa para Febrero de 2006.

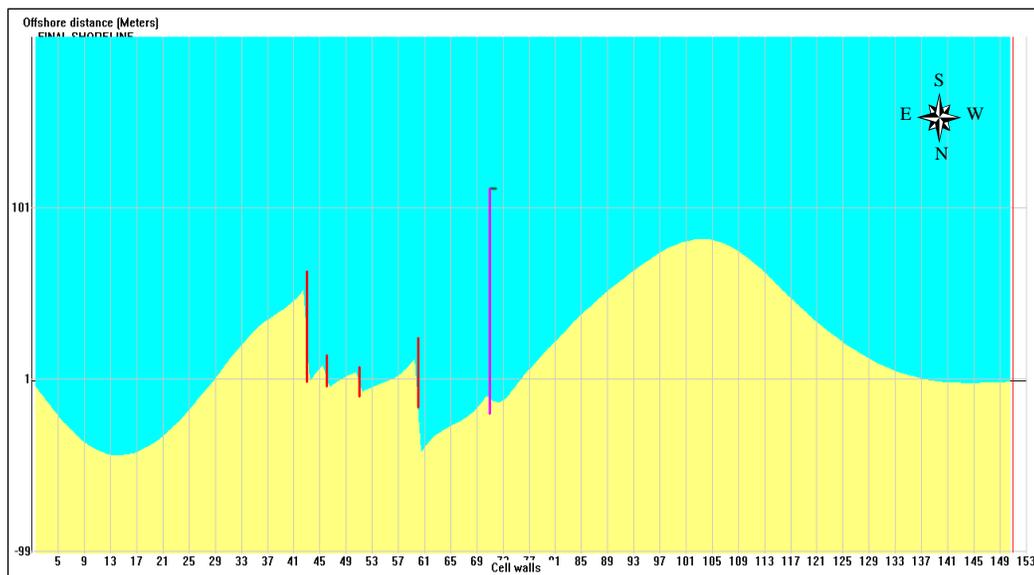


Figura 5.5. *Costa final simulada 2005-2006.* Fuente: GENESIS95

Para los meses siguientes de la simulación de la costa de Febrero, 4 meses después exactamente, se presentaría una disminución considerable de la cantidad de sedimentos en la parte posterior de los espigones y con mayor fuerza en la parte del último mini-espigón de arena ubicado de la zona Central. La lengüeta sigue sufriendo un proceso erosivo considerable y el Muelle Turístico permite el paso de dicho sedimento por ser de alta permeabilidad.

5.6.2. Simulación Marzo 2006 – Diciembre 2006 sin Mini-Espigones y Muelle Turístico Nuevo

Para esta simulación se recrearon las condiciones actuales en donde se retiraron los Mini-Espigones y se retiró el Muelle Turístico para hacer uno nuevo de 48 m de largo en forma lineal y completamente cerrado (Impermeable). Ubicado: a 350 m del Muelle-Espigón frente al hotel The Winds en la parte Oeste de la playa.

Costa Inicial: Representa la forma de la costa para el 01 de Marzo de 2006.

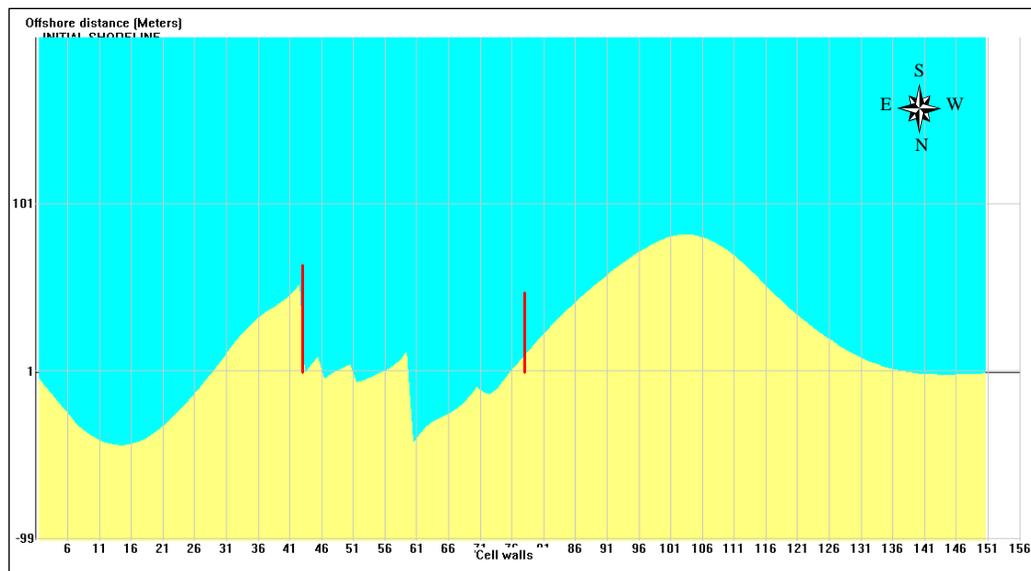


Figura 5.6. Costa inicial simulada Marzo 2006. Fuente: GENESIS95

Costa intermedia simulada: Línea de costa simulada para el 01 de Junio de 2006.

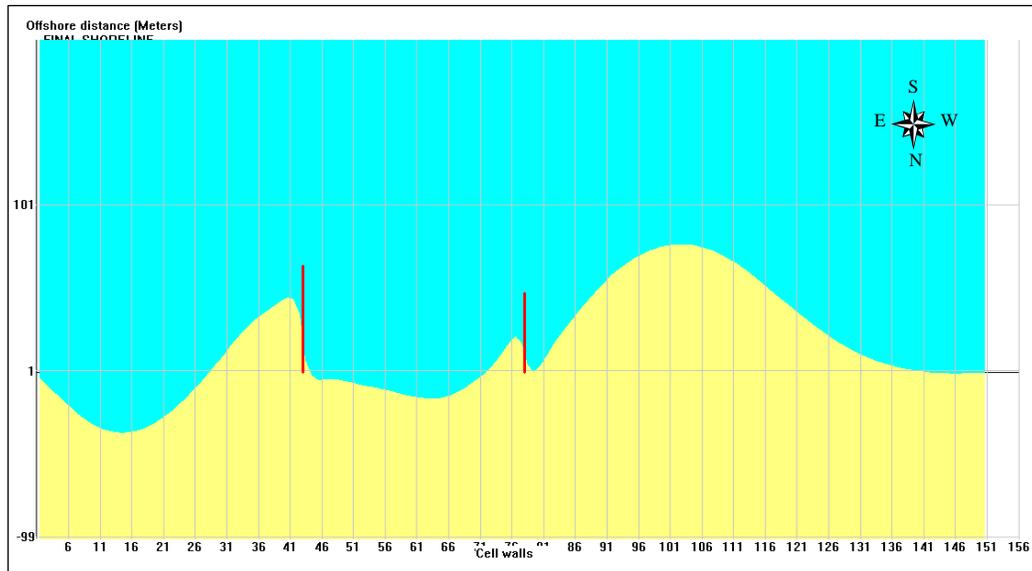


Figura 5.7. *Costa intermedia simulada Junio 2006.* Fuente: GENESIS95

Costa final simulada: Costa estimada para el 27 de Diciembre del año 2006.

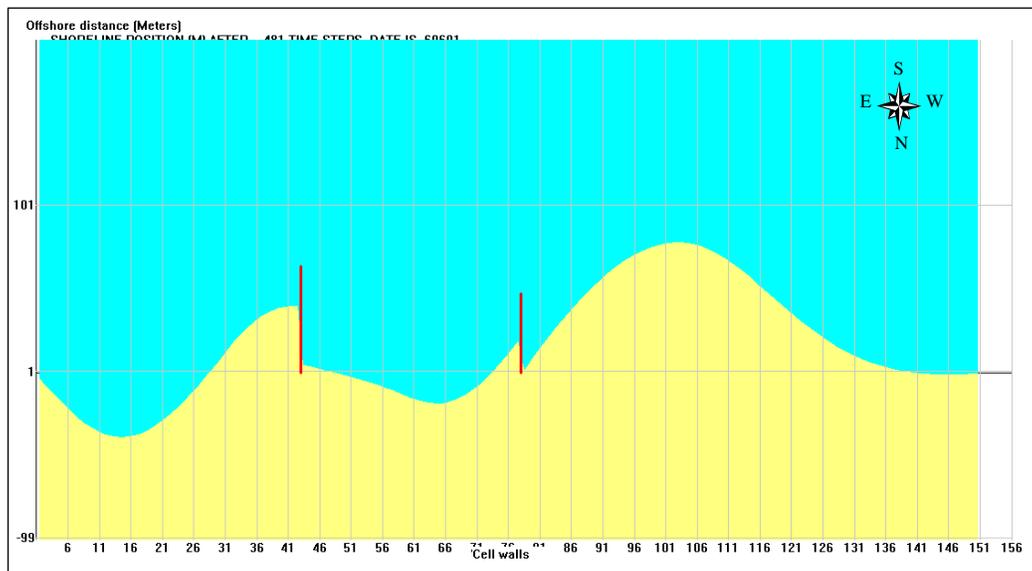


Figura 5.8. *Costa final simulada Diciembre 2006.* Fuente: GENESIS95

En esta simulación se observa que para fecha de Marzo de 2006 línea de costa se muestra con una forma similar a la de la costa de febrero cuando existían Mini-Espigones colocados a diferentes distancias y longitudes. Para el mes de Julio (3 meses después) se nota un cambio en la línea que representa la ubicada entre el Muelle -Espigón y El Muelle Turístico Nuevo. Se reduce la erosión que se presentaba en meses anteriores en los mini espigones como condición normal de funcionamiento, al igual la fuerte erosión que se presentaba en el último mini-espigón específicamente, suavizándose el contorno comparada con la línea del mes de febrero. También en la zona Oeste de la playa se presenta una fuerte erosión justo en el área de anclaje del Muelle Turístico Nuevo modificando la línea de costa en la parte de la lengüeta la cual disminuye su extensión.

Existe de manera general, existe una mejora en condiciones erosivas en la zona central, sin embargo en la zona Oeste se presenta un proceso erosivo fuerte que trae como consecuencia el reacomodo de los sedimentos y posterior disminución del área seca de la playa en la lengüeta.

