

Ministerio de
Medio Ambiente
y Recursos Naturales



ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN PLAYA EL ESPINO REPUBLICA DE EL SALVADOR



San Salvador
Mayo de 2012

ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN–SEDIMENTACIÓN PLAYA EL ESPINO, REPUBLICA DE EL SALVADOR

Autores:

Ridel Rodríguez Paneque
Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales y Tecnológicos
de Holguín
Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente
Cuba

Haydee Beltrán Mayorga
Dirección General del Observatorio Ambiental
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
El Salvador

San Salvador
Mayo de 2012

INDICE

1	INTRODUCCION	3
2	ANTECEDENTES	5
3	CARACTERIZACION GENERAL DE PLAYA EL ESPINO	7
3.1	Ubicación geográfica	7
3.2	Características de la playa	7
3.3	Geología	9
3.3.1	Pendiente del perfil de playa	9
3.3.2	Tectónica	10
3.4	Características oceanográficas	11
3.4.1	Clima	11
3.4.2	Vientos	12
3.4.3	Oleaje habitual	12
3.4.4	Mareas	13
3.4.5	Corrientes Litorales	13
3.5	Morfodinámica	15
3.5.1	Análisis Multitemporal e imágenes aéreas y satelitales	15
3.5.1.1	Evolución de la Isla barra donde se localiza la playa	16
3.5.1.2	Evolución de los canales y esteros posteriores a la isla barra	20
3.5.1.3	Magnitud de los procesos de erosión-sedimentación	22
3.5.2	Indicadores geomorfológicos y sedimentológicos para la determinación del transporte de sedimentos	23
3.5.3	Análisis de los perfiles de playa	27
3.5.4	Estado modal de playa El Espino	30
3.6	Causas de los procesos de erosión - sedimentación	31
3.7	Pronostico de los cambios esperados	36
4	SOLUCIONES PARA EL MANEJO DE LA EROSION EN PLAYA EL ESPINO	39
4.1	Posibles soluciones técnicas y modelos numéricos predictivos	41
4.1.1	Espigones	43
4.1.2	Diques rompeolas	46
4.1.3	Obras de protección del borde litoral	48
4.1.4	Relocalización de instalaciones y reordenación litoral	52
4.1.5	Reforestación o revegetación	53
4.2	Actuaciones a llevar a cabo	54
4.2.1	Reforestación o revegetación	55
4.2.2	Relocalización de instalaciones y reordenamiento litoral	55
4.2.3	Colocación de diques rompeolas	56
4.3	Creación y aplicación del marco legal e institucional	56
5	CONCLUSIONES	59
6	RECOMENDACIONES	60
7	BIBLIOGRAFIA	61
8	ANEXOS	63

ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN–SEDIMENTACIÓN EN PLAYA EL ESPINO, EL SALVADOR

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales más acuciantes identificados por la comunidad científica internacional está relacionado con la erosión de las costas y la invasión del mar de los territorios interiores ocupados actualmente por ciudades, industrias, instalaciones turísticas, plantaciones, etc.

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el calentamiento de la atmósfera terrestre, podría tener efectos dramáticos en las zonas costeras y marinas del mundo durante el siglo XXI. El IPCC considera para Centroamérica y el Caribe, *“altamente probable”* el aumento de la erosión con pérdidas de bienes raíces y el desplazamiento de poblaciones.

Por su parte, el informe GEO3 (Global Environment Outlook 3), sobre la situación del medio ambiente global, elaborado por las Naciones Unidas, alerta sobre la pérdida de millones de hectáreas de superficie en los estados ribereños del mundo, a consecuencia de la erosión, lo que impone dedicar cuantiosos recursos en la protección y mitigación de los daños provocados.

Los estudios llevados a cabo en el mundo evidencian que son muy variadas las causas que generan o intensifican los procesos de erosión en las zonas costeras. Entre las principales causas se señala la construcción de presas en ríos, lo que puede reducir drásticamente la cantidad de sedimentos que llegan a la costa, produciendo una severa erosión en las zonas de playas.

En contraste, la deforestación y actividades agrícolas y de minería a cielo abierto, que ocurren en las zonas interiores de los territorios pueden incrementar la cantidad de sedimentos que llegan a la costa.

Los patrones de transporte y las tasas de suministro de arena y sedimentos a la costa pueden ser alterados también, por la construcción de diques y espigones, generando modificaciones en la línea costera, hasta alcanzar esta nuevamente una configuración de equilibrio.

Otra importante causa es el crecimiento de la población y el desarrollo del turismo en las zonas costeras en una franja cada vez más estrecha; con la ocupación y destrucción de dunas, la vegetación costera, la sustitución por especies exóticas y de cultivos propios de la zona.

La extracción de arena en las dunas y berma de la playa con fines constructivos, así como el dragado en la plataforma para la obtención de arenas, han sido prácticas frecuentes en la mayoría de los estados ribereños del mundo y que aún subsisten. El desbalance creado por esta acción, en la mayoría de los casos, no puede ser corregido debido a la escasez de material de aporte por parte de las cuencas productoras.

Pero los problemas de erosión que sufren las playas y costas del mundo, no son resultado únicamente de la interferencia que crea el hombre en el funcionamiento de los ecosistemas costeros, sino también como consecuencia de factores naturales.

Entre los factores de origen natural destaca los oleajes de alta energía asociados al paso de eventos hidrometeorológicos extremos, muy particularmente las tormentas tropicales y huracanes, que según diversos estudios, muestran cada vez más una mayor intensidad, extensión territorial y frecuencia.

En otros casos están relacionados con cambios en el transporte sedimentario debido a cambios en los patrones generales de circulación de las aguas oceánicas por diferentes causas.

La elevación del nivel del mar, asociado a los cambios climáticos globales, es otro factor natural que incide en la intensificación de la erosión. Brunn (1988), demuestra que con los cambios en el nivel del mar, el perfil de la playa trata de adaptarse paulatinamente a las nuevas condiciones buscando una configuración de equilibrio. Estos cambios en la morfología del perfil requieren una cantidad extra de sedimentos, que de no obtenerlos por un ingreso neto de arena al perfil, entonces los extrae erosionando la playa.

Los procesos tectónicos es otro factor de importancia. Con los cambios del nivel del mar generado por la actividad tectónica, la playa trata de adaptarse paulatinamente a las nuevas condiciones, buscando una configuración de equilibrio, que al igual que ocurre con la elevación del nivel del mar en el caso de los procesos de ascenso, se requiere una cantidad extra de sedimentos, que de no obtenerlos por un ingreso neto de arena al perfil, entonces los extrae erosionando la playa.

En el caso de las costas salvadoreñas no hay estudios específicos sobre los procesos de erosión en sus playas y costas en general, aunque según observaciones realizadas parece ser un fenómeno generalizado en las costas de playa, muy relacionado con la ocupación de la zona costeras y el desarrollo de infraestructuras sin tener en cuenta las particularidades dinámicas de estos ecosistemas.

Por esta razón, el objetivo fundamental de esta investigación es determinar la magnitud de los procesos de erosión en playa El Espino, las posibles causas y las zonas que presentan mayor amenaza, así como las posibles soluciones para enfrentar estos problemas, cuestiones que constituyen elementos fundamentales a considerar en el ordenamiento del territorio.

Los resultados que se obtengan deben constituir un punto de inicio para el desarrollo de nuevos trabajos en el resto de las costas salvadoreñas, en aras de crear las bases científicas para afrontar el desarrollo económico en un mundo cada vez más interconectado y con mercados cada vez más competitivos y mejor posicionados.

2. ANTECEDENTES

El Espino es una playa constituida por sedimentos terrígenos, no consolidados, donde tienen lugar rápidos cambios. Esta singularidad es conocida por los pobladores de la playa quienes recuerdan “*que siempre ha sido así*” y no faltan las historias que comentan que la línea de viviendas e instalaciones, a mediados del siglo XX, estaba donde ahora se encuentra la zona de rompiente del mar.

El efecto de la destrucción generada por el mar, puede constatarse actualmente, pues muchas de las construcciones, permanentes o provisionales, que se encuentran en la costa se encuentran dañadas, o puede observarse lo restos de ellas, como soleras de fundación, restos de muros, pozos, etc. (figura 1).



Figura 1. Restos de casas e instalaciones construidas en la antigua primera línea de costa

Las primeras intervenciones, que se recuerden fueron desarrolladas a principios del siglo XX, con el establecimiento de la hacienda La Chepona y posteriormente la hacienda San Luis. En ese entonces playa El Espino y las áreas aledañas estaba cubierto por espesos bosques que fueron desapareciendo para dar paso a plantaciones de cocoteros y otros cultivos.

A la par con el desarrollo de las plantaciones allí, se fueron asentando los primeros pobladores atraídos por la necesidad de mano de obra que requería la hacienda y otros por las bondades del mar para el desarrollo de la actividad pesquera y el comercio con áreas vecinas.

No es hasta finales del siglo XX e inicios del XXI cuando ocurren las mayores transformaciones ambientales en todo el sector costero de playa El Espino, muy aparejado al mejoramiento de las vías de acceso.

Con ello apareció un creciente interés por la actividad turística. El suave oleaje y la existencia de una plataforma de poca pendiente hacen de la playa, un lugar ideal para la construcción de hoteles y restaurantes.

Estas inversiones fueron realizadas desde la perspectiva de los desarrollo en las áreas interiores y no tomaron en cuenta las particularidades dinámica de la playa y los ecosistemas costeros en

general, por lo que ahora sufren constantes daños y se enfrentan a pérdidas de sus propiedades o la ejecución de costosos trabajos de mantenimiento, debido a la rápida destrucción que el mar está ejerciendo sobre las construcciones.

Cuando tienen lugar mareas vivas¹, de mayor amplitud que el promedio (figura 2), combinado con oleaje de fondo provenientes del sur, o cuando eventos meteorológicos como depresiones o tormentas tropicales afectan la zona oriental del territorio, se producen inundaciones que generan procesos erosivos de importancia, que se ven reflejados en la pérdida de viviendas, vías de acceso y otras instalaciones, en periodos muy cortos de días o semanas.



Figura 2. Zona hasta donde penetra la marea viva, puede observarse la yerba de color amarillo y la marca dejada por la ola al ingresar.

La ubicación de viviendas e instalaciones sobre la playa, en una costa cuya amplitud de marea supera los 3 m, determina que las poblaciones asentadas allí, resulten más vulnerables y requerirá necesariamente de la ejecución de intervenciones, que podrán incluir la relocalización de las instalaciones existentes.

¹ Mayor altura de marea en un mes lunar

3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE PLAYA EL ESPINO

3.1. Ubicación geográfica

La playa El Espino se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas 13°10'41.75"N, 88°21'10.11"W en bocana La Chepona y 13°10'1.01"N, 88°15'3.47"W en punta La Arenera; en el cantón El Espino, municipio de Jucuarán, departamento de Usulután. Limita al norte y al este con la sierra de Jucuarán, al oeste con el estero de La Chepona y la isla San Sebastián, y al sur con el Océano Pacífico. (Figura 3).