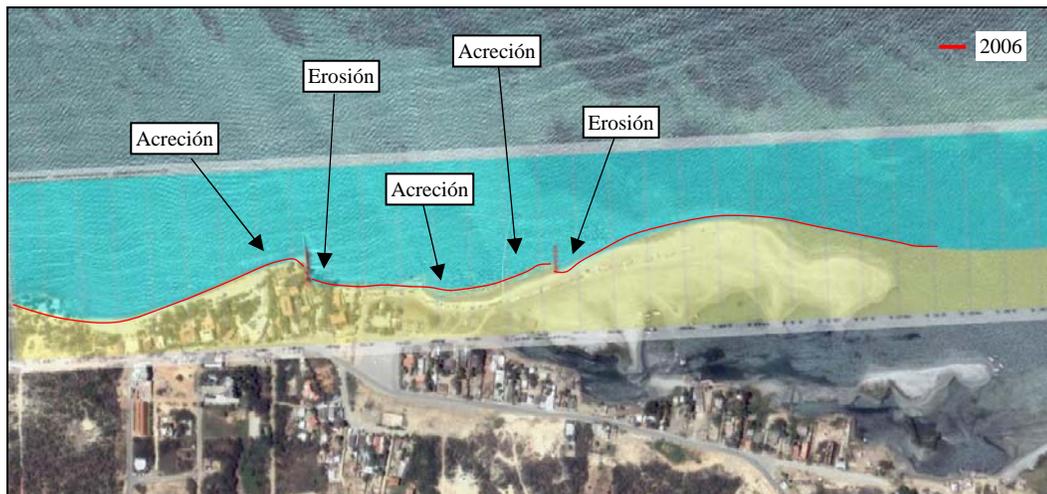


Figura 5.9. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Marzo – Diciembre 2006. Foto Fuente: GOOGLE EARTH

La adaptación de la imagen generada por el GENESIS95 con respecto a la fotografía aérea como se observa en la *Figura 5.9*, nos permite

corroborar que el comportamiento simulado por el modelo se corresponde en una buena aproximación con la forma de la costa que se presenta actualmente. Esto nos permite corroborar la parte de calibración realizada en la cual la costa simulada es semejante a la costa medida.

5.7 ESCENARIOS

Luego de haber determinado las condiciones de borde, la geometría del sector y analizada la evolución que posee esta área costera, se determinó ejecutar los siguientes escenarios:

5.7.1 Evolución de la Costa a 14 años

Determinar la evolución de la costa por 14 años debido a que se consideraba un tiempo prudencial para las simulaciones sin tener que consumir tiempo de cómputo y sin que el programa presentara cambios relevantes. Esta simulación se realizó sin incluir ningún tipo de estructura adicional, es decir, tal y como está actualmente. Mediante este escenario se pretenderá confirmar las hipótesis enunciadas en el estudio de la evolución morfodinámica de la costa.

5.7.1.1. Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 sin Mini-Espigones y Muelle Turístico Nuevo

Esta condición es la actual, se espera una modificación de la línea costera para éste periodo de 14 años.

Costa Inicial: Representa la forma de la costa para el 27 de Diciembre de 2006.

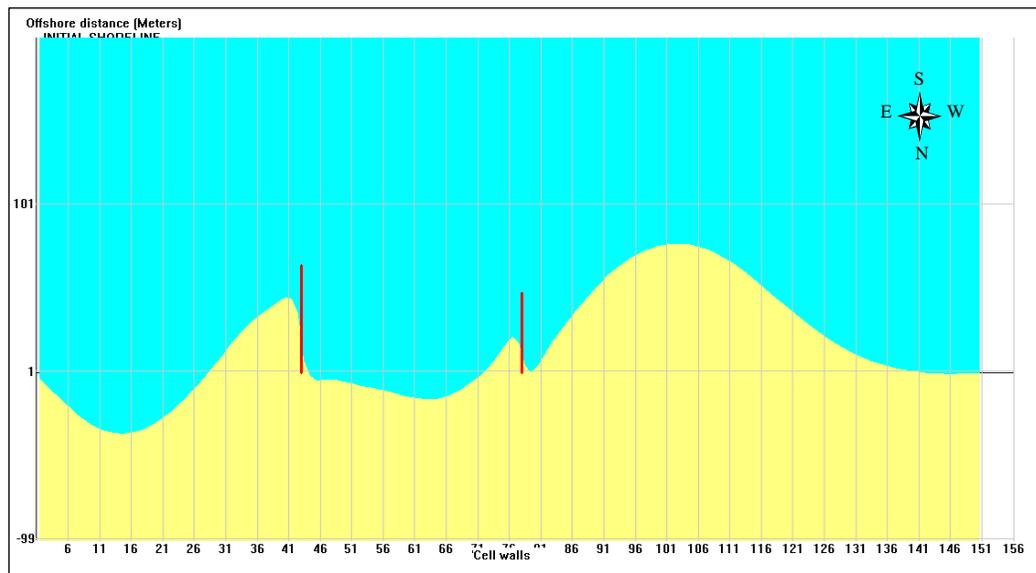


Figura 5.10. *Costa inicial simulada Diciembre 2006.* Fuente: GENESIS95

Costa intermedia simulada: Línea de costa simulada para el 27 de Diciembre de 2010.

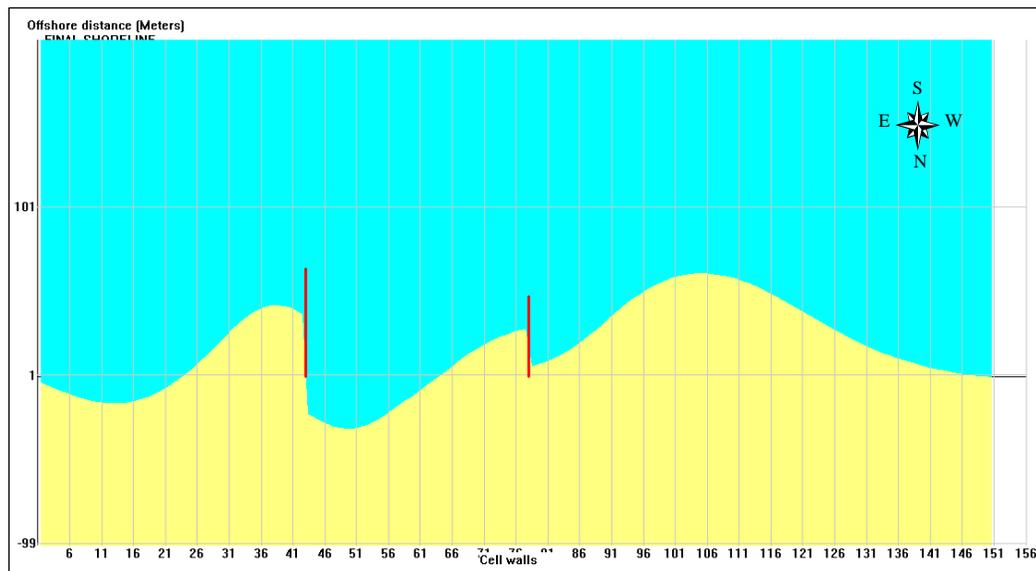


Figura 5.11. *Costa intermedia simulada Diciembre 2010.* Fuente: GENESIS95

Para este caso simulado podemos apreciar que en un tiempo de 4 años se presenta una fuerte erosión entre las dos estructuras restantes que impactaría directamente sobre las infraestructuras turísticas ubicada en el área Central de la zona estudiada. Sin embargo, se observa acreción en la Zona Este y el área adjunta al Muelle Turístico Nuevo, la cual aumenta el área considerablemente y una reducción por erosión en la zona Oeste que comprende la lengüeta occidental.

Costa final simulada: Costa estimada para el 27 de Diciembre del año 2020.

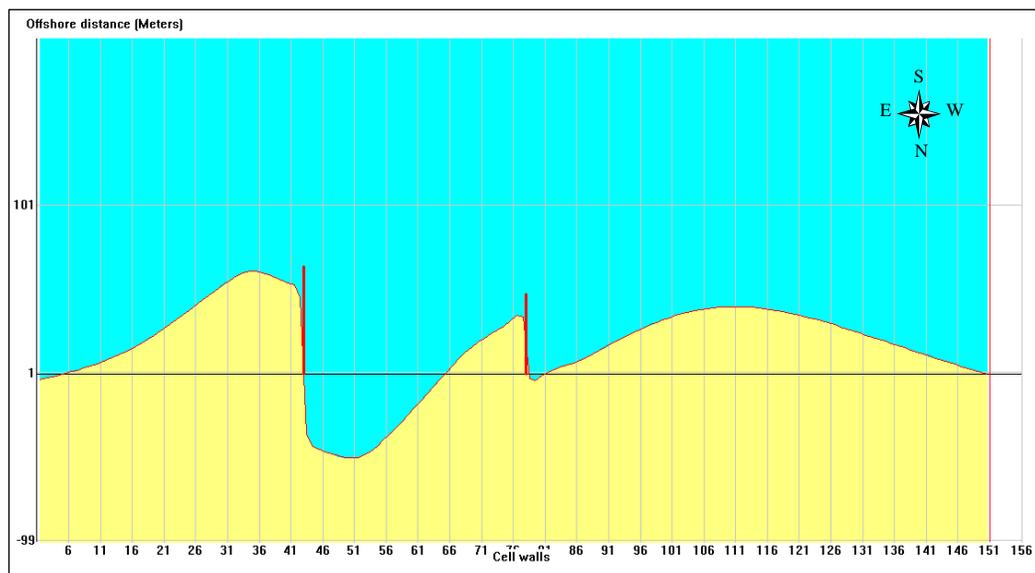


Figura 5.12. Costa final simulada Diciembre 2020. Fuente: GENESIS95

Al final de esta simulación 6 años después (Diciembre 2020) se observa una acreción importante en la zona Este al igual una fuerte erosión como consecuencia de funcionamiento del Muelle-Espigón, en la zona Oeste de la playa se incrementa también la erosión en toda esa área sobre todo en la base del Muelle Turístico Nuevo lo que puede producir que éste pierda su anclaje, adicional la falta de deposición de sedimentos haría que la lengüeta reduzca considerablemente su berma.

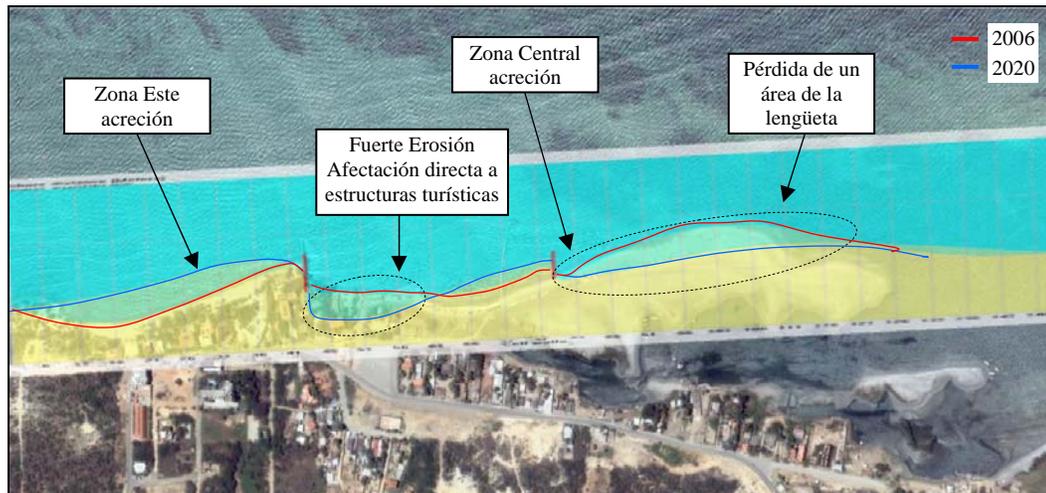


Figura 5.13. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020.