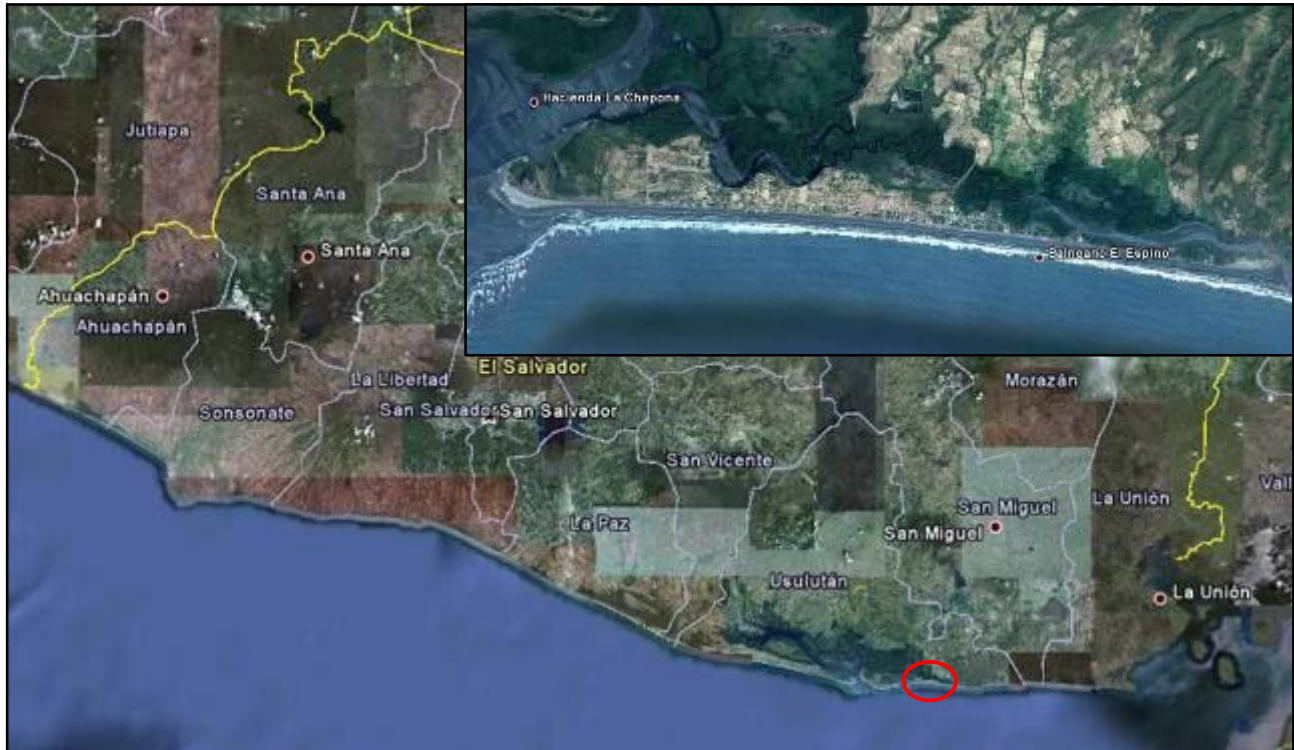


Figura 3. Ubicación geográfica de playa El Espino

Fuente: Google Earth

3.2. Características de la playa

Playa El Espino es una isla barra, separada de tierra firme por el estero El Espino y el canal El Arco. Por el extremo oeste lo separa la bocana La Chepona y desembocadura del Río Grande de San Miguel y por el este la bocana de La Arenera. Tiene una extensión de 11.7 km y un ancho variable. Su extremo oeste tiene forma redondeada, ensanchándose frente al canal El Arco, donde alcanza un ancho entre 600 y 1500 m en la zona central frente a las salinas Don Nacho, desde aquí se estrecha tanto en dirección este como oeste, llegando a alcanzar entre 200 y 300 m en su extremo este, donde la barra termina en forma de gancho.

Se caracteriza por tener una berma de 30 m, aunque ausente en su mayor parte por su ocupación con viviendas y rancherías. Hacia la zona central de la playa aparecen escarpes que llegan a

alcanzar entre 0.40 y 0.60 m de alto (Figura 4), muy relacionado con la ocupación de la berma y parte de la cara, lo que ha favorecido la intensificación de los procesos de erosión costera.

La cara de playa resulta muy plana y suele alcanzar entre 40 y 50 m de ancho, durante la bajamar.

Hacia el noroeste, en dirección a La Chepona, en aislados sitios, existen pequeñas dunas en proceso de formación (Figura 5), estabilizadas por el bejuco de playa (*Ipomea pes caprae*).



Figura 4. Escarpes erosivos en la parte alta de la cara de la playa



En la zona de baño las profundidades son muy bajas, hasta la zona de rompiente y luego se incrementan paulatinamente, llegando a alcanzar los 20 m, a media milla náutica de la costa. La vegetación está dominada por cocoteros, entre los que crecen algunos arbustos e hierbas. En la zona propiamente de playa está prácticamente ausente (Figura 6).

Figura 5. Dunas en proceso de formación



Figura 6. Zona intermareal de playa El Espino

3.3. Geología

La geología del litoral de El Espino está representada una isla barra formada por material arenoso de granulometría fina, de origen terrígeno aluvial, aportado por los ríos Grande de San Miguel y Lempa, además de otras corrientes de agua de menor importancia.

Los resultados que se abordan en este estudio están referidos únicamente a dos líneas de muestreos. La primer muestra (M1), representa la parte posterior de la berma de la playa, una segunda (M2), en la parte central de la berma de la playa y la tercera (M3), en la cara de la playa, próxima al surco pre-litoral.

Ellos muestran que los diámetros medios tienden a mantener uniformidad a lo largo de la línea de costa, en dependencia de la zona de la playa de que se trate. En dirección perpendicular a la costa el diámetro medio decrecen desde tierra al mar. La tabla 1 muestra los valores para cada una de las dos líneas de control granulométrico.

Identificación muestra		D ₅₀ (mm)	Clasificación	So
Línea 1	m1	0.46	Arena media	0.73
	m2	0.18	Arena fina	0.69
	m3	0.16	Arena fina	0.72
Línea 2	m1	0.34	Arena fina	0.69
	m2	0.17	Arena fina	0.71
	m3	0.20	Arena fina	0.71

Tabla 1: Características de los sedimentos según normas ASTM

Fuente: Propia

3.3.1. Pendiente del perfil de playa

La pendiente de la plataforma de la playa es muy baja, lo que se refleja en la composición de arena fina. La pendiente varía de un 3% en las zonas con mayor inclinación al 2.5% en las de menor inclinación. Para determinar la pendiente de playa se realizaron cuatro perfiles topográficos (figura 4), los que generaron las ecuaciones de tendencia que se muestran en la tabla 2.

Lugar	Ecuación de línea de tendencia	Pendiente
Isla del arco	$0.0265x+2.0589$	2.65%
Espino 2	$0.0391x+1.4473$	3.91%
Espino1	$0.0293x-0.0513$	2.93%
Espino	$0.0246x+1.1718$	2.46%

Tabla 2. Valores de pendiente de perfiles de playa

Fuente: Propia

Los perfiles señalados también son puntos iniciales de monitoreo de las variaciones morfológicas del perfil que se repetirán trimestralmente para determinar los cambios volumétricos en la playa.

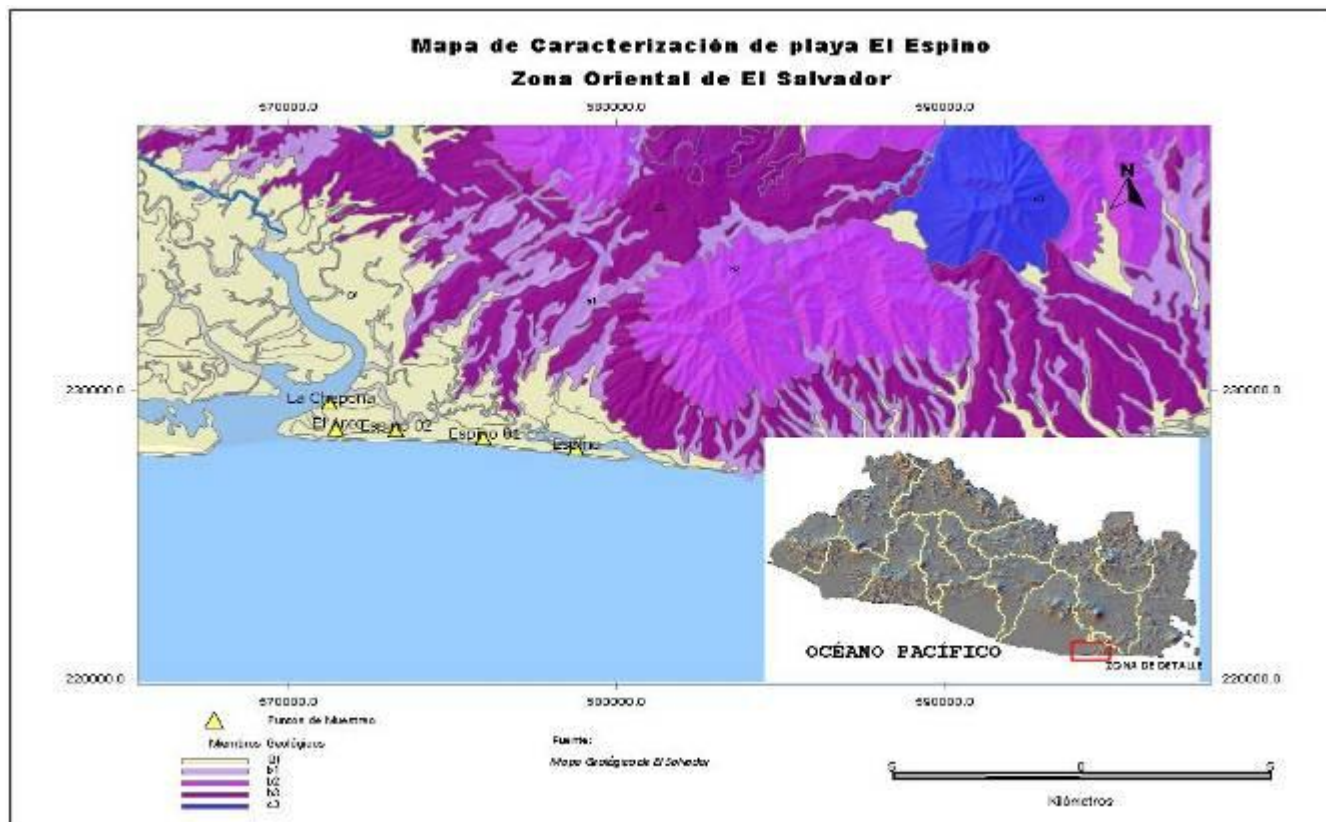


Figura 4. Ubicación de lugares de levantamiento de perfiles de playa El Espino

Fuente: Propia

3.3.2. Tectónica

En la costa Pacífica de El Salvador está ocurriendo la subducción de la placa Cocos respecto a la placa Caribe (Figuras 5 y 6), que da lugar a la formación de una cadena volcánica en el margen continental y la ocurrencia de un proceso de deformaciones intensas causadas por la compresión relacionada con la convergencia que se encuentra activa hasta el presente y condiciona el estilo tectónico e influye sobre el estado tensional.

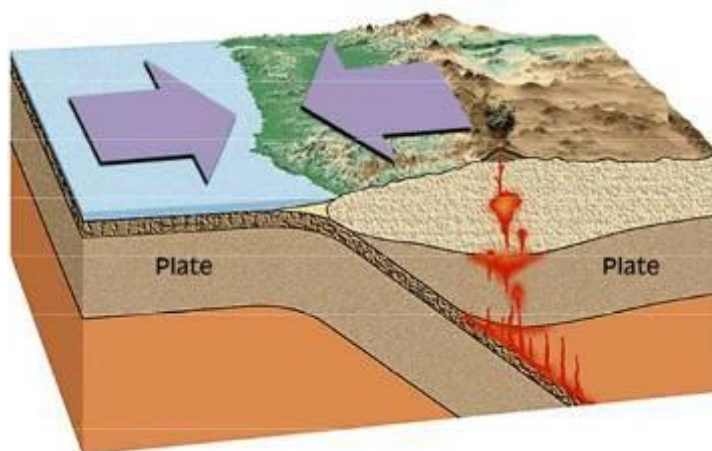


Figura 5. Esquema del proceso de subducción de la placa Cocos respecto a la placa Caribe

Fuente: Wikipedia

El movimiento de bloques tectónicos está condicionado por los procesos de deformación producidos fundamentalmente por las fuerzas de compresión que actúan desde la zona de subducción y en menor medida por movimientos verticales.

Aunque no se disponen de estudios específicos para la zona costera, el proceso de subducción de la placa Cocos respecto a la placa Caribe podría generar también, aunque en un menor grado, el levantamiento de la costa y ser responsable del empuje hacia tierra firme de las islas barras formadas en un ambiente progradante.