Esta información confirma que el movimiento de sedimentos en la costa es mayormente debido a las corrientes litoral las cuales siguen una trayectoria continua hasta la parte occidental de la isla pudiendo retroceder considerablemente la lengüeta con el tiempo si no se utilizan alguna otra forma de estabilizar la costa. (Ver Figura 5.13).

5.7.1.2 Evolución de la Costa sin incluir Obras nuevas

Determinar la evolución de la costa sin incluir nuevas obras, únicamente rediseñando los actuales espigones para aumentar su permeabilidad a un 50%. Esto se consideró para este estudio debido a que era un opción a corto plazo, sin tener que hacer cambios estructurales complejos, adicionalmente puede ser una de las soluciones visiblemente más económicas comparada con una remoción, traslado o construcción adicional de obras.

5.7.1.2.1 Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con 50% de permeabilidad en Muelle – Espigón y Muelle Turístico Nuevo

En cuanto a ésta simulación se propone darle el 50 % de permeabilidad a las estructuras actuales en donde se esperaría un cambio morfológico favorable en la zona. Para esto, se modificaría el diseño de manera de hacerlo más abierto a fin de mantener un vaso comunicante entre las partes.

El programa no discrimina un diseño específico de espigones, solo lo calcula como estructuras de pequeño tamaño colocada en aguas someras que comúnmente no superan la zona rompiente. La permeabilidad es $F = PERM \cdot (1 - BYP) + BYP$ donde F es la fracción que pasa a través, alrededor o por encima de el espigón; $PERM$ la permeabilidad dada por $1 - BYP$ que significa (1-BY PASSING) y el BYP (BY PASSING). El mayor valor para el calculo es 1 que representa es 100 % y 0 representa el 0 % , o sea, no hay permeabilidad.

Costa final simulada: Costa estimada para el 27 de Diciembre del año 2020 con 50 % de permeabilidad en las dos estructuras.

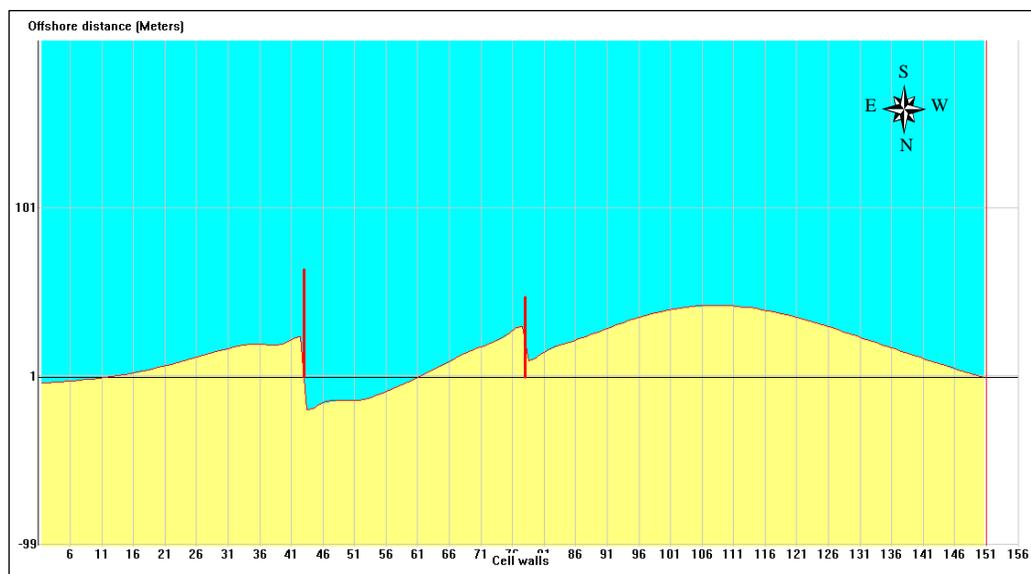


Figura 5.14. Costa final simulada Diciembre 2020 con permeabilidad
Fuente: GENESIS95

El aumento de la permeabilidad en las estructuras cambiaría la forma de la costa en la zona Este produciendo una sedimentación menor que si el Muelle-Espigón fuese totalmente impermeable, al igual que disminuiría la fuerte erosión que se produce detrás de dicha estructura que corresponde a la zona Central. También la sedimentación hacia el Muelle Turístico Nuevo es menor y la parte que lo comunica con la zona Oeste se produce una menor erosión, sin embargo, la lengüeta occidental no incrementa considerablemente su extensión sino que continuaría el mismo proceso erosivo con la consecuente pérdida de área. (Ver Figura 5.15).

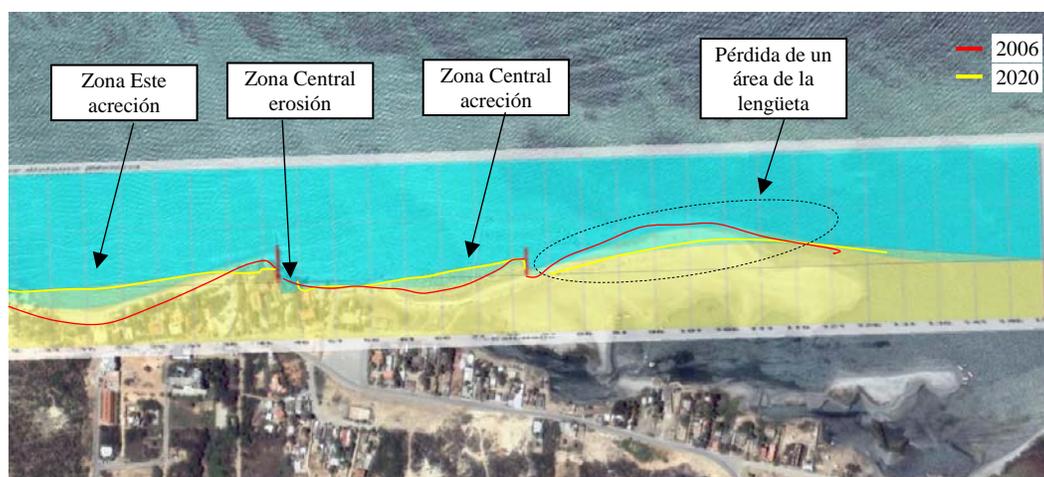


Figura 5.15. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con espigones permeables al 50%.

Esta es una de las posibles soluciones viables por lo económico que se resultaría llevar a las estructuras a un 50 % de permeabilidad sin incurrir en costos mayores, sin embargo, no resuelve el problema en toda la zona.

5.7.1.3 Evolución de la Costa utilizando obras o medidas de estabilización

Determinar la evolución de la costa al incluir nuevas estructuras, implantación de nuevas estructuras y/o medidas que permitan estabilizar la línea costera:

- Colocación de un nuevo Espigón entre los anteriores
- Traslado del Muelle – Espigón 100 m hacia la zona Oeste
- Espigón separado de la costa en el punto donde se encuentra la thalassia en la barra para retener arena la barra.
- Relleno de playa entre los espigones actuales
- By Pass

5.7.1.3.1 Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con inclusión de Espigón nuevo entre las dos estructuras básicas

Colocación de una estructura fija de tipo espigón cerrado (permeabilidad cero) de 30 m de longitud ubicado entre las dos estructuras básicas a 182 m partiendo desde el Muelle-Espigón.

Costa final simulada: Costa estimada para el 27 de Diciembre del año 2020 con espigón intermedio entre las dos estructuras.

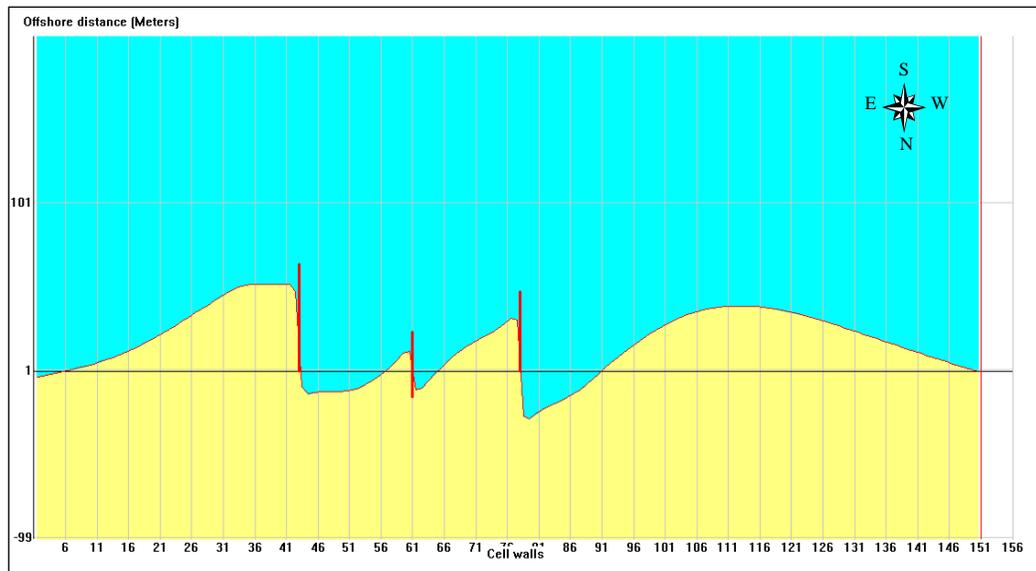


Figura 5.16. Costa final simulada Diciembre 2020 con espigón intermedio
Fuente: GENESIS95

En la simulación se representaría un proceso erosivo considerable el lado Oeste de la zona estudiada en donde la estructura Muelle Turístico Nuevo posiblemente sea despegada de la base que lo sostiene a tierra o anclaje en el cual quedaría libre para ser removido por cualquier condición exógena que se produzca.

Por otro lado, la lengüeta occidental continuaría erosionándose y en una proporción mayor con el tiempo hasta perderse. La zona Central se produce erosiones detrás de los espigones como es de esperar en condiciones normales de funcionamiento y su respectiva sedimentación en el lado contrario y en igual condiciones la zona Este. (Ver figura 5.17).