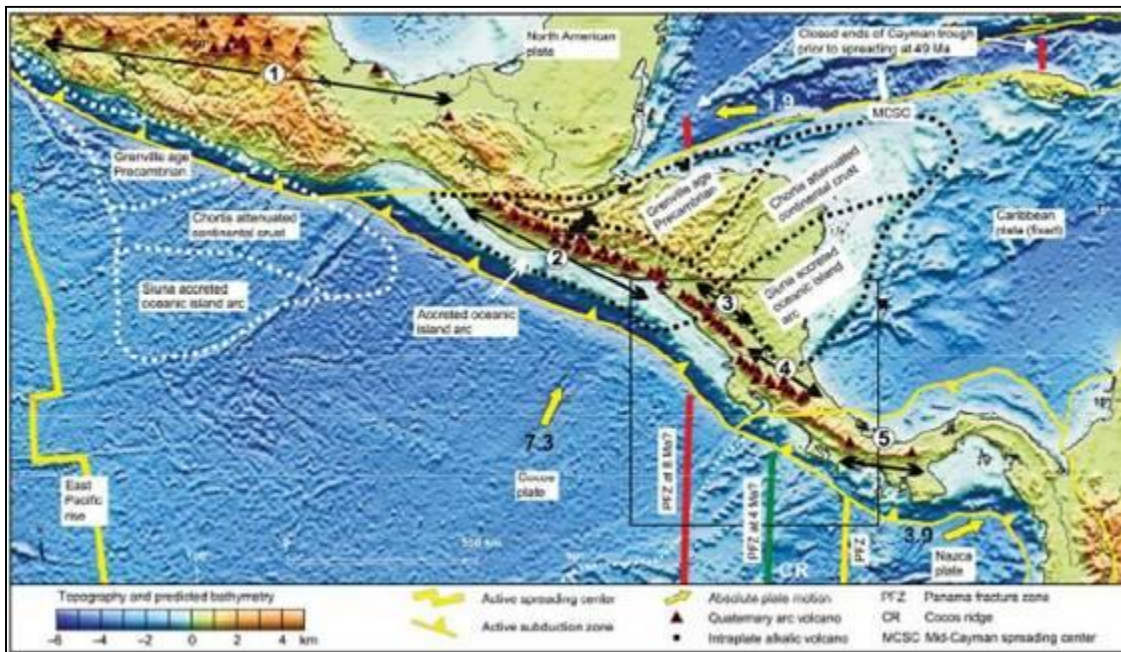


Figura 6. Mapa de estructuras falladas en Centroamérica y el Caribe occidental Fuente: USGS

3.4. Características oceanográficas

La caracterización oceanográfica de playa El Espino está referida básicamente al régimen hidrodinámico, básicamente la dirección y sentido del oleaje y las corrientes. El análisis permite definir las particularidades del funcionamiento del sistema costero, por contener los factores energéticos encargados de provocar el transporte de sedimentos, desde las zonas de producción hasta las zonas de playa y desde estas, hasta las profundidades donde la arena no puede retornar de manera natural a la costa.

3.4.1. Clima

El Salvador tiene un clima cálido todo el año. Al estar situado en el hemisferio Norte, en los meses de noviembre a octubre se ve influenciado principalmente por vientos del noreste y ocasionalmente, por nortes que traen aire fresco originado en regiones polares de Norteamérica, pero calentado en gran medida al atravesar el Golfo de México en su camino a Centroamérica.

Se identifican bien dos estaciones, una seca de noviembre a abril y una lluviosa de mayo a octubre, donde usualmente se producen inundaciones por desbordamiento de los ríos. En general, las temperaturas se mantienen entre los 18 y 35 grados centígrados. Los meses más calurosos son de marzo a mayo.

3.4.2. Vientos

El viento frente a las costas de El Espino es muy variable, condicionado por factores locales muy relacionados con la orografía. La dirección predominate es $138^{\circ} \pm 107^{\circ}$ y su velocidad es de 3.9 ± 2.0 m/s, por lo que clasifica como brisa suave a moderada proveniente de los cuadrantes suroeste – sureste y sureste – noreste, más frecuente del noreste.

El viento en el mar tiene velocidades entre 1.9 y 5.9 m/s, por lo que es capaz de generar oleaje de altura entre 0.1 y 1.3 m.

En dependencia de la estación del año (seca o lluviosa), se producen variaciones significativas. Para el caso de la estación lluviosa la velocidad del viento es 3.5 ± 1.7 m/s, y la dirección más frecuente es de 90° , es decir del Este. Para el caso de estación seca la velocidad del viento es 4.3 ± 2.1 m/s, y la dirección del viento más frecuente es de 45° , es decir del Noreste.

3.4.3. Oleaje habitual

Las características del oleaje habitual están referidos al Nodo 13° N – 88.75° W que representa condiciones en aguas poco profundas según el estudio oceanográfico de las costas de El Salvador².

De acuerdo es este estudio, el oleaje incidente en el sector de costa donde se localiza la playa El Espino tiene una altura media de la ola significativa (H_s)³ de 1.2 ± 0.4 metros, un periodo (T) de 12.5 ± 2.9 segundos de dirección, $197^{\circ} \pm 44^{\circ}$, por lo que se clasifica como de pequeña altura generado por tormentas lejanas localizadas al Sur-suroeste en el océano pacífico.

Predomina el oleaje de mar de leva con periodos entre 9.6 y 15.4 segundos y direcciones entre 153° y 241° es decir en su mayoría proviene del cuadrante suroeste - sureste.

Dependiendo de la estación del año (seca o lluviosa). Para el caso de la estación lluviosa (de mayo a octubre), la altura significativa del oleaje es 1.4 ± 0.3 m, un período promedio de 13 ± 2 segundos y una dirección de $206 \pm 13^{\circ}$, proveniente del Sur-Suroeste, coincidiendo con las características generales del oleaje para las costas de El Salvador.

En la estación seca (de noviembre a abril), la altura significativa del oleaje es 1.1 ± 0.3 m, un período promedio de 11.6 ± 3.8 segundos, y una dirección de $188 \pm 60^{\circ}$ proveniente del Sur. El comportamiento mensual del oleaje que afecta las costas de El Salvador, puede apreciarse en la tabla 3.

² Tesis “Estudio del Oleaje en El Salvador”

³ El promedio de la tercera o décima parte de las ondas más altas en el período de observación.

Mes	Dirección	Rumbo
Enero	165	SSE
Febrero	186	S
Marzo	198	S
Abril	204	SSW
Mayo	206	SSW
Junio	206	SSW
Julio	205	SSW
Agosto	204	SSW
Septiembre	210	SSW
Octubre	208	SSW
Noviembre	192	S
Diciembre	176	S

Tabla 3. Dirección predominante del oleaje habitual significativo

Fuente: Propia

Estas características del oleaje, sugieren un patrón de circulación de las aguas costeras en dirección este, aunque en determinadas circunstancias, durante la estación seca, puede generarse un corriente en sentido inverso, es decir hacia el oeste.

3.4.4. Mareas

Las mareas en las costas de El Salvador son de tipo semidiurno, es decir, ocurren en 24 horas dos mareas bajas y dos mareas altas, que se alternan con periodos de 6 horas aproximadamente. Como se aprecia en la tabla 4, el nivel máximo absoluto de la marea es de 3.50 m, coincidiendo con las mareas vivas equinocciales⁴. Bajo esta condición se produce un aumento significativo del nivel del mar, lo cual unido a fuertes oleajes pueden producir gran destrucción en la costa. Así mismo, pueden generar corrientes fuertes a la entrada de bahías, esteros y puertos.

Parámetro	La unión	La libertad	Acajutla	Puerto El Triunfo
Media de pleamar máxima (metros)	2.86	1.92	1.83	2.43
Media de bajamar mínima (metros)	0.20	0.13	0.13	0.17
Media de pleamar	2.76	1.85	1.77	2.35
Media de bajamar	0.26	0.17	0.17	0.22
Nivel medio del mar	1.51	1.01	0.97	1.29
Percentil 99	3.40	2.278	2.176	2.89
Percentil 01	-0.40	-0.268	-0.256	-0.34
Nivel máximo absoluto (metros)	3.50	2.35	2.24	2.98
Nivel mínimo absoluto (metros)	-0.50	-0.34	-0.32	-0.43

Tabla 4. Características de las mareas en la costa salvadoreña

Fuente: Propia

3.4.5. Corrientes litorales

La corriente de deriva litoral, es una corriente que se mueve paralelo a la línea de costa, debido a que la ola rompe con un ángulo oblicuo respecto a la orilla. También está condicionada a la

⁴ Marea viva equinoccial es la marea más alta que ocurre en el equinoccio de primavera o el de otoño

dirección predominante del viento y el flujo y reflujo de la marea. Se diferencian de las corrientes marinas, por ser de menor extensión y estar determinadas por condiciones específicas del relieve y el clima donde se desarrollan, por esta razón pueden ser muy variables.

Se explican porque las olas, a medida que se acercan a la orilla, sufren el efecto de la refracción del fondo y las crestas tienden a ser paralelas a la playa. Si la refracción no es completa, la ola se aproxima hacia la costa formando un ángulo y se produce una corriente de arrastre, en la dirección de incidencia del oleaje predominante. Por otro lado, el ascenso y descenso regular de la marea provoca movimientos de agua horizontales conocidos como corrientes de marea, que pueden reforzar o invertir en algún momento, la dirección de la corriente de deriva litoral.

Aunque no se tiene un estudio específico de las corrientes litorales en la costa salvadoreña, se asume que estas discurren paralela a la línea de costa, en un ángulo aproximado de 160° , en sentido que va del noroeste al sureste, considerando el ángulo de incidencia del oleaje predominante en el área de estudio (figura 7).



Figura 7. Dirección predominante de las corrientes litorales frente a playa El Espino en imagen Google Earth.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el oleaje que afecta las costas salvadoreñas proviene del pacífico lejano y las olas rompen casi paralela a la costa, cualquier pequeña variación en la dirección del oleaje provocará un cambio en la dirección de la corriente de deriva litoral, situación que puede tener una mayor recurrencia durante la estación seca, muy particularmente en los meses de diciembre, enero y febrero.

Este efecto igualmente puede verse reforzado por la influencia de las corrientes de marea, fundamentalmente durante las mareas vivas y vivas equinocciales, así como por el paso de eventos hidrometeorológicos extremos, que generen oleajes providentes del IV cuadrante de la rosa de los vientos.

3.5. Morfodinámica

En este acápite se reflejan los resultados de la aplicación de varias técnicas de análisis. Para la determinación de la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación se utilizó como método fundamental el análisis multitemporal de imágenes aéreas y satelitales, complementado con los resultados de perfiles puntuales ubicados en el sector de costa del estudio.

En el caso de la determinación de la deriva litoral neta, se utilizaron indicadores geomorfológicos y sedimentológicos, siguiendo las consideraciones de Jacobsen y Schwartz, (1981).

3.5.1. *Análisis multitemporal de imágenes aéreas y satelitales*

Para determinar los cambios espaciales que tienen lugar en Playa El Espino, se utilizó como método fundamental el análisis multitemporal de imágenes aéreas y satelitales, previamente georeferenciadas. Se realizó además una comparación a partir de imágenes de Google Earth y un registro fotográfico de puntos específicos para poder establecer cambios en periodos cortos de tiempo.



Figura 8. Trazo de línea de costa en mosaico de fotografías de los años 1949 y 1979

Mediante la superposición de mosaicos de fotografías aéreas, de los años 1949, 1979 y 2009, se determinó la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación costera en playa El Espino. (Figura 8). Como referencia se utilizaron lugares fijos en tierra firme, calles, muros, casas, entre otras infraestructuras. Se delimitaron las líneas de costa y se compararon para determinar los cambios horizontales para cada periodo.

Complementario a las fotografías aéreas, se eligieron imágenes satelitales de 2003, 2006, 2010 y 2011, disponibles en Google Earth para la comparación de zonas puntuales. Estas se acompañaron de un seguimiento fotográfico de los lugares comparados con las fotografías de Google.

3.5.1.1. Evolución de la isla barra donde se localiza la playa

El análisis comparativo de la línea de costa utilizando imágenes aéreas de los años 1949, 1979 y 2009, muestra un retroceso continuo de la línea de costa, a excepción de ambos extremos donde intervienen otros procesos muy particulares de las islas barras (Figura 9).



Figura 9. Isla barra donde se asienta playa El Espino sobre fotografías PACAP

En el periodo comprendido entre 1949 y 1979, según se aprecia en las figuras 9 y 10, hay un incremento en la acumulación de sedimentos en el extremo oeste, lo que provocó un aumento notable en la forma de la barra; sin embargo en los siguientes 30 años la línea de costa retrocedió en un porcentaje mayor a lo ganado en el primer periodo.



Figura 10. Posición de la línea de vegetación consolidada en el extremo oeste de playa El Espino en fotografía PACAP

Este fenómeno puede ser resultado de aportes significativos de sedimentos asociados a las crecidas de los ríos o oleajes asociados a eventos meteorológicos extremos que generaron un transporte de arena en dirección oeste y no como parte de los procesos que están ocurriendo actualmente en esta zona de la isla barra.

Un caso diferente está ocurriendo en el extremo este de la barra, donde ha aparecido una flecha que se está consolidando y cubriendo por vegetación y constituye una clara evidencia de la dirección de la deriva litoral neta en este sector de costa (Figura 11).



Figura 11. Flecha consolidada que ocupa el extremo Este de la playa, base fotografías PACAP

Comparándose la posición de la isla barra entre en los años 1949 y 1979, se aprecia que se ha mantenido el crecimiento en dirección este, aun cuando en igual periodo se produjo un crecimiento en su extremo oeste, cuestión que fue explicada al comentar los procesos que ocurren en el otro extremo de la barra.

Comparándose el año 1979 y 2009, el crecimiento es mucho más significativo. Se aprecia la formación de una isla, al final de la barra, con un área de 156 400 m², en proceso de colonización por la vegetación y que se mantiene muy estable, según se aprecia en la imagen google del año 2011.

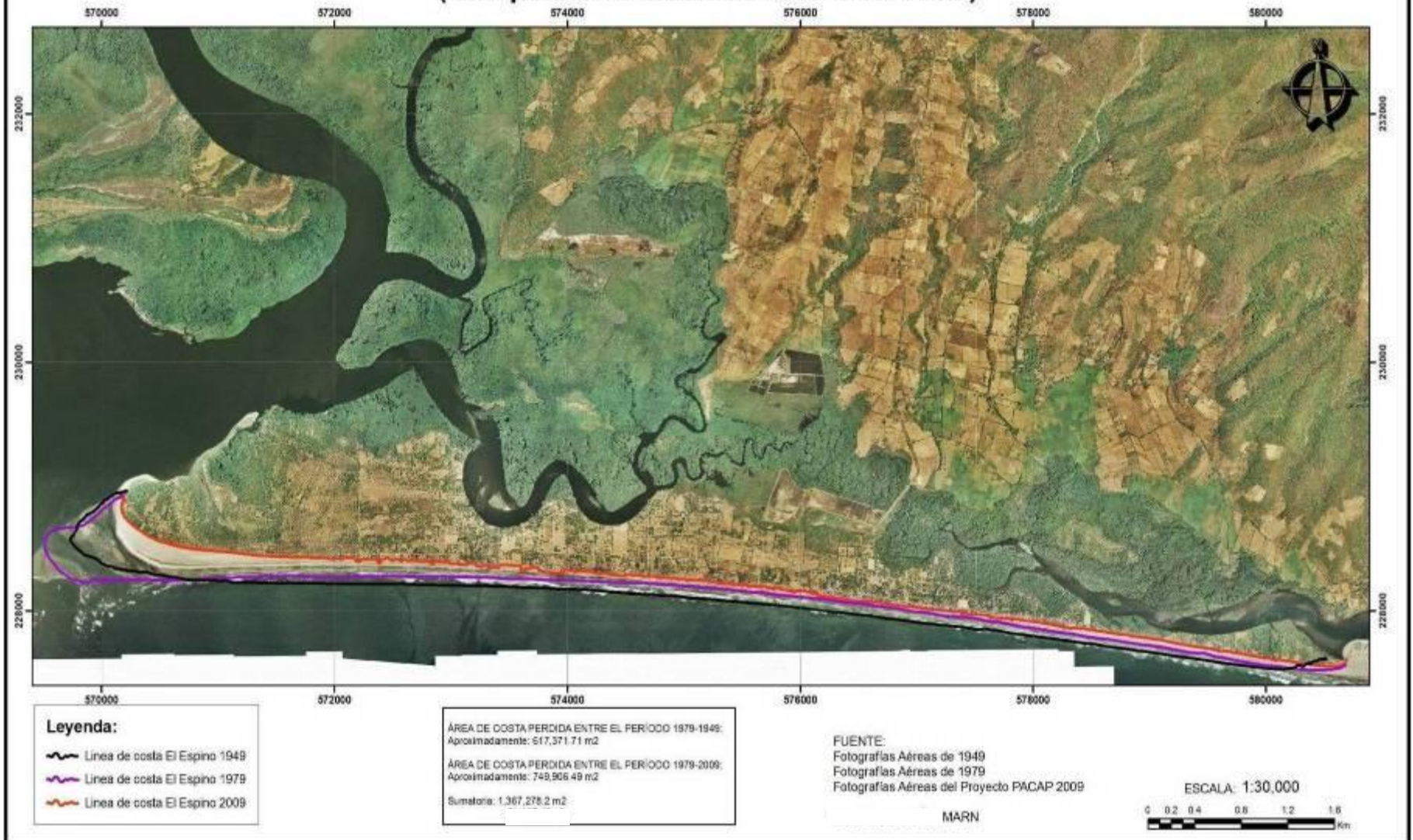
También se aprecia que la bocana del estero El Espino, migra mucho más al este, precisamente por el empuje que ejerce el crecimiento de la isla barra. Este es un proceso que se mantendrá en el futuro y podrá conllevar a la ruptura de la isla barra y la formación de dos islas.

Esto no sucede en la zona central de la barra donde se aprecia un retroceso continuo de la línea de vegetación, como muestra de los procesos erosivos que en la actualidad sufre (figuras 12 y 13).



Figura 12. Superposición de mosaico fotográfico de la zona central, sobre fotografías PACAP

LINEA DE COSTA PLAYA EL ESPINO (Comparación histórica 1949-1979-2009)



3.5.1.2. Evolución de los canales y esteros posteriores a la isla barra

El análisis de la secuencia fotográfica en el estero El Espino muestra la abundancia de sedimentos al interior del canal principal y sus significativos cambios, en unos casos de consolidación de las islas interiores y otros casos de pérdida, por lo que las formas del relieve que aparecen allí no son permanentes.

En el caso particular de la bocana, la imagen de 2009, muestra modificaciones tendientes al cierre de la zona de descarga, donde aparece una marcada sedimentación con la aparición de una flecha de arena en forma de gancho y erosión en zona continental (Figura 14).

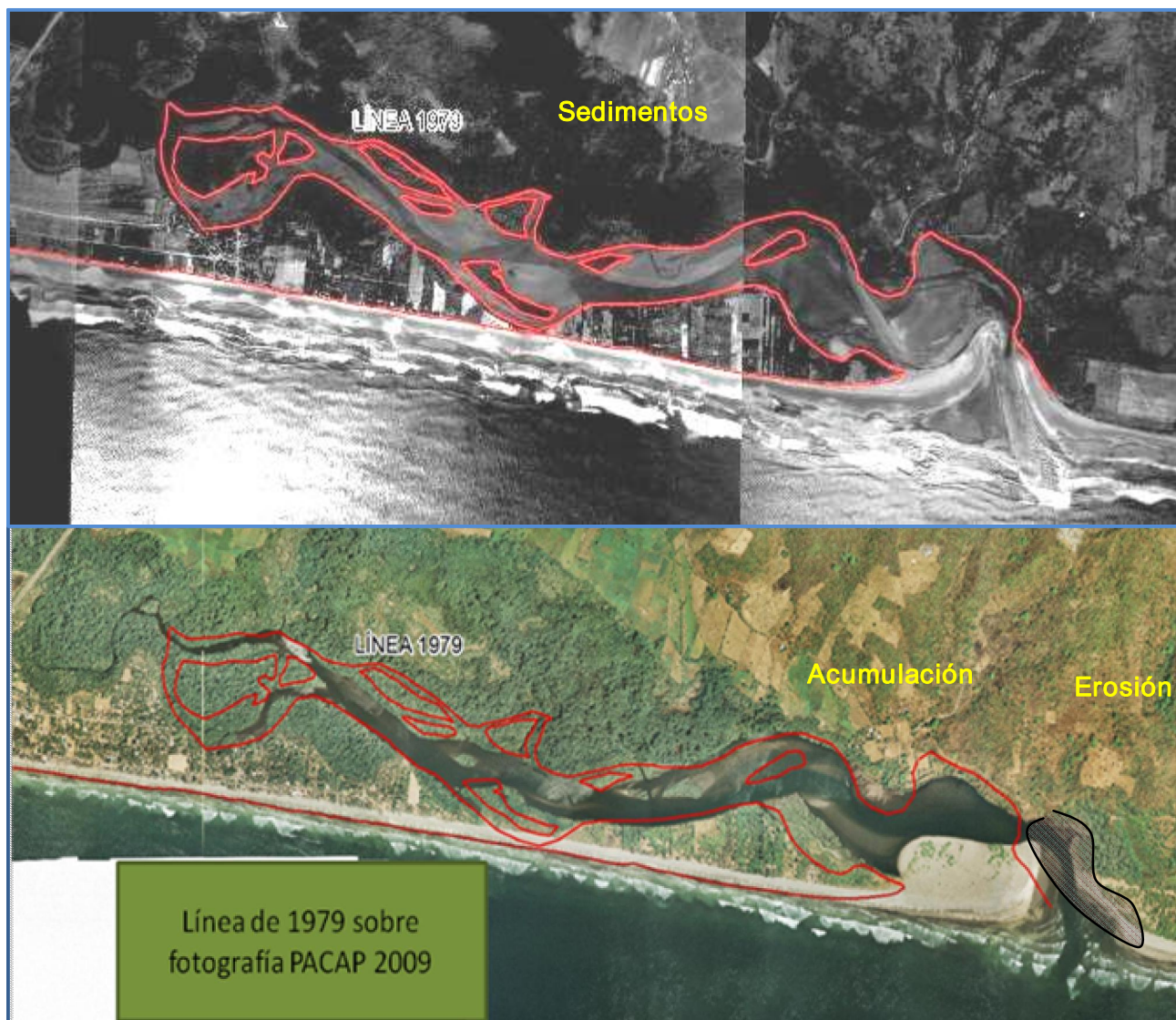


Figura 14. Superposición del trazo del canal en 1979 sobre mosaico de fotografías PACAP 2009

Los cambios resultan mucho más marcados si se compara la posición que tenían los canales en el año 1949 y la posición que tenían en el año 2009. Puede apreciarse que el canal principal se ha sedimentado en la parte más alejada de la desembocadura, el centro se ha reducido y la bocana se ha estrechado significativamente (Figura 15). En esta secuencia puede verse una marcada disminución en el vaso que conforma el brazo principal del estero.



Figura 15. Superposición del trazo del canal en 1949 sobre mosaico de fotografías PACAP 2009

Otro elemento importante a considerar es la disminución en el área cubierta por manglar y la pérdida de vegetación en las laderas de la sierra de Jucuarán. Ello podría explicar el aumento de la sedimentación y el progresivo estrechamiento del canal del estero.

En general, la interpretación de las fotografías aéreas reflejan procesos de acreción en las lagunas que ocupan la parte posterior de la barra, que está reduciendo su canal principal en la zona del estero El Espino. Por el contrario, la isla barra experimenta erosión que se incrementa considerablemente en la bocana La Chepona, donde los cambios son más rápidos.

Ello puede estar generado también por el efecto de las mareas. Con la pleamar ingresan enormes volúmenes de agua a la bahía de Jiquilisco que luego drenan nuevamente al mar y promueven los materiales no consolidados y generan cambios morfológicos en la bocana de dicha bahía y áreas circundantes.

Los resultados en todos los casos reflejan la fuerte actividad dinámica que tiene lugar en la barra y esteros de la parte posterior y muestran la temporalidad de las formas del relieve que aparecen en todas ellas, cuestión que debe tenerse muy en cuenta en los proyectos y programas de desarrollo económico que se impulsen en este área.