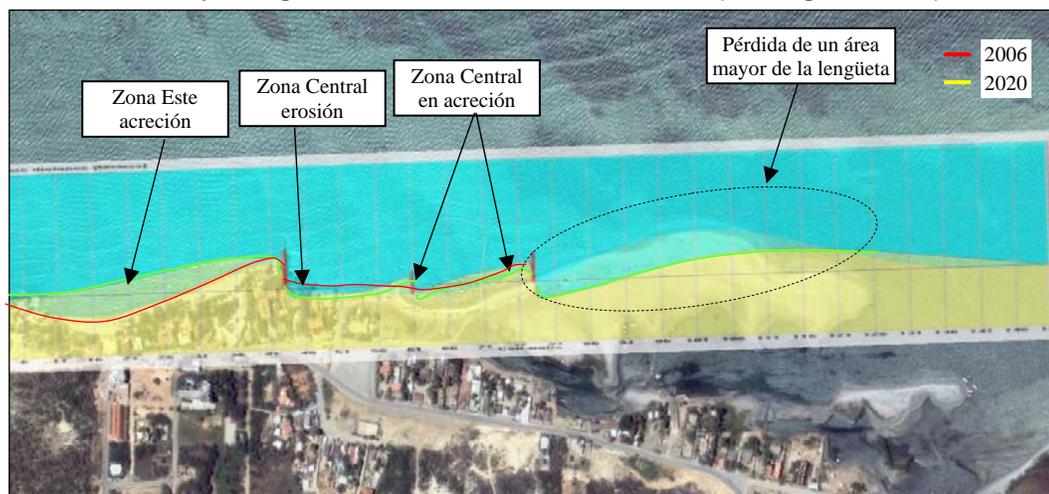


Figura 5.17. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con espigón intermedio entre las estructuras básicas.

En este caso se mejoraría la condición de la zona Central debido a la deposición importante que se producía en esa parte, sin embargo es una configuración menos económica que la anterior debida que se tendría que incrementar el número de espigones o estructuras costeras y además habría que cuidar el proceso erosivo que se presentaría para el último espigón que se refleja directamente en la depresión del área de la lengüeta occidental.

5.7.1.3.2. Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con Traslado del Muelle- Espigón a 100 m hacia el Oeste

Esta simulación comprende el traslado del Muelle-Espigón construido frente al hotel The Winds hacia el Este unos 100 m, ubicándolo en la zona que se denomina Central.

Costa Inicial: Representa la forma de la costa para el 27 de Diciembre de 2006.

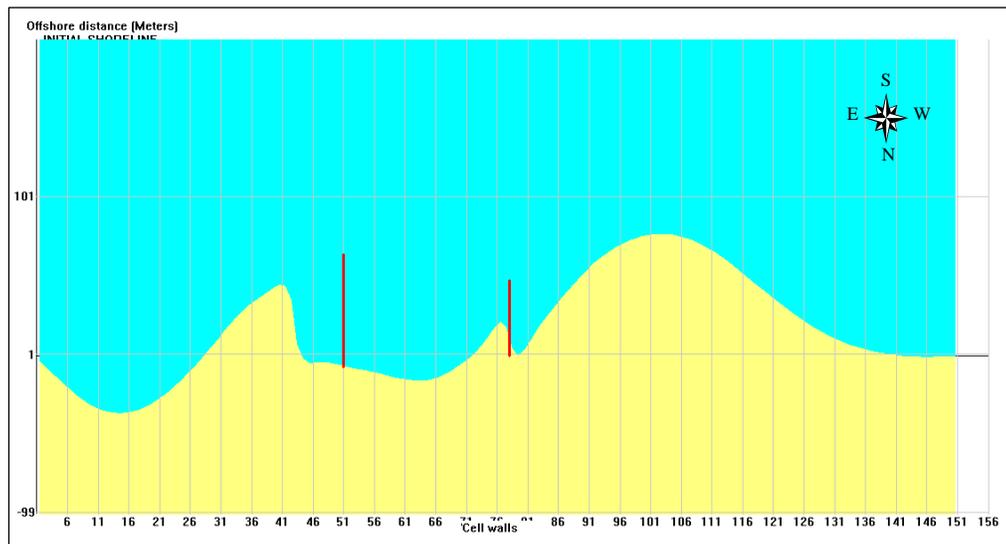


Figura 5.18. Costa inicial simulada Diciembre 2020 con Muelle-Espigón movido 100 m hacia el Oeste. Fuente: GENESIS95

Costa final simulada: Costa estimada para el 27 Diciembre del año 2020.

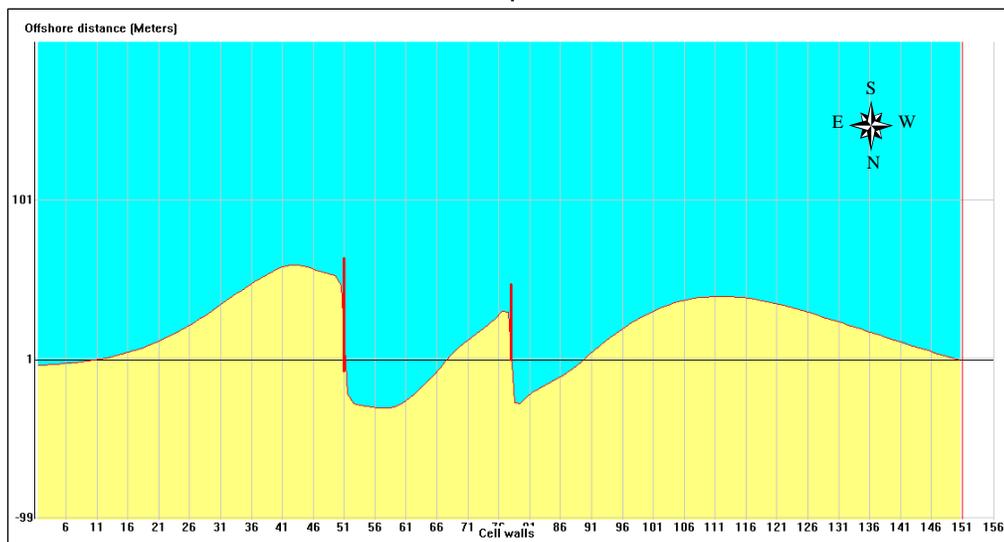


Figura 5.19. Costa final simulada Diciembre 2020 con Muelle-Espigón movido 100 m hacia el Oeste. Fuente: GENESIS95

Este caso representaría la forma de la costa producida por el cambio de la estructura colocada frente al hotel The Winds en la cual se produciría una acreción fuerte en la zona Este que se extiende hasta 510 m medidos desde el morro como punto base, al igual que la simulación anterior que representaba las estructuras sin mini espigones y con el Muelle Turístico Nuevo, se presenta una costa muy parecida en la zona Este y solo que con una leve erosión en la zona Central. Al igual, se incrementaría mayormente y de manera importante la erosión en la zona Oeste detrás del Muelle Turístico Nuevo. (Ver figura 520).

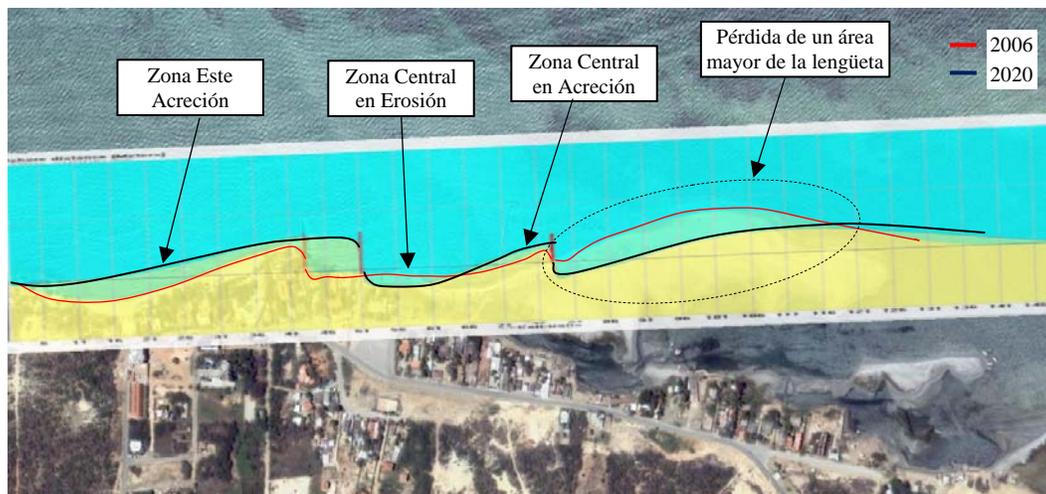


Figura 5.20. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con el traslado del Muelle-Espigón 100 m hacia la zona Este.

Hay que notar que se protege una parte de la zona Central y la erosión que produciría éste Muelle-Espigón sería en menor cuantía. Este tipo de configuración fue tratada como solución provisional dentro del Informe Técnico elaborado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica. Sin embargo, hay que cuidar el área de la lengüeta de la fuerte erosión que tendería a presentarse.

5.7.1.3.3. Simulación Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con rompeolas separado de la costa en el punto donde se encuentra la thalassia

En esta simulación se colocó una batería de rompeolas paralelos a la costa a manera de aminorar la energía que pudiera poseer el oleaje y por consiguiente su altura, la cual incide directamente en la forma de la costa.

Costa Inicial: Representa la forma de la costa para el 27 de Diciembre de 2006.

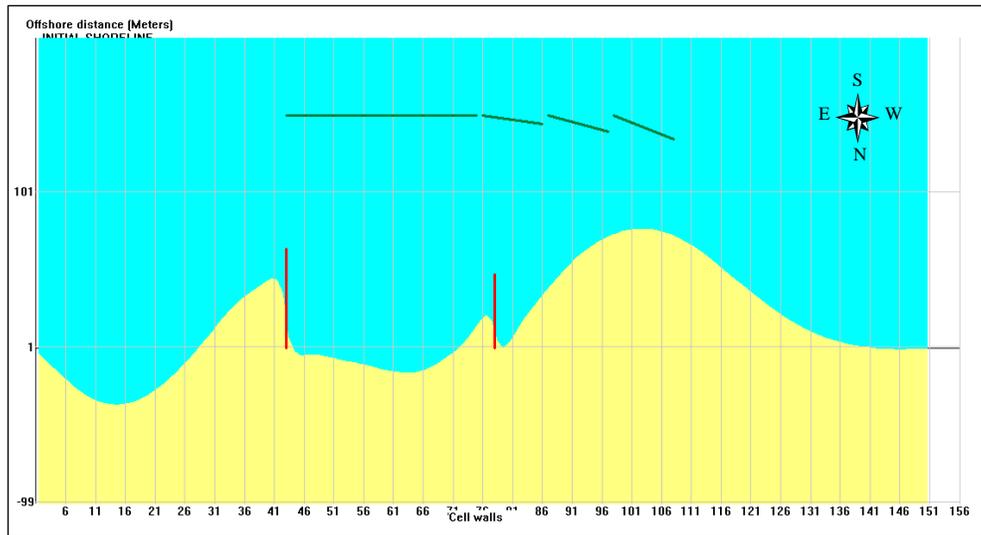


Figura 5.21. Costa inicial simulada Diciembre 2020 con rompeolas paralelo
Fuente: GENESIS95

Costa final simulada: Costa estimada para el 27 de Diciembre del año 2020.