3.5.1.3. Magnitud de los procesos de erosión – sedimentación

La definición de la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación toma como base la posición de la línea de vegetación consolidada definida en las fotografías aéreas de los años 1949, 1979 y 2009.

La figura 16, muestra la pérdida en metros para periodos de 30 años. En el periodo 1949-1979 se aprecia una magnitud casi constante de pérdida de arena, que se incrementa levemente hacia el centro del tramo evaluado. En este periodo se estima un retroceso de la línea de costa como consecuencia de la erosión, con una magnitud de 2.04 m/año, lo que significa una pérdida de 617,371.71 m² de área de playa.

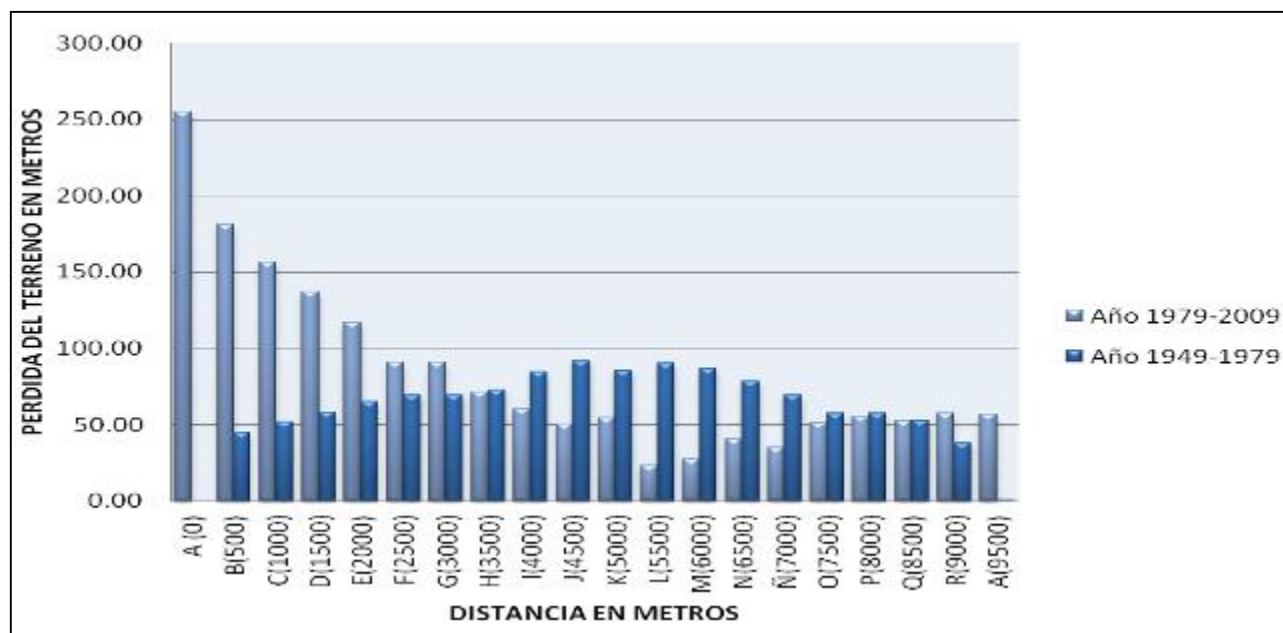


Figura 16. Retroceso de la línea de costa para periodos de 30 años

Fuente: Propia

En el caso del 1979-2009, se aprecia un incremento de la magnitud hacia el extremo Oeste de la barra, una disminución en la zona central, para luego incrementarse ligeramente. En este periodo se estima un retroceso de la línea de costa como consecuencia de la erosión, con una magnitud de 2.77 m/año, lo que significa una pérdida de 749.906.49 m² de área de playa.

De manera general, para el periodo de 1949 a 2009 (60 años), la línea de costa retrocedió 144 m, con una magnitud de 2.40 m/año, por lo que los procesos de erosión que tienen lugar en playa El Espino pueden ser considerado de magnitud fuerte, teniendo en cuenta la magnitud de la erosión en las playas del Caribe.

En su conjunto, en el período de 60 años, se perdieron 1 367 278.2 m² (1 956 301.65 v²)⁵ de área de playa, que al precio actual de 40 dólares/v² representan una pérdida monetaria de 78.3 millones de dólares.

Es previsible que en el futuro esta magnitud se incremente, teniendo cuenta que aún persisten las causas de origen antropogénicos que han contribuido a la desestabilización de este sector de costa. La figura 17, muestra los efectos de la erosión en los años más recientes, con posterioridad a los datos tomados como referencia en este estudio.



Figura 17. Efectos de la erosión en los últimos años

3.5.2. Indicadores geomorfológicos y sedimentológicos para la determinación del transporte de sedimentos

Jacobsen y Schwartz, (1981) establecieron un grupo de indicadores geomorfológicos, en base a los cuales es posible determinar la dirección del transporte de sedimentos y la deriva litoral neta en un sector de costa.

⁵ Una vara cuadrada (v²) equivale a 0.6988 m²

En los estudios llevados a cabo en las costas de Norteamérica, estos investigadores encontraron que las espigas y flechas de arena crecen en dirección de la deriva litoral neta. En el caso de la presencia de promontorios rocosos y otros obstáculos en la costa, la arena se acumula en la dirección de la deriva litoral neta, apareciendo menos volúmenes de arena o erosión en el lado opuesto de la estructura.

En las desembocaduras de ríos y bocas de lagunas, las corrientes divergen en dirección de la deriva litoral neta y generalmente origina flechas de arena orientadas igualmente en esa dirección, con ganchos orientados en dirección tierra.

También, el tamaño y composición de los sedimentos de las playas es un indicador importante que ayuda a determinar la dirección del transporte de sedimentos longitudinalmente a la costa y la posible localización de las fuentes de suministro.

Es conocido que el tamaño del sedimento decrece en la dirección de la deriva litoral neta, debido al decrecimiento de la energía de la ola. Como las olas mueven el sedimento costa abajo (*down drift*), las partículas gruesas y más pesadas requieren mayor energía para ser transportadas que las partículas finas. Por tanto, las partículas más finas son movidas con mayor frecuencia que las partículas más gruesas y marcan la dirección de la corriente de deriva.

Asimismo, cuando la fuente de aporte de sedimentos en una playa es identificada, los sedimentos se moverán en dirección de la deriva litoral neta y decrecen en dirección contraria. Los sedimentos más gruesos serán encontrados más cerca de la fuente de aporte de los sedimentos, mientras los sedimentos más finos serán encontrados más lejos, coincidiendo con la dirección de la deriva.



Figura 18. Extremo este de playa El Espino, imagen de Google Earth

En base a estas consideraciones, se procedió a identificar la dirección de la deriva litoral neta en playa El Espino, como parte del proceso de investigación llevado a cabo para conocer el

funcionamiento de la isla barra donde se encuentra la playa y como reafirmación de la información referida en el acápite de oceanografía sobre la dirección predominante de la corriente de deriva litoral.

La isla barra que forma la playa presenta, en dirección Este-sureste, una flecha en forma de gancho que se ha formado en los últimos 30 años, manteniéndose estable y en proceso de colonización por la vegetación (Figura 18).

Así mismo, en la margen occidental de la desembocadura del Río San Miguel, en el extremo oeste de la barra de El Espino, se ha formado también una flecha de arena orientada en igual dirección (Figura 19).



Figura 19. Margen occidental de la desembocadura del Río Grande de San Miguel, imagen de Google Earth.



Figura 20. Margen occidental de la bocana de la bahía de Jiquilisco, imagen de Google Earth.

Otras formas similares pueden ser encontradas en la boca de la bahía de Jiquilisco, más al oeste de la zona de estudio, todas con barras y flechas de arena que crecen en dirección Este-Sureste (Figura 20).

Asimismo, en los recorridos realizados por la playa, se identificaron un grupo de obras de defensa costera construidas, rudimentariamente por los pobladores, como defensa de sus viviendas de los procesos de erosión. En ellas era posible apreciar un mayor ancho de la playa y la presencia de mucho más arena en las márgenes de Oeste-noroeste que las márgenes de Este-Sureste (Figura 21).



Figura 21. Espigón con acumulación de arena en la margen oeste-noroeste

Aun cuando parte de los formas encontradas en las islas barras podrían estar determinadas por el efecto acondicionador del flujo y reflujo de la marea, estos elementos prueban que la dirección de la deriva litoral neta en playa El Espino es en dirección Este-Sureste y confirma los resultados de la estimación de la dirección de la corriente litoral a partir de la dirección predominante del oleaje incidente en la playa.

3.5.3. Análisis de los perfiles de playas

En playa El Espino fueron levantados tres perfiles de playa, en el mes de febrero del año 1997, cuyos resultados se conservan. El SVD-14, está el área de la hacienda La Chepona, el SVD-15, en playa Los Arcos y el SVD-16 en playa El Espino.

Con posterioridad, en febrero del año 2011, se levantaron nuevos perfiles de playa, coincidiendo uno de ellos (La Chepona) con el punto de inicio utilizado en el año 1997, en los otros dos casos no fueron encontrados por los puntos utilizados como referencia para el inicio del perfil, estimándose que están en el área ocupada actualmente por el mar. Además fueron incluidos dos nuevos perfiles: Espino 1 y Espino 2 (Figura 22). En febrero de 2012, fueron repetidos nuevamente los perfiles.



Figura 22. Ubicación de los perfiles de monitoreo en playa El Espino, imagen de Google Earth

Debido a que sólo se cuentan con dos perfiles por cada estación de monitoreo y que estos no cubren toda la playa, resulta imposible llegar a conclusiones de los procesos morfodinámicos que tienen lugar en la playa, no obstante se realizó el análisis de cada uno de ellos en la búsqueda de nuevos elementos que respalden los resultados obtenidos en el proceso de interpretación de los procesos morfodinámicos utilizando imágenes aéreas e indicadores geomorfológicos.

Para el procesamiento de datos fue utilizado el software BMAP versión 2.0 (Beach Morphology Analysis Package), desarrollado por Waterways Experiment Station of US Army Corps of Engineers, 1994. Este software permite modelar de manera automática e interactiva las características morfológicas y dinámicas del perfil de playa.

En el caso del perfil ubicado en la Chepona, este no refleja los procesos morfodinámicos del perfil de playa en El Espino, sino la variabilidad de la costa en la bocana La Chepona y muy particularmente en este punto.

Como se aprecia en la figura 23, la línea de costa ha experimentado un retroceso, comparándose los perfiles del 2011 y 2012 con el perfil levantado en 1997, aunque sin poderse precisar otros elementos pues el perfil de 1997 no cubre toda la bocana.

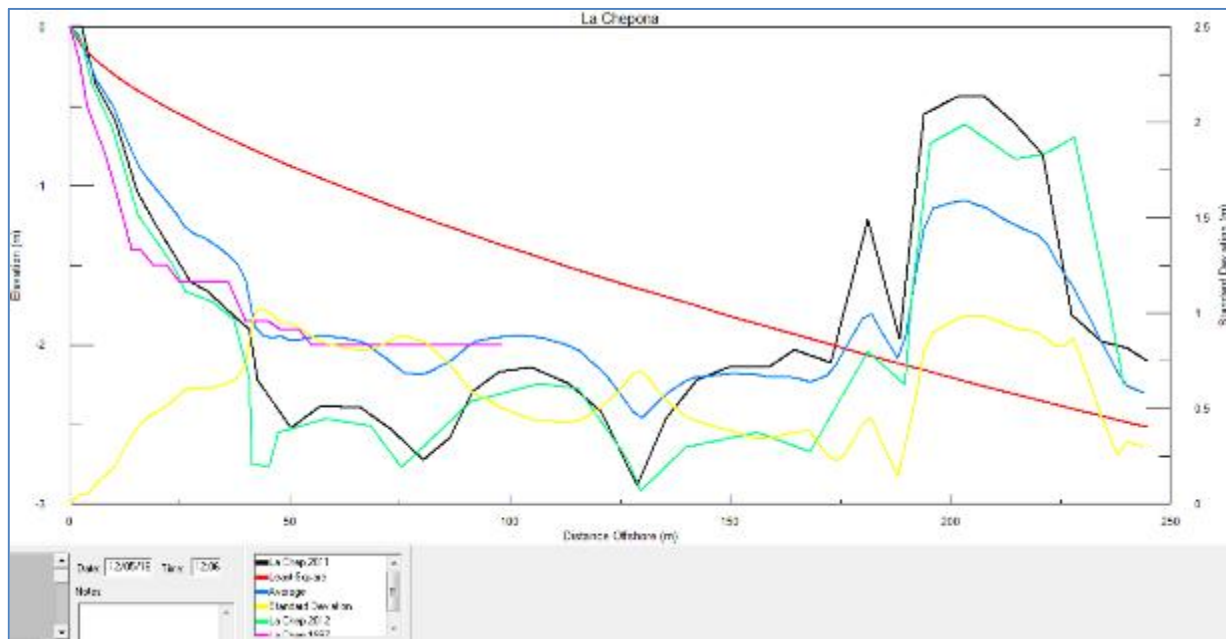


Figura 23. Perfiles de playa en La Chepona, en color rojo la línea de mejor ajuste Fuente: propia

La comparación del perfil de 2011 y 2012, no refleja pérdidas de arena, pues los cambios que se producen en los primeros 50 -150 m desde el punto de inicio, se compensan con ganancias en la barra localizada al final del perfil.

Como se aprecia en la figura 24, la mayor variabilidad de perfil, se aprecia en los primeros 80 m desde el punto de inicio y al final coincidiendo con la barra de arena localizada en el otro extremo del canal, aunque sin cambios que resulten significativos, por lo que no es posible asegurar la presencia de procesos de erosión o sedimentación.

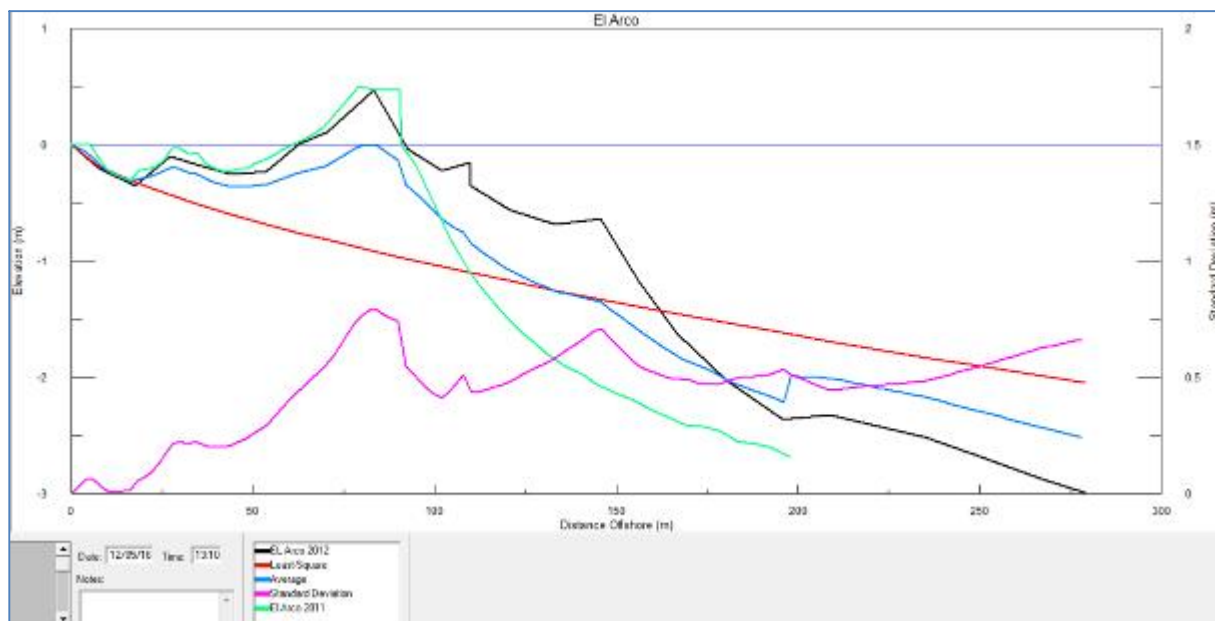


Figura 24. Perfiles de playa en la zona de El Arco, en color rojo la línea de mejor ajuste Fuente: propia

En el caso del perfil El Arco, localizado en el porción occidental de playa El Espino, la comparación de los perfiles levantados en los años 2011 y 2012, muestran una posición estable de la línea de costa, aunque con un repliegue hacia tierra de la cresta de la berma en el orden de 7 m, respecto al perfil del 2011 (figura 24), aunque sin que se produzcan pérdidas significativas de arena (solo 3 m³/m lineal de playa), pues las pérdidas que se producen en la parte emergida de la playa, se compensan con procesos acumulativos en la pendiente sumergida.

En el caso del perfil El Espino 2, localizado dos kilómetros al este del perfil El Arco, se aprecia una acumulación importante de arena en la parte emergida de la playa en el orden de 29 m y una ganancia neta de 26 m³/m lineal de playa (figura 25).

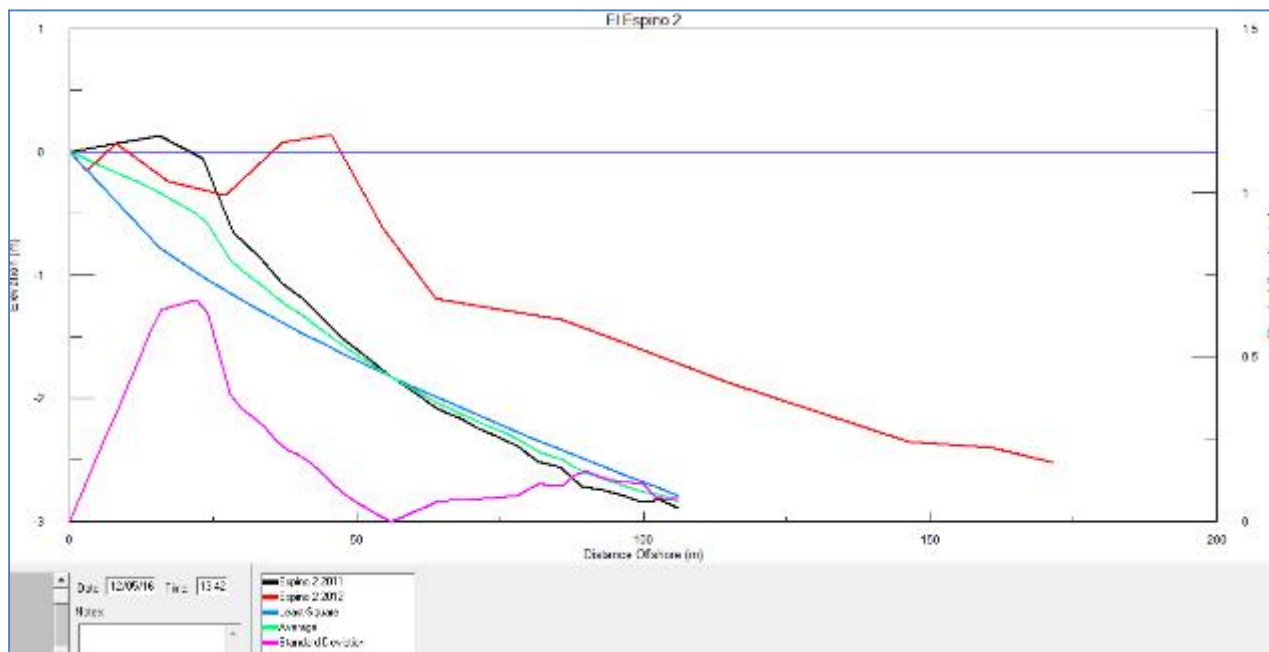


Figura 25. Perfiles de playa El Espino 2, en color azul la línea de mejor ajuste

Fuente: propia

La figura refleja que la mayor variabilidad del perfil ocurre en los primeros 50 m, cuestión que concuerda con los procesos acumulativos de que se aprecian en la zona emergida de la playa.

En el caso del perfil El Espino localizado en el centro de la playa y a 2.5 kilómetros del este de perfil El Espino 1, se aprecia que la línea de costa retrocedió 28 m, reportándose una pérdida 33 m³ por metro lineal de playa (Figura 26).

En este caso, las pérdidas de arena que se han producido en esta zona de la playa, están casi en el mismo orden de las ganancias que se aprecian en el perfil El Espino 1. Ello hace pensar que las pérdidas que se produjeron en esta zona de la playa representaron ganancias para la parte más occidental, cuestión que puede ser posible teniendo en cuenta que el perfil fue levantado en el mes de febrero, y en los meses de diciembre, enero y febrero puede invertirse los patrones de circulación de las aguas costeras debido a la mayor incidencia de oleajes provenientes del sur y sureste, como se discutió en el acápite de oceanografía.

Estas consideraciones no dejan de ser puras conjeturas, pues la distancia entre unos perfiles de otros y la frecuencia de monitoreo no permiten realizar una interpretación correcta de los procesos morfodinámicos que tienen lugar en la playa, pero ratifican la necesidad de densificar la red y aumentar la frecuencia del monitoreo de la variabilidad de los procesos morfodinámicos que tienen lugar en la playa.

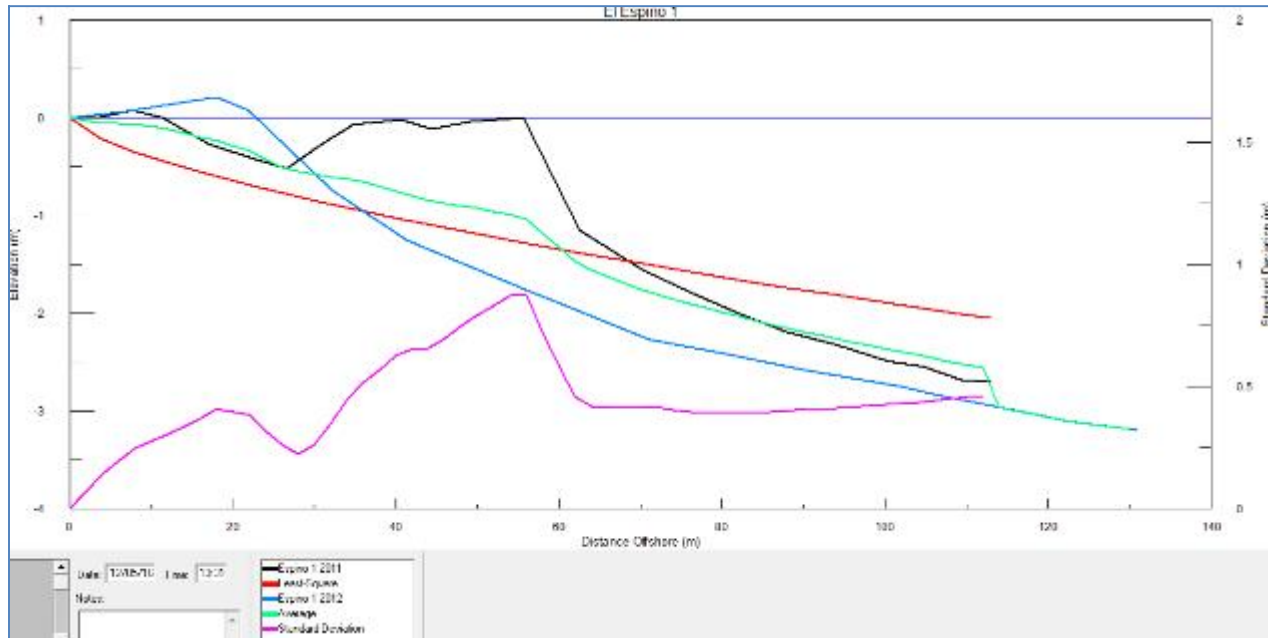


Figura 26. Perfiles de playa El Espino 1, en color rojo la línea de mejor ajuste

Fuente: propia

3.5.4. Estado modal de playa El Espino

Para determinar el estado morfodinámico de las playas, se utilizó el parámetro adimensional (Ω) o Índice de Dean (Wright y Short, 1984) que permite clasificar las playas en disipativas, reflectivas y cuatro estadios intermedios, atendiendo al parámetro de la ola y del tamaño del grano de sedimento (ecuación 1).