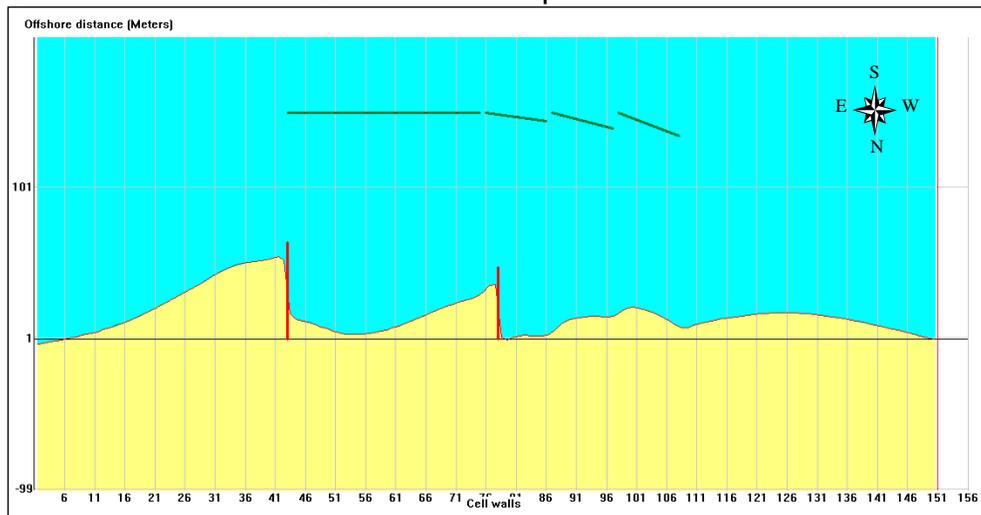


Figura 5.22. Costa final simulada Diciembre 2020 con rompeolas paralelo
Fuente: GENESIS95

En este caso la tendencia de la costa es a formar sedimentación en algunas áreas donde comúnmente se erosiona por efecto de los espigones. En la zona Este se evidencia una clara acreción que es soportada por el Muelle-Espigón al igual que en la zona central. En la zona Oeste si se reduciría la berma de la lengüeta, sería el área más afectada, debida a la poca deposición que se pudiera estar presentándose. (Ver figura 5.23).

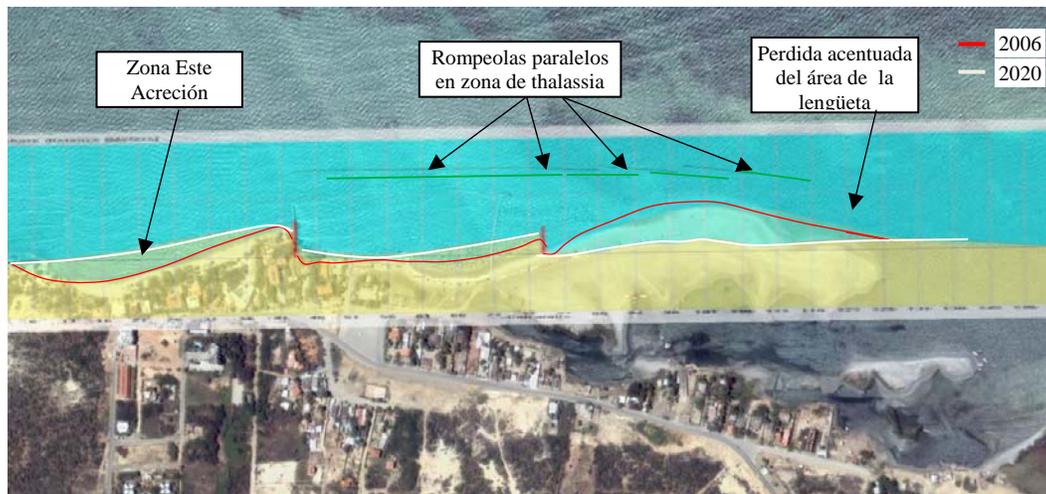


Figura 5.23. Resultado del análisis del GENESIS95 en superposición de imágenes de la costa Diciembre 2006 – Diciembre 2020 con rompeolas paralelo a la costa ubicados en zona de *Thalassia*.

Esta configuración produciría una sedimentación importante en la zona Este en donde se encuentra la mayoría de las edificaciones hoteleras, al igual en la zona central la cual no se produciría una erosión que afectaría las estructuras aledañas a la línea costera. La afectación está en la zona Oeste la cual se presentaría considerablemente en la reducción del área superficial de la lengüeta debido al reacomodo del sedimento quizás con tendencia por el mismo transporte litoral a ir en sentido Oeste lo que para poder conocer con certeza habría que ampliar el área de simulación.

5.8 CONSIDERACIONES DEL MODELO

El modelo no toma en cuenta las condiciones climatológicas que puedan afectar la forma de la línea costera, es una simple aproximación en condiciones ideales de la morfología costera donde se puedan representar la línea de costa medida, las condiciones de oleaje y la posición y tipos de estructuras.

Al igual, por ser un modelo unidimensional o de una sola línea no simulan cambios en los perfiles normales a la costa, o sea, no pueden predecir los cambios en la topografía marina.

Los efectos del transporte transversal de sedimentos por efecto de una condición atmosférica adversa, el cual produce un efecto erosivo en la zona, no puede ser representado en este modelo debido a que asume un perfil constante no varía ni temporal ni espacialmente.

Al no considerar esta característica, los fenómenos de difracción y refracción que son preponderantes en una situación de perfil variable, no puede ser aplicados.

Este también limita la simulación a la profundidad de cierre en el mar y en la costa por la elevación de la berma, esto produce que la costa en la simulación se traslade paralelamente en función de los perfiles transversales.

Adicionalmente, existe una tendencia para la simulación de largo plazo para la línea de costa.

5.9. SOLUCIONES ADICIONALES

Aunado a los escenarios evaluados existen otro tipo de soluciones que no pueden ser resueltas con el modelo empleado y las cuales pueden ser analizadas en forma teoría y práctica.

Entre las posibles soluciones, se pueden mencionar las siguientes:

- Restitución de Playa mediante relleno de material de préstamo mediante el procedimiento de Dragado
- Restitución de Playa mediante relleno de material de préstamo mediante el procedimiento de By -Pass

A continuación se procederá a analizar cada una de ellas por separado.

Es importante mencionar que para llevar a cabo estos análisis se utilizo el apoyo del personal del Instituto Nacional de Canalizaciones, ya que se requería de información sobre el proceso y su experiencia como tal sobre esta materia en la restitución de zonas costeras.

5.9.1 Restitución de Playa mediante relleno de material de Préstamo

La restitución de la costa mediante el relleno de playa entre las dos estructuras básicas adicional al relleno en el morro, está dentro de las soluciones viables para mejorar las condiciones de la zona. El uso de esta técnica combinada con otras obras adicionales ayudaría a restituir la costa en un tiempo relativamente corto, si se considera esperar que de manera natural, el sedimento sea retenido por las obras colocadas.

También se debe tomar en cuenta que el sedimento debe ser de la misma granulometría de la zona, al igual conocer el movimiento de las

corrientes de manera que se asegure la distribución adecuada en el área problema.

Una de las alternativas a evaluar, es la factibilidad de crear artificialmente una playa en el sector comprendido entre el Muelle-Espigón y el Muelle Turístico Nuevo, en la zona Central de playa El Yaque; debido a que ha sido una de las áreas más afectadas por la erosión presentada en esta costa, además de ser el sector donde se encuentran edificaciones en riesgo inminente de ser afectadas por la transgresión del mar. (Ver figura 5.24).



Figura 5.24. Vista de planta del área donde se realizaría la restitución

La restitución artificial de playa consiste en tomar sedimentos, de un lugar llamado sector de préstamo o fuente de sedimentos, y depositarlos en otro lugar que presente déficit, denominado sector de relleno o de restitución.

El aspecto más importante de un proyecto de alimentación artificial, está en localizar, el sedimento más adecuado que se pueda colocar en la playa.

Para identificar el sitio más adecuado de préstamo, se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones, como la compatibilidad del grano de sedimento de la zona de préstamo y el de la zona de restitución, para esto se

debe comparar el tamaño promedio del grano y su composición sedimentaria. El tamaño de grano promedio de préstamo ideal se debe aproximar o ser levemente más grueso que el diámetro promedio que el de la de restitución ; se consideran sedimentos favorables para el relleno aquellos que puedan contener cantidades pequeñas arcilla y un porcentaje importante de material fosilífero como conchas marinas y crustáceos; otros factores que se considerarán son el color y la durabilidad del material en préstamo para la restitución, aunque el objetivo primario es encontrar ese sedimento de similar o igual composición posible a la playa que es alimentada.

La zona de préstamo recomendada para este caso, es la boca de la laguna las Marites denominada Boca Nueva, ubicada a 3 Km al Este de playa el Yaque, debido a que el sedimento presente en esta zona posee características similares al sedimento de la zona a restituir. El D_{50} de las muestras granulométricas M52 y M53 recolectadas en la barra ubicada en la salida de Boca Nueva cercana a la población de la Isleta, fueron de 0,25 y 0,33 mm respectivamente, ligeramente superior al diámetro promedio de la zona de relleno que tiene un D_{50} de 0,21 mm. (Ver Figura 5.25).

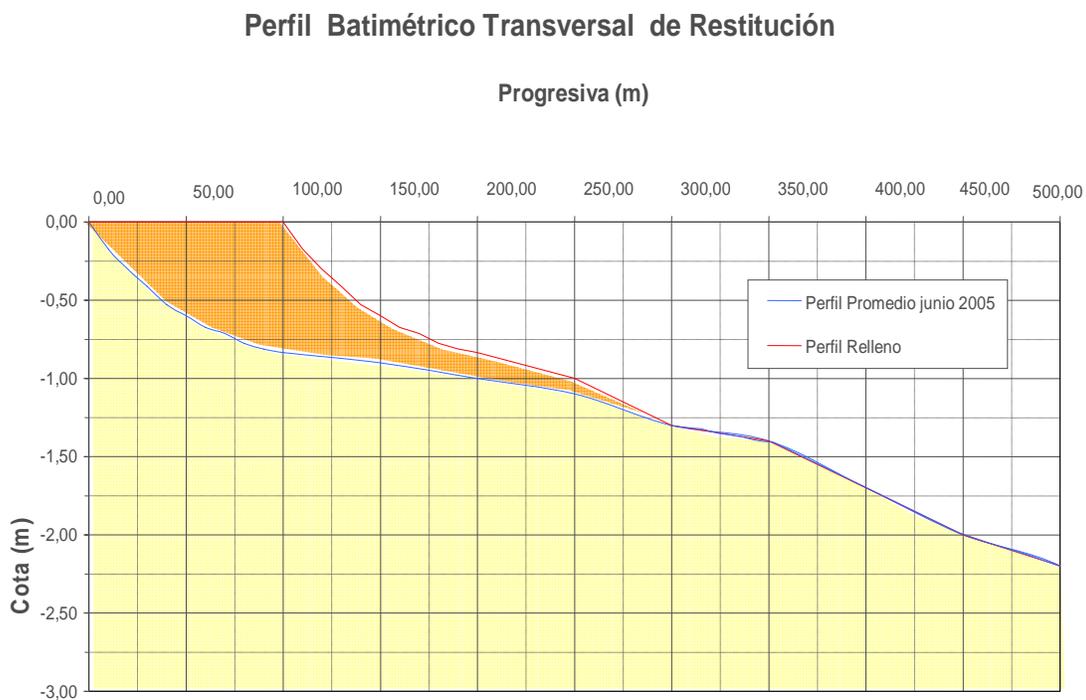


Figura 5.25. Vista de planta de las áreas donde se tomaría material de préstamo y se realizaría el relleno. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

Otra de las razones para considerar esta zona como de préstamo, es el hecho de que esta boca se encuentra obstruida por una gran cantidad de sedimentos, lo que incrementa el caudal circulante por la Boca Victoria y hace que los sedimentos en ésta sean expulsados con mayor velocidad, al momento de bajar la marea.

Al permitir nuevamente el paso libre de agua por Boca Nueva, el caudal que antes circulaba solamente por Boca Victoria, se distribuya entre las dos bocas, disminuyendo el caudal de salida producido por las mareas entrantes y salientes, esparciendo los sedimentos en las playas aledañas al morro, lo que beneficiaría el relleno artificial debido a que incorporaría nuevos sedimentos al transporte litoral.

Otra de las precauciones que se debe tomar, al implementar la restitución, es la de mantener la pendiente original del perfil batimétrico la cual para la zona de restitución es de 1: 250.



Gráfica 5.1. Perfil transversal original y de relleno del área donde se realizaría la restitución

5.9.1.1 Remoción mediante dragado del sedimento que obstruye Boca Nueva en la laguna Las Marites

Influencia de mantener abierta el mayor tiempo posible la desembocadura de la Boca Nueva en la laguna de Las Marites, puede ser una posibilidad para la continuidad del transporte y el aumento en la capacidad de sedimento de manera litoral que está presente en el área. Por evidencia histórica en años anteriores se podía observar que existía una fuerte corriente de sedimentos que se presentaba desde ésta zona hasta las costas de El Yaque, que aunada con la corriente que venía desde la parte más oriental mantenía un volumen de sedimento en toda la playa considerable. El uso de la técnica del dragado de esta área y colocación a posteriori de este material en puntos clave como el morro y entre las estructuras colocadas en la zona Central y Oeste podrían ayudar a mantener la playa en condiciones favorables para la sedimentación.

Si consideramos el caso de hacer el dragado de la Boca Nueva de la Isla la Placeta demarcada en la *Figura 5.25* como zona de préstamo y se realiza la restitución en la zona Central de la playa es posible obtener mejoras en las condiciones de toda esa zona.

El área total a ser restituida abarca una superficie de 27.000 m² y la profundidad promedio a rellenar es de 1 metro, lo que daría un volumen total aproximado de 27.000 m³ de sedimento, este material deberá ser extraído de la zona de préstamo, transportado y nuevamente depositado, por medio de una draga especializada para el caso, debido a la poca profundidad existente en la zona.

Debido a que la costa tiene una baja capacidad de aporte de sedimento probablemente la cantidad a restituir se perdería en un año, en consecuencia y por recomendación del personal experimentado en el área

del Instituto Nacional de Canalizaciones (*INC*) este tipo de restitución debería hacerse en un período de mediano plazo por ejemplo cada 5 años. Para este efecto se tomo la capacidad de transporte equivalente a 5 años que es igual a 147.116 m^3 para alimentar artificialmente la playa, de esta manera se asegura que tenga una duración estimada, considerando que no exista transporte de sedimento de manera natural que sería la condición más desfavorable. También entra dentro de las recomendaciones elabora un plan de mantenimiento período para mantener las características favorables de la playa.

Tomando en cuenta las condiciones de la zona, la draga propuesta para elaborar este trabajo es de tipo de cortador, como se observa en las siguientes fotografías con las siguientes características:

Modelo Series 670 y 1170 "DRAGON" con tubería de descarga flotante y de tierra de 14" y 16" de diámetro interior respectivamente.



Fotografía 5.1. Dragadora modelo Series 670 y 1170 "DRAGON" en diferentes ambientes. Fuente: <http://www.dredge.com>

Un equipo como estos opera las 24 horas del día debemos para conocer tomar en cuenta los valores de producción. Uno de ellos es el porcentaje de eficiencia en la ejecución del trabajo que estima alrededor de 85 % ,el cual se debe a los factores como por ejemplo las mareas, las tormentas, el funcionamiento y manejo de los equipos por parte de los operadores, etc.; el cual repercute directamente en el tiempo de ejecución que se ve disminuido en una cuarta parte.

El otro valor es que aproximadamente el 20% del total del material es sólido dentro de la mezcla (agua + sedimento) la cual es bombeada al sitio de restitución, esto hace que se tenga que bombear mas mezcla o más tiempo para cubrir el requerimiento anteriormente expuesto. Claro está, que el tiempo de ejecución depende directamente de la capacidad de bombeo que tenga los equipos.

Esta información es tomada en cuenta para el cálculo de los volúmenes de relleno en la ejecución del trabajo y fue obtenida a través a de la experiencia que posee el personal técnico del INC, el cual recomienda que para éste tipo de trabajo se deba considerar estos factores.

Debido a los costos que implica mover un equipo de esta magnitud y tomando en cuenta los factores que merman el trabajo de dragado se necesitaría de un proyecto más detallado de todo el proceso.

En la tabla siguiente se exponen las características de funcionamiento de las dos dragas para una comparación en cuanto al trabajo a ejecutar.

Tabla 5.1. Valores característicos del proceso de restitución en función de los dos modelos de dragas tipos.

Serie "Dragon" modelo 670	Serie "Dragon" modelo 1170
Distancia máxima de la draga para el transporte de sedimentos = 3,6 km	Distancia máxima de la draga para el transporte de sedimentos = 6,1 km
Volumen de sólidos a restituir: 147.116 m ³ % de Efectividad: 85 Tiempo efectivo de trabajo: 20 h/día % de sólidos en la mezcla: 25 Bombeo de máquina: 90m ³ /h.	Volumen de sólidos a restituir: 147.116 m ³ % de Efectividad: 85 Tiempo efectivo de trabajo: 20 h/día % de sólidos en la mezcla: 25 Bombeo de máquina: 250m ³ /h.
Volumen de Bombeo: 367,20 m ³ /día Mes de trabajo: 30 días hábiles Total de volumen de sólidos: 11.016 m ³ /mes	Volumen de Bombeo: 1020 m ³ /día Mes de trabajo: 30 días hábiles Total de volumen de sólidos: 30.600 m ³ /mes
Meses necesarios para completar la restitución=13,36 meses	Meses necesarios para completar la restitución=4,81 meses
Volumen Total de mezcla Bombeada: 735.868 m ³	Volumen Total de mezcla Bombeada: 735.930 m ³
Tiempo de mantenimiento para realizar de nuevo la restitución: 5 años	Tiempo de mantenimiento para realizar de nuevo la restitución: 5 años

En la tabla comparativa de valores característicos del proceso se observa que la draga modelo 670, ver **ANEXO (48)**, la cual tiene una capacidad de bombeo menor y requiere de mayor tiempo para ejecutar el trabajo (2,78 veces mayor) que el que necesitaría la modelo 1170, ver **ANEXO (49)**, sin embargo, el volumen de bombeo de la mezcla es en cantidad relativamente menor que ésta.

Aunque las dos dragas cumplen con el requerimiento de bombear a 3 km desde la zona de préstamo, (ver **ANEXOS (50);(51)** respectivamente), la de mayor capacidad de bombeo tiene la posibilidad de transportar el sedimento aproximadamente al doble de la distancia que la de menor capacidad ,esto no considerando perdidas en el movimiento del sedimento

través de las mangueras y tuberías lo que sería otra característica para las decisiones a la hora de ejecutar el trabajo.

Hay que tomar en cuenta, que la apertura de la Boca Nueva posiblemente activaría el movimiento de sedimento desde la laguna hacia la costa, el cual se incorporaría al transporte de sedimento litoral como se observa en las comparaciones fotográficas del capítulo de morfología costera. De la misma forma existe una consecuencia adicional en la cual la Boca Victoria disminuiría el caudal y por consiguiente la velocidad de las corrientes debido al flujo y reflujo que allí se producen debido al movimiento de las mareas.

Debido a que la cantidad de sedimento total para el tiempo en que se ejecuta el trabajo de restitución es considerablemente superior que el transporte requerido por la costa para mantener su equilibrio natural se debe distribuir este sedimento a lo largo de la costa en puntos que pueden considerarse claves, para que éste sea transportado de manera natural por el transporte litoral. Estos lugares pudieran ser, frente al Morro, en la zona Central entre el Muelle-Espigón y El Muelle Turístico Nuevo y detrás de éste de manera de favorecer el lado Oeste de la playa. Siempre considerando para todo estas apreciaciones el realizar un estudio más completo para conocer como sería el comportamiento de los movimientos de las corrientes y el transporte de los sedimentos en toda esa área realmente.

Adicionalmente hay que tomar en cuenta algunas características que deben tener las obras colocadas como el Muelle Turístico Nuevo, el cual se considera fue implementado como un espigón adicional a la costa, lo que trajo como consecuencia una fuerte erosión al lado Oeste, así como un socavamiento de su base, por lo que sería necesario hacerlo permeable para permitir el libre paso de los sedimentos a través de él, pudiéndose eventualmente restituir la zona erosionada de la misma forma como se

realizo para la zona Este de la playa permitiendo que los sedimentos sean depositados de forma natural por el transporte litoral.

Por ser éste un sistema artificial de relleno para la costa, es necesario un mantenimiento a lo largo el tiempo, debido a que el transporte litoral, comenzará a erosionar y sedimentar en la costa restituida, pudiendo no ser sostenible en el tiempo el trabajo realizado.

También se puede considerar la restitución a través de una única operación mediante el procedimiento del By Pass el cual ésta dentro de las soluciones viables para la corrección de problemas de falta de deposición en playas.

5.9.2. Operación de By Pass en la parte final de la barra donde se acentúa la erosión para mantener la zona Central de la playa estable.