$\Omega = \frac{H_b}{W_s T}$	1
------------------------------	---

Donde:

H_b , altura de la ola de rompiente,
 W_s , velocidad de caída del sedimento,
 T , periodo de la ola.

Según esta ecuación, el valor 1 define el umbral de una playa reflectiva a intermedia, un valor 6, un umbral de intermedia a disipativa, por lo que las playas de tipo intermedias tienen un valor mayor que 1 e inferior a 6.

El procesamiento de los perfiles de playa, siguiendo esta ecuación permite clasificar a playa El Espino como playa disipativa, pues se obtuvo un valor de 7.1. Este resultado coincide con las consideraciones de Wright y Short (1983), quienes definieron que las playas disipativas se caracterizan por ser playas amplias con poca pendiente en la cara y en la zona de rompiente. Las olas rompen entre 200 m y 500 m de la línea de costa.

Las figuras de 27 y 28, muestra a modo de ejemplo las diferencias entre las playas disipativas y reflectivas.

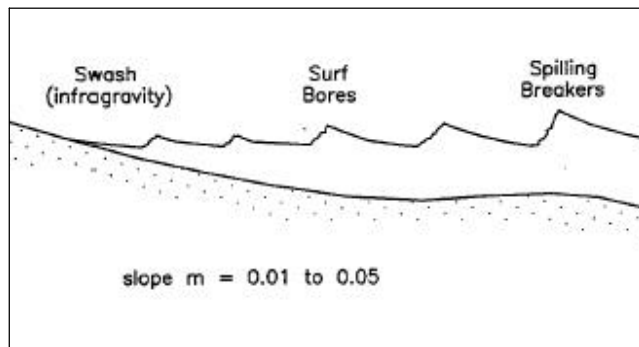


Figura 27. Playa disipativa

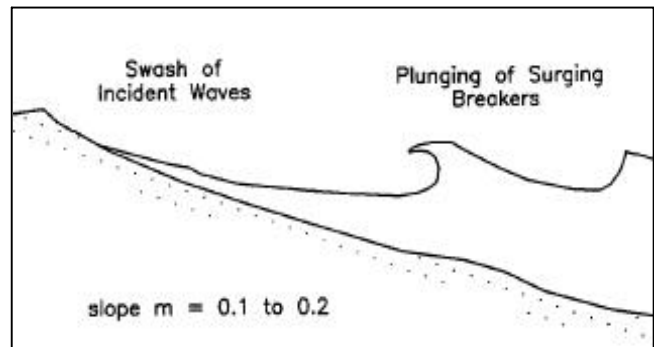


Figura 28. Playa reflectiva

Desde el punto de vista ingenieril se debe tener presente que será diferente la respuesta de un estructura perpendicular a la línea de costa (espigones) de acuerdo al tipo de playa, sobre el transporte litoral. Una estructura de corta longitud puede ser más efectiva en una playa reflectiva que en una disipativa.

3.6. Causas de los procesos de erosión-sedimentación

Tal y como quedó demostrado en los acápites anteriores, la barra donde se localiza playa El Espino está sometida a procesos erosivos, con una magnitud de 2.40 m al año, según los resultados del análisis multitemporal de imágenes aéreas y satelitales en base a una data de 60 años.

Las observaciones llevadas a cabo en el lugar, contrastadas con informaciones aportadas por las poblaciones y fuentes bibliográficas, permitieron conocer que los procesos de erosión presentes allí están originados, tanto por factores naturales como antropogénicos, pero con una mayor incidencia de estos últimos.

Desde muy temprano, en el siglo XX, comenzó la asimilación intensiva en la zona de la isla barra, con la construcción de la hacienda la Chepona y posteriormente la hacienda San Luis. En ese entonces toda la playa y las áreas aledañas estaban cubiertas por espesos bosques de mangle, rastreras y otras especies de vegetación de playa (*Ipomea pes caprae*, *Jouvea pilosa*, *Heliotropium curassavicum*, *Hyponame mancinella*, *Prosopis juliflora*, *Mimosa tenuiflora*, entre otras), que fueron desapareciendo para dar paso a plantaciones de cocoteros y cultivos agrícolas (Figura 30). Las especies de la vegetación de costa, luego de un largo proceso de evolución, fueron desarrollando un sistema radicular y de cobertura que contribuyen a bajar la energía del oleaje y



Figura 30. Cocoteros abatidos por la erosión

con ello a retener los sedimentos más finos que se transportan fundamentalmente en suspensión y saltación.

Por otra parte, la vegetación existente más hacia tierra, juega el importante papel de retener las partículas de arena transportadas por el viento, contribuyendo a la formación de dunas, evitando el escape de la arena fuera de la zona activa de la playa (Figura 31)

Al eliminarse la vegetación natural, los sedimentos de granulometría fina, que antes eran retenidos por el sistema radicular de las especies de la vegetación costera existente, ahora se pierden, pues no son estables ante los niveles de energía a que actualmente están expuestos.

A ello habría que añadir el importante papel de la vegetación en la regulación de los drenajes superficiales, evitando el arrastre de importantes volúmenes de las arena, de la zona emergida de la playa, durante las fuertes lluvias.

Posteriormente, atraídos por las bondades del mar fueron apareciendo los primeros pobladores, ocupando espacios que experimentan permanentes cambios, con las perspectivas de desarrollo, estilos constructivos o modos de vidas tradicionales, desarrollados en aras interiores, que nada tienen que ver con las particularidades dinámica de la playa y los ecosistemas costeros en general.

Así fueron apareciendo viviendas y construcciones de todo tipo, ubicadas de frente al mar, a muy pocos metros de la orilla (Figura 31).



Figura 31. Arena estabilizada por la vegetación costera (*bejuco de playa*)

Durante las mareas vivas equinocciales y eventos hidrometeorológicos extremos, las olas chocan contra las bases de las construcciones, creando una zona de turbulencia donde los sedimentos se

ponen en suspensión y son arrastrados por las olas y corrientes fuera de la playa.



Como medida de protección de la erosión por el mar, fueron construyendo muros y obras de defensa rudimentarias, que acrecentaron los procesos de erosión presentes allí, pues la energía de la ola no se consume recorriendo la cara y parte de la berma, sino acarreando arena fuera de la playa.

Figura 31. Instalaciones construidas sobre la playa

El efecto de la destrucción generada por el mar, puede constatarse actualmente pues ha desaparecido la franja de arena, frentes a algunas de estas instalaciones, incluso muchas de las construcciones que se encontraban en la playa (figura 32).

Ambos casos demuestran que se ha estado asimilando un espacio que tiene una dinámica muy activa. Las islas barras tienen la singularidad de migrar constantemente, a veces ensanchándose



si hay importantes aportes de sedimento y otras veces estrechándose cuando la cantidad de sedimento que llega a la costa es inferior a las pérdidas.

Al asimilarse un espacio sin tener en cuenta su funcionamiento y en particular su actividad dinámica, las personas residentes allí, se han hecho vulnerables a la destrucción de sus instalaciones por los procesos de erosión costera.

Figura 32. Pérdida de la berma de la playa

Entre las causas de origen natural, además de la propia actividad dinámica de las islas barras, destaca el régimen hidrodinámico que afecta las costas salvadoreñas, caracterizado por olas de poca altura (1.2 m), pero largos períodos ($T > 10$ seg) y una amplitud de marea que supera los 3 m.

Con estas mareas, las olas logran penetrar decenas y cientos de metros tierra adentro (Figura 33), por lo que su poder destructor no se limita a una estrecha franja de algunos metros; cuestión que



resulta más crítico al paso de eventos hidrometeorológicos extremos, tal y como ocurrió en mayo y junio de 2010, en el primer caso al paso de la tormenta tropical Agatha y luego por oleajes provenientes del pacífico lejano. Eventos de este tipo se volvieron a repetir en mayo y septiembre de 2011.

Figura 33. Viviendas e instalaciones abatidas por oleajes extremos

Por otro lado, la corriente de deriva litoral acarrea la arena desde las porciones occidentales de la isla barra hacia la porción este-sureste, estrechando la playa en su porción oeste-noroeste, a expensas del crecimiento de la barra en sentido contrario.

Asimismo, con el flujo y reflujo de la marea, se generan fuertes corrientes que mueven importantes volúmenes de materiales no consolidados y condiciona cambios en la morfología de la costa en las bocanas de los esteros y bahías, así como en delta del río Lempa.

En otro orden de cosas, la presencia de sedimentos finos, de génesis terrígena, en la playa El Espino demuestra que la fuente primaria de aporte de los sedimentos se encuentra muy distante, por lo que la celda litoral o sistema costero, exceda a la isla barra.

La presencia de una deriva litoral en dirección este-sureste, permite considerar que los sedimentos de playa El Espino y la isla barra en general, no sólo preceden de los aportes del río Grande de San Miguel y pequeños cursos de agua cercanos, sino también de los que pudiera aportar la bahía de Jiquilisco, durante el reflujo de la marea e incluso del Río Lempa.

La construcción de represas sobre el Río Lempa y los sistemas de riego utilizando las aguas del Río Grande de San Miguel, puede ser causa que esté llegando menos sedimento a la costa que los que se pierden como consecuencia de la actividad dinámica de la zona. Como respuesta, la

playa busca un nuevo perfil de equilibrio, tanto en el plano vertical como horizontal, estrechando las islas barras y el delta.

Por último, hay dos cuestiones más que deben tomarse en cuenta. Una es la actividad tectónica generada por la subducción de la placa Cocos con la placa Caribe. Este proceso tiende a levantar toda la zona y trajo como resultado la formación de las cordilleras de Jucuarán y El Bálsamo y la cadena de volcanes que en ella se encuentran.

Con los cambios del nivel del mar generado por la actividad tectónica, la playa trata de adaptarse paulatinamente a las nuevas condiciones, buscando una configuración de equilibrio. Estos cambios en la morfología del perfil requieren una cantidad extra de sedimentos, que de no obtenerlos por un ingreso neto de arena por parte de las fuentes naturales de aporte, entonces los extrae erosionando la playa.

El otro elemento importante a considerar es la elevación del nivel del mar, asociado a los cambios climáticos globales. Brunn (1988), demuestra que con los cambios en el nivel del mar, el perfil de la playa trata de adaptarse paulatinamente a las nuevas condiciones buscando una configuración de equilibrio que requieren una cantidad extra de sedimentos, que generalmente se obtiene erosionando la playa.

Aunque estas dos últimos elementos pueden tener efecto contrapuesto para las costas de El Salvador, es decir se compensan uno con otro y actúan en una escala de tiempo mayor, son cuestiones que no deben dejarse de tener en cuenta en el análisis de las posibles causas que generan los procesos de erosión en playa El Espino y las costas de El Salvador en general.

En base a los elementos expuestos en este acápite, las causas de mayor importancia que están generando los problemas de erosión en playa El Espino parecen ser:

➤ ***La propia actividad dinámica de las islas barras.***

Las islas barras suelen ser formas, incluso efímeras, que migran constantemente, a veces ensanchándose y otras veces estrechándose.

➤ ***La construcción de instalaciones de todo tipo sobre la playa.***

La construcción de instalaciones y muros sobre la playa ha aumentado la magnitud de los procesos de erosión, pues la energía de la ola no se disipa recorriendo la cara de la playa, sino extrayendo arena de la playa al chocar contra las estructuras.

➤ ***El efecto de los eventos hidrometeorológicos extremos.***

Los oleajes de mayor energía asociados a eventos extremos tienen un mayor potencial de erosión, al chocar con más fuerza contra las construcciones y llegar más lejos tierra adentro.

➤ ***La eliminación de la vegetación natural.***

La vegetación natural contribuye a retener los sedimentos más finos, que de otra manera se perderían, pues no son estables ante los niveles energéticos habituales de la playa.

- ***La disminución de los aportes de sedimentos de los ríos Lempa y Grande de San Miguel.***
Con la construcción de las represas en el Río Lempa y sistemas de riego en el río Grande de San Miguel, pueda estar llegando menos sedimento a la costa que los que se pierden como consecuencia de la actividad dinámica de la zona. A ello hay que añadir las extracciones de arena que se realizan en sus cauces.
- ***El régimen hidrodinámico de las costas de El Salvador.***
Durante la marea viva las olas logran penetrar decenas y cientos de metros tierra adentro acrecentado el poder erosivo del oleaje.