Otra de las alternativas a estudiar para estabilizar la costa, consiste en transportar los sedimentos de forma mecánica desde un lugar de préstamo, a otra zona que carece de sedimentos, este sistema es conocido como By-Pass de sedimento.

El uso de ésta técnica de By Pass es también usual para la restitución de playas, esta consiste en hacer funcionar una bomba de manera constante enviando una mezcla de agua con arena extraída de la misma zona manteniendo la granulometría y restituyendo zonas con carencia de sedimentos, de manera que por la acción natural de las corrientes se distribuya a toda el área.

Uno de los aspecto más importante, en el desvió de arena por medio de un sistema de By-Pass, es el diseño del sistema; para lo que hace falta tener conocimiento de los datos del transporte de sedimentos y la relación de

erosión de la playa, ya que la cantidad de sedimentos que debe ser movida debe superar estas dos cantidades.

Se desea restablecer el transporte de sedimentos a partir del Muelle Turístico Nuevo hacia el Este de playa El Yaque, por medio de un sistema de bombeo que extraerá los sedimentos de la zona de la lengüeta al Oeste de la playa. Este sistema a diferencia de la restitución de playa, donde se crea una playa artificialmente, deja los sedimentos libres en un extremo de la costa, para que a través del oleaje se reactive el transporte litoral y la costa sedimente de manera natural. (Ver Figura 5.26).

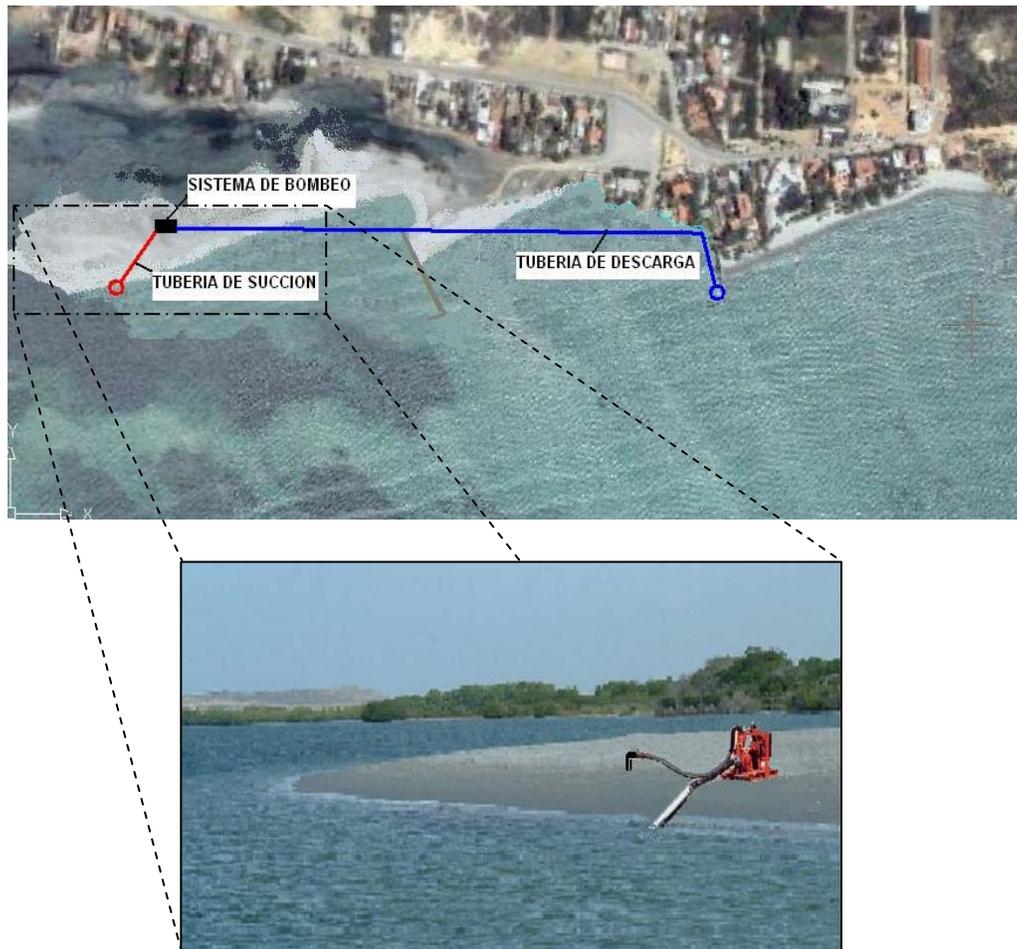


Figura 5.26. Vista de planta y lateral de las áreas donde se tomaría material de préstamo por By Pass y se realizaría el relleno. Fuente Foto: GOOGLE EARTH

El sistema consta de un cuerpo de bombeo, el cual capta a través de una tubería de succión, agua de mar mezclada con arena, esta tubería tiene una boca de toma, la cual se recomienda ubicarla en la parte oeste de la lengüeta; del cuerpo de bombas sale otra tubería para transportar el sedimento succionado hasta el sitio que se desea reactivar su transporte litoral, que para éste caso es la zona Oeste al Muelle-Espigón, por lo que se recomienda ubicar la boca de descarga de la tubería en el extremo de éste.

Para establecer un pre-dimensionamiento de la bomba de dragado se realizo una evaluación de diferentes bombas, las cuales se presentan en la *Tabla 5.1*. Los caudales de las bombas se encuentran en galones por minutos, lo cual se transforma a metros cúbicos por hora, para la concentración tenemos valores que expresan el 20% de sólidos disueltos en la mezcla, la eficiencia está en un rango de 50 a 70 % y trabajo se estima en dos épocas al año correspondientes a los meses de Abril hasta mediados de Julio y Octubre a Diciembre donde disminuye la perturbación por oleaje en la zona.

Si consideramos que el volumen de sedimentos a transportar es de 29.423,11 m³/año tomando en cuenta las perdidas en tuberías 25% y una eficiencia de operación del 50% se requería de un equipo con que pudiera manejar un caudal mínimo de 55.168,33 m³/año sedimentos en estado sólido.

Para una rata sedimentos de 151,14 m³/día de sólidos y considerando que este representa el 20% de la mezcla se requiere un caudal de bombeo de la mezcla para cubrir 755 m³/día.

Considerando que son dos épocas de 3 ½ meses (Octubre, Noviembre, 1/2 Diciembre y Enero) y 3 meses (Abril, Mayo y Junio) respectivamente, para 30 días hábiles cada mes, el tiempo del funcionamiento para bombeo de mezcla total por los dos períodos es:

Tabla 5.2. Cuadro de caudal de Bombeo y horas de trabajo para el sistema By Pass.

Modelo Bomba	Numero de Bombas	Carga m	Caudal m ³ /h	Horas de trabajo/ día (dos períodos)	Horas de trabajo total (dos períodos)	Volumen de sedimento (dos períodos)
CD80M	1	12,5	68	20,8	4.056	1.414,4 m ³ /día
CD150M	1	25	300	4,8	936	1.440 m ³ /día
DPC300	1	25	490	2,9	565,5	1.421 m ³ /día

Lo observado en los valores reflejados en la Tabla 5.2 indica que si se trabaja con la bomba de menor caudal de bombeo se tiene que poner a trabajar por 20, 8 horas en 195 días hábiles para trabajar la restitución que comprenden los dos períodos del año específicos para esto. Dentro de las dos opciones siguientes, la bomba de mayor caudal de la tabla es una bomba que a pesar que requiere mantenerse un menor tiempo de encendido diario durante los meses previstos para la restitución, es una bomba de mayor costo debido que posee para su encendido un motor Diesel, lo que la hace la opción menos económica en lo que se refiere a la adquisición.

Se considero escoger entonces, el sistema de una bomba CD150M de 300 m³/h, (Ver **ANEXO (52)**), debido a que el caudal de bombeo requerido de mezcla de sedimentos anual calculado es de 275.575 m³/año, esta bomba tiene un Volumen transportado de mezcla de 280.800 m³, lo que es una cantidad ligeramente superior a lo que requerido.

Para poder recuperar la zona Oeste de la playa es necesario remover el Muelle Turístico Nuevo o por lo menos eliminar su condición de impermeable, para procurar el proceso de sedimentación; se pudiera utilizar arena del extremo de la lengüeta y redistribuirla a lo largo de la costa erosionada.

El control y la vigilancia son importantes para el éxito a largo plazo de un sistema By-Pass, y se deben considerar siempre como parte del costo:

- Monitorear el desvío total.
- Vigilar la arena que desvía el sistema.

El propósito de vigilar la operación de desvío es determinar a qué grado se está logrando el propósito indicado y en caso contrario realizar las modificaciones pertinentes.

El sistema By-Pass es usado en varias partes del mundo dando buenos resultados, manteniendo una constante vigilancia y observación de los sedimentos que van a ser movidos ya sea para contrarrestar una erosión ó deposición.

CONCLUSIONES

La Morfología Costera de la zona

- La Costa de playa el Yaque es una zona con una dinámica costera compleja, en la cual se producen procesos erosivos y sedimentarios en constante interacción, teniendo esto efectos directo sobre la morfodinámica de la costa. Dentro *las posibles causas que producen el proceso erosivo* en playa El Yaque se consideran:
 - Baja capacidad de la costa para la sedimentación (transporte de sedimentos)
 - La modificación del régimen normal de las corrientes marinas litorales debida a la acción directa de la Boca Victoria de la Laguna de Las Marites.
 - La alta velocidad del viento presente
 - Condiciones meteorológicas naturales adversas como tormentas y mar de fondo.

- *El viento* es un factor influyente en la zona, la dirección predominante es desde el Este en la mayor parte del año con un porcentaje de ocurrencia del 51,39 % del tiempo, lo que produce que el transporte de sedimento eólico sea mayormente de ésta dirección, sin embargo, la capacidad de transporte eólico no es suficiente para alimentar la playa por sí sola.

- *El morro* es una posible fuente de alimentación eólica pero no está adecuado para ello, debido a las condiciones de alto porcentaje de cobertura vegetal en que se encuentra esta formación.

- *El origen del sedimento*, existe una relación directa del sedimento ubicado en la parte alta del morro y el ubicado en la barra de la población de la Isleta en cuanto a la semejanza en los valores obtenidos mediante

el proceso de medición del % en peso de Sílice y Calcio, esto es indicativo que el sedimento es transportado mediante el transporte litoral hasta la playa que conforma la parte de atrás del morro, para luego trasladarse a su parte alta vía eólica lo que contribuiría a su alimentación. También, el sedimento hacia la lengüeta es de origen costero mayormente dado por el movimiento de las corrientes litorales.

- Al presentarse *condiciones atmosféricas* adversas como tormentas y mar de leva o de fondo, se produce una erosión alta a lo largo de la playa, lo cual requiere para su recuperación, un período considerable de tiempo
- *El transporte Litoral* es movido de Este a Oeste bordeando la costa, desde Pta. Mosquito hasta Punta de Piedras. La cantidad transportada de sedimento no es suficiente para mantener la playa en condiciones favorables, aparentemente esta estabilidad sedimentaria cumple un proceso cíclico, el cual fue alterado en los últimos años con la inclusión de las obras hidráulicas en la costa y la intensidad y frecuencia con que se han presentado condiciones meteorológicas adversas, lo que ha producido los cambios bruscos en morfología de la zona.
- 235 días al año existe una actividad alta en el área en cuanto a la influencia del oleaje y el movimiento de sedimentos particularmente.
- El proceso erosivo acelerado no está directamente relacionado con el *desarrollo urbanístico* de la zona, debido a que mayormente éste se relaciona a la baja capacidad de transporte de sedimento de la playa.
- *Las praderas de Thalassia* que se encuentran en los alrededores de la playa, son susceptible a los cambios del fondo marino producido por la sedimentación, lo que hace que sean eliminadas en las áreas de deposición.
- *El Aporte de sedimento vía Litoral* es superior al transporte eólico en las condiciones actuales.

Influencia de la laguna Las Marites

- *El caudal efluente* en la planta de tratamiento Los Bagres ubicada en la cercanía al monumento natural Las Marites, no ejerce influencia directa sobre la morfodinámica costera.
- *Las Corrientes dentro de la laguna* no son de gran influencia por el poco caudal, sin embargo, el transporte de sedimentos litoral se está modificando debido a que la Boca Nueva está cerrada, todo el caudal está transitando por la otra boca, la cual está generando una corriente adicional que colabora que el sedimento que viaja desde el Este hacia el Oeste este siendo desviado y no logra alimentar a la parte Este de la playa El Yaque. Adicionalmente también se produce un efecto de aumento de velocidad de las corrientes en la salida de la boca activa, Boca Victoria, que posiblemente esté alterando el movimiento de los sedimento en esa zona.

La aplicación del Modelo matemático costero

- *La utilización del modelo matemático GENESIS*, permitió recrear las condiciones actuales de la costa, con un buen grado de aproximación, lo que nos permite hacer un modelaje de condiciones futuras con cierta confianza en sus resultados.
- *De mantenerse la situación actual* para el 2020 se presentaría una erosión importante en el área que comprende la zona Central, la cual impactaría directamente en la infraestructura turística.
- *Dentro de los escenarios simulados* una de las alternativas más conveniente de solución, es la elaboración de una restitución artificial de

una parte de la costa, utilizando como zona de préstamo de arena, el área de la Boca Nueva en la laguna, lo que traería como consecuencia, que se restablezca el flujo normal de sedimentos por el frente de las bocas y una mejora de la playa.

- *El caso particular de no hacer nada* a futuro trae como resultado un cambio de la morfología de la zona con su consecuente deterioro de la línea costera debido a la baja capacidad de la playa en sedimentar lo que pudiera reflejarse en erosión en algunas áreas susceptibles como la zona Central y Oeste, el cual produciría daños de la infraestructuras turísticas allí erigidas, traduciéndose en pérdidas económicas y un pobre desarrollo social.

RECOMENDACIONES

- Realizar un monitoreo continuo de la evolución de la zona costera de Playa El Yaque mediante la ejecución de perfiles batimétricos detallados, determinación de la línea costera en forma mensual y cuando ocurra alguna eventualidad atmosférica para determinar su relación con el clima de oleaje considerando las posibles obras de mejoramiento para determinar su influencia en la dinámica costera.
- Para comprender mejor la influencia de la laguna en el movimiento de sedimentos enfrente de sus bocas, se debería realizar un estudio más detallado del movimiento de las corrientes de marea en las bocas de la laguna, identificando los caudales para marea llenante y marea vaciantes, así como también realizar perfiles batimétricos longitudinales y transversales de ambas bocas de la laguna para determinar su influencia en la dinámica costera de playa El Yaque y en especial con la problemática de erosión.
- Desarrollar un estudio dirigido a determinar a ciencia cierta el origen y disposición final de sedimentos mediante la aplicación de técnicas nucleares y mediante el uso de trazadores como la fluoramina.
- Realizar un estudio sobre el desarrollo de las praderas de thalassia aplicado a la conformación y morfología de la del fondo marino, así como su influencia en los patrones sedimentarios de la zona.
- Realizar un estudio detallado de impacto ambiental para las propuestas de soluciones antes de ser implementadas para conocer cuáles serían las afectaciones en la zona.

- Considera hacer un estudio para un proyecto de dragado en el cual se conozcan la influencia que podría tener la apertura de la Boca Nueva en la laguna Las Marites, en el transporte litoral de la playa al igual que los lugares más efectivos para la colocación de estos sedimentos removidos para que al ser transportados cumplan con el objetivo de recuperar la playa.
- Comparar las acciones de dragar con la aplicación de la técnica del By Pass para la restitución de costa de manera de identificar cuál de estos procedimientos es más eficiente en relación al costo, tiempo de ejecución de la obra y beneficios obtenidos en la recuperación de la playa.
- En cuanto a las obras existentes, se recomienda no remover el Muelle-Espigón hasta que no se conozcan los alcances de un proyecto hidráulico en esa área, debido a los ya que al ser eliminada gran parte de la costa ubicada hacia la zona Este y Oeste de este espigón sufrirán considerablemente a tal punto que se podría perder algunas edificaciones cercanas a la playa.
- No se debería considerar construir ningún tipo de obras adicionales en la línea de costa como por ejemplo: Churuatas, caminerías, espigones de sacos de arena, ni de plantar nuevas palmeras en las zonas donde se está recuperando la playa.
- Para alimentación artificial de la playa, no se recomienda realizar ninguna obra de restitución artificial cuando existan condiciones adversas de viento, oleaje y erosión debido a su impacto negativo en la costa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anónimo (1997). Métodos en Oceanografía Física [Libro en línea]. Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Vigo, Disponible: <http://eddy.uvigo.es/Docencia/MOF/MOF-Tema6.pdf>. Consulta: [2006, noviembre 10].
- Anónimo(2004). El Origen de las Olas, [Revista en línea]: <http://www.laguarderia.com.ar/nota.php?nid=24> [Consulta: 2006, noviembre 15].
- Anónimo (2005). Tsunami: Consecuencia de un Planeta Geológicamente vivo [Revista en línea]: http://www.astroenlazador.com/article.php3?id_article=136[Consulta: 2006, noviembre 6].
- Bentos (2002), Clima de Oleaje en Aguas Profundas Modelos Numéricos [Publicación en línea], Disponible: <http://www.bentos.cl/archivos/climaolas.pdf>, [Consulta: 2006, julio 2].
- BMT Fluid Mechanical (2001), Global Wave Statistics Online [Publicación periódica en línea], Disponible: <http://www.globalwavestatisticsonline.com/> [Consulta: 2006, julio 15].
- Cifuentes, J. L., Torres, P. y Frías, M. (1997). El Océano y sus Recursos [Libro en línea]. Fondo de Cultura Económica. Disponible: <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/02/html/oceano1.html> Consulta: [2006, noviembre 10].
- Dalrymple, Robert A., Depth of Closure. [Publicación en línea]. Disponible: <http://www.coastal.udel.edu/faculty/rad/depth.html>, [Consulta: 2007, enero 21].
- Department of The Army U.S. Army Corps of Engineers. (2001), Coastal Engineering Manual, Washington D.C.
- ETSECCPB, Interacción Olas-Estructuras. [Publicación en línea], Disponible: <http://assig-camins.upc.es/op/omc/Olas%20-%20Estructuras.pdf>, [Consulta: 2006, julio 15].
- ETSECCPB, Caracterización del Oleaje. [Publicación en línea], Disponible: <http://assigcamins.upc.es/op/omc/Clima%20de%20Oleaje.pdf>, [Consulta: 2006, julio 15].

- Fernández D., Pedro, [2000]. La Energía de las Olas; Departamento de Ingeniería, Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. [Folleto en línea]. Disponible: http://www.gea.usm.cl/archivos/energia_pfd_energia_ol as.pdf, Consulta: [2006, noviembre 10].
- HIDROMET, (sin fecha) Estimaciones del Régimen del Oleaje en las Costas Venezolanas, 53-66 p
- Massie, W.W., (1982) Coastal Engineering, Volume I. Holland, TU Delft .24-50 p.
- Montalo L., Yovany (1984), Aplicación de un Modelo de Tipo Predictivo para Cuantificar El Transporte Litoral de Arenas en dos playas de la Costa Sur de Sinaloa [Nota científica en línea], publicado por Universidad Autónoma de Sinaloa, Escuela de Ciencias del Mar, Mazatlán, Sinaloa Disponible: <http://biblioweb.dgsca.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-1/articulo206.html> [Consulta: 2007, enero 25].
- Mosso Aranda, Octavio Cesar (2004), Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa [Tesis en línea]. Trabajo Doctoral publicada, Universidad Politécnica de Cataluña, Disponible: http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1213104-134941, [Consulta: 2006, diciembre 19]
- Nugent, Richards (1977), Investigaciones Preliminares de la Biomasa de Thalassia Testudinum König, en la Costa del Caribe Mexicano, [Nota científica en línea], Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias del Mar y Limnología. Contribución 79 del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM . Disponible: [http://biblioweb.dgsca.unam.mx/ciencias del mar/centro/19781/articulo47html](http://biblioweb.dgsca.unam.mx/ciencias%20del%20mar/centro/19781/articulo47html) [Consulta: 2007, enero 21].
- NOAA (2004), National Weather Service Observing Handbook [Libro en línea]. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible: http://www.vos.noaa.gov/ObsHB508/ObservingHandbook1_2004_508_compliant.pdf [Consulta: 2006, julio 15].
- Olivia y Marinkovic. (1997). Ecología Marina II [Libro en línea]. Universidad Arturo Prat Dpto. Ciencias del Mar Disponible: <http://www.unap.cl/csmar/EcoMarII/GuiaPlayaArena.pdf>, Consulta: [2006, noviembre 10].

- Organización Hidrográfica Internacional (2006), Manual de Hidrografía, Publicado por el Burea Hidrográfico Internacional, [Libro en línea]. Disponible:http://www.iho.shom.fr/publicat/free/files/M-13_Capitulo_5_.pdf, [Consulta: 2006, julio 15].
- SHOA (2005), Instrucciones Oceanográficas No. 1, [Libro en línea]. Publicado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 3ra edición. Disponible: <http://www.shoa.cl/servicios/descargas/pdf/pub3201.pdf> [Consulta: 2006, julio 20].
- SECICO (1999), Curso Geografía del Mar, [Libro en línea]. Publicado por Pontificia Universidad Católica de Chile, Disponible: http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar, [Consulta: 2006, julio 15].
- UNED, Método de Estudio de los Minerales. [Libro en línea]. Publicado por la Universidad Nacional de Educación a Distancia. Disponible: <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>, [Consulta: 2007, enero 21]. .