Ello demuestra la necesidad de llevar a cabo acciones, dirigidas fundamentalmente a restituir las condiciones en que ha sido roto el equilibrio, muy particularmente a eliminar las causas de origen entrópico que la generan, complementado con acciones dirigidas a mitigar los efectos de la erosión.

3.7 pronóstico de los cambios esperados

El análisis de la variabilidad de la línea de costa a través de imágenes aéreas y satelitales demostró que la costa tiene una tendencia erosiva irreversible. En el periodo de 1949 a 1979, retrocedió a un ritmo de 2.04 m/año, sin embargo en el periodo comprendido entre 1979 y 2009, retrocedió a ritmo de 2.77 m al año, es decir, se incrementó en 0.73 m/año en un intervalo de 30 años.

De no ejecutarse ninguna acción en los próximos años, la costa estaría retrocediendo a un ritmo de 3.5 m/ año (figura 34), de mantener igual tendencia, sin embargo es de esperar que se incremente. Bajo esta proyección la costa habrá retrocedido 105 m, en los próximos 30 años, lo que determina la pérdida de casi toda la mitad oriental de la playa y el estrechamiento del resto de la barra.

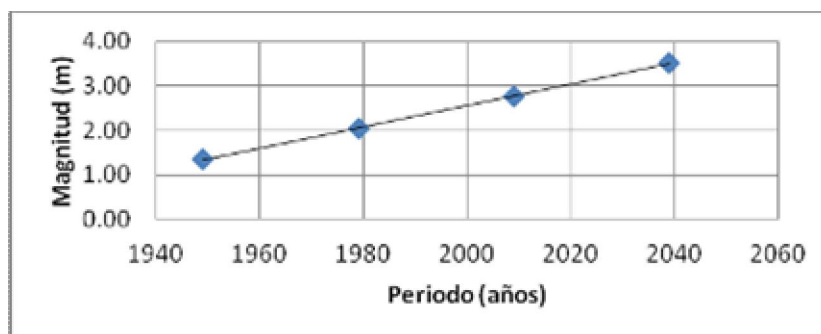


Figura 34. Comportamiento de la erosión y tendencia en los próximos años
Fuente: propia

En la zona central de la playa, donde se concentra el grueso de las instalaciones, el mar avanzará hasta la segunda calle (figura 35), y pudiera inundar toda la parte posterior, hasta el estero, teniendo en cuenta que toda la zona es muy baja y tiene una pendiente inversa.



Figura 35. Posición de la línea de costa en los próximos 30 años, base imagen Google Earth.

Los cambios más dramáticos, en un breve plazo, tendrán lugar en la porción este-sureste de la playa (figura 36). Aquí el mar podría cerrar la bocana la arenera y el estero el espino rectificará su curso, partiendo la isla barra en dos, con posibilidad de que la nueva isla barra originada al este, siga fragmentándose en islas más pequeña hasta desaparecer.



Figura 36. Fragmentación de la barra en los próximos años, base imagen Google Earh.

En el caso del resto de la playa, el retroceso se mantendrá dentro del rango de los 3.5 m/año, pudiendo ser más significativa en la bocana la Chepona (figura 38)



Figura 37. Cambios esperados en el extremo oeste de playa el espino, base imagen Google Earth.

Aquí el mar pudiera erosionar la punta hasta desaparecer o la continuaría inundando hasta cubrirla completamente bajo el agua. En el área contigua el mar avanzaría hasta muy próximo a la vía principal que comunica toda la playa.



Figura 38. Cambios esperados en el extremo oeste de playa el espino, base imagen Google Earth.

Estos cambios pudieran disminuirse dependiendo de las acciones que se ejecutan en los próximos cinco años. En el capítulo siguiente se definen las posibles acciones a ejecutar y su orden de prioridad.

4. SOLUCIONES PARA EL MANEJO DE LA EROSIÓN EN PLAYA EL ESPINO

Las actuaciones para la protección de costas en el Mundo han tenido un marco fundamentalmente económico, centrándose a la protección de la costa contra los riesgos de la erosión y a crear condiciones para proveer un adecuado uso recreacional de las playas, como sustento del modelo económico predominante y un enfoque de desarrollo económico a corto plazo, a costa del derroche y la dilapidación de los recursos naturales sin importar su protección y conservación.

Ante la crisis económica, ecológica y ambiental que enfrenta la humanidad, lograr la protección ambiental, sin comprometer el desarrollo económico, constituye el mayor reto de la comunidad internacional, en particular de los países en vías de desarrollo, pues sin una protección adecuada del medio ambiente, el crecimiento económico se vería menoscabado, como ha sucedido en algunos países de Latinoamérica, África y Asia y por ende, sin crecimiento económico fracasa la protección ambiental.

Los estudios llevados a cabo en playa El Espino demuestran que los procesos de erosión que tiene lugar allí son fundamentalmente de origen antropogénicos, es decir han sido generados por las intervenciones realizadas por el hombre, sin tener en cuenta las particularidades en el funcionamiento de las playas, las islas barras y los ecosistemas costeros en general.

En el Shore Protection Manual (1984), se define que las obras de defensa costera utilizadas más frecuentemente para la protección de playas, son los espigones, los diques y la alimentación artificial de playas, denominándose las primeras como soluciones duras, por introducir elementos rígidos en la morfología de la costa o el fondo y las segundas como soluciones blandas por aportar únicamente arena, es decir, el propio elemento existente en el medio.

Así mismo, se define que la aplicación de soluciones duras y su efectividad dependen de la existencia de un transporte de arena conocido en magnitud y dirección. En muchas ocasiones la existencia de una pobre entrada de arena al sistema costero, determina que la cantidad de arena retenida por las estructuras no sea la deseada o disminuya en el tiempo, razón por la cual generalmente se apela a la combinación de las soluciones duras con el aporte externo de arena.

El mayor inconveniente de las soluciones duras son los impactos negativos sobre el paisaje, las limitaciones a la propia actividad recreativa y la navegación, además de extrapolar, frecuentemente, el problema de la erosión a otros sectores de costa (Figura 39). Generalmente introducen también daños ecológicos significativos sobre los ecosistemas circundantes, sobre todo cuando estas estructuras son sobredimensionadas o son colocadas en zonas ecológicas muy sensibles.

En este sentido la alimentación artificial de arena ha ganado adeptos en el ámbito internacional, por sus ventajas estéticas y ecológicas con respecto a los diques y espigones, pues no introduce elementos ajenos al medio, además de que los resultados se obtienen de manera inmediata, convirtiéndose prácticamente en la única solución para enfrentar los problemas de regresión de playas en el mundo.

La mayoría de los autores señalan que la solución para la regeneración de playas está en función de sus características físicas y de las particularidades del funcionamiento de los sistemas costeros.

El proyecto o diseño de dichas obras mediante la aportación exclusiva de arena o combinada con diques o espigones depende fundamentalmente de un conjunto de factores, tales como:

- a) La forma en planta de la línea de costa
- b) Su orientación respecto a los oleajes dominantes y el transporte litoral
- c) La profundidad y pendiente del fondo
- d) Las causas y magnitud de la erosión
- e) El tamaño y peso de los granos de la arena existente en la playa a regenerar
- f) Las posibilidades de aportación de arena de tamaño no inferior a la existente en la playa a regenerar
- g) Los impactos ambientales
- h) Los costos de ejecución



Figura 39. Espigones en La Guardia, Isla Margarita, imagen Google Earth.

Como criterio general, se elige la alimentación artificial con arena, construyendo solamente espigones o diques en aquellos puntos en que sean necesarios para asegurar la estabilidad de las playas, al abrigo de los mismos.

Sin embargo, la aportación exclusiva de arenas proveniente de los fondos marinos, no es una solución que resuelve el problema de la erosión de la playa, dado que cualquier actuación es inútil, sin antes suprimir todos aquellos impactos de origen antropogénicos que han provocado la pérdida de la estabilidad de la playa y el retroceso de la línea de costa.

Otras de las razones, ha sido el uso de arena de calidad inferior a la existente en la playa, incluso con contaminación de metales pesados, por lo que diversas organizaciones ecologistas han exigido el paro de los trabajos de regeneración de playa en numerosas regiones del mundo.

En los Estados Unidos, también ha habido una disminución de la aportación exclusiva de arena para trabajos de regeneración de playa debido a las mismas causas. Entre 1970 y 1980, más del 90% de las actuaciones costeras dirigidas a la protección costera consistían, únicamente, en la aportación exclusiva de arena, situación que comenzó a cambiar en la década de los años 80, debido, entre otras razones, a no existir arena suficiente, con la calidad adecuada y en condiciones de ser explotadas a un costo razonable (Figura 40).

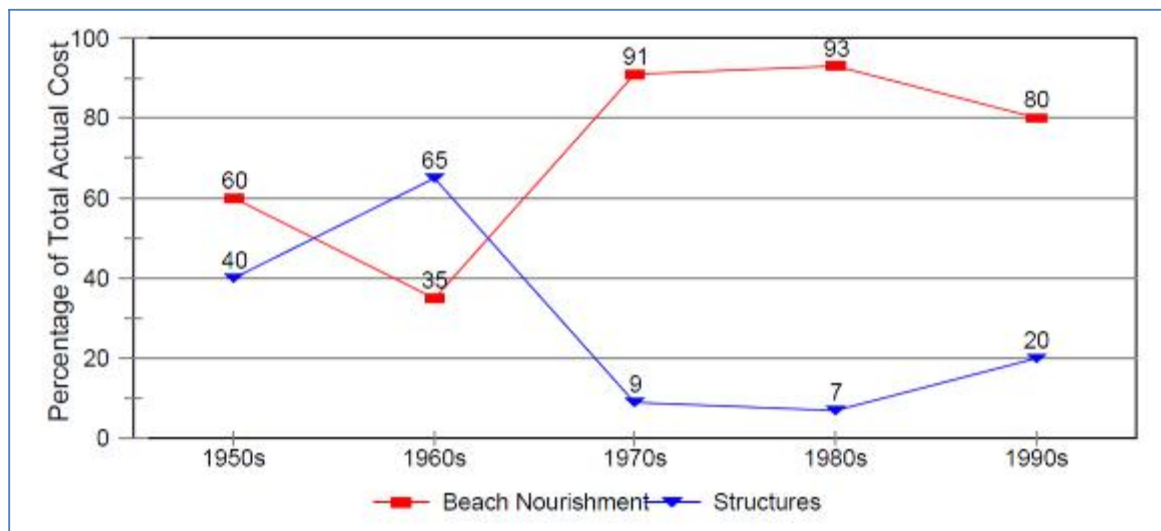


Figura 40. Comportamiento de las alternativas para el control de la erosión en los Estados Unidos
Fuente: Shore Protection Projects (2001)

En el Coastal Engineering Manual (2001), además de las llamadas soluciones duras (diques, rompeolas) y las soluciones blandas (alimentación artificial de arena), aparecen otras soluciones no estructurales, como el uso de vegetación como alternativa de protección costera, con casos exitosos en zonas de bahías y lagos, donde la energía de la ola no es muy alta y la erosión no ha alcanzado proporciones catastróficas.

Así mismo, países como Cuba, Estados Unidos, España y otros países de la Unión Europea, debido a los fuertes impactos de las construcciones sobre la costa, han llevado a cabo importantes trabajos de relocalización, trasladando las instalaciones hacia el interior de los territorios y favoreciendo el libre movimiento de las arenas en toda la franja litoral.

Aparejado a estas soluciones técnicas, es necesario trabajar en los componentes legales relacionado con los usos y la asimilación económica de la zona costera. El establecimiento de un límite mínimo de construcción en las zonas costeras, en función de los tipos de costas, que sea acogido y respetado rigurosamente, sin duda contribuirá notablemente a mitigar la erosión en las playas o al menos contribuirá a evitar que esta siga aumentando sus proporciones.

Estos elementos demuestran la necesidad de ampliar el marco de análisis y la búsqueda de nuevas alternativas para la protección de la costa contra la erosión, que incorpore los elementos legales y regulatorios, las alternativas ingenieriles y la profundización del conocimiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas costeros. La figura 41, representa un diagrama metodológico de la manera de abordar los trabajos de protección de costa.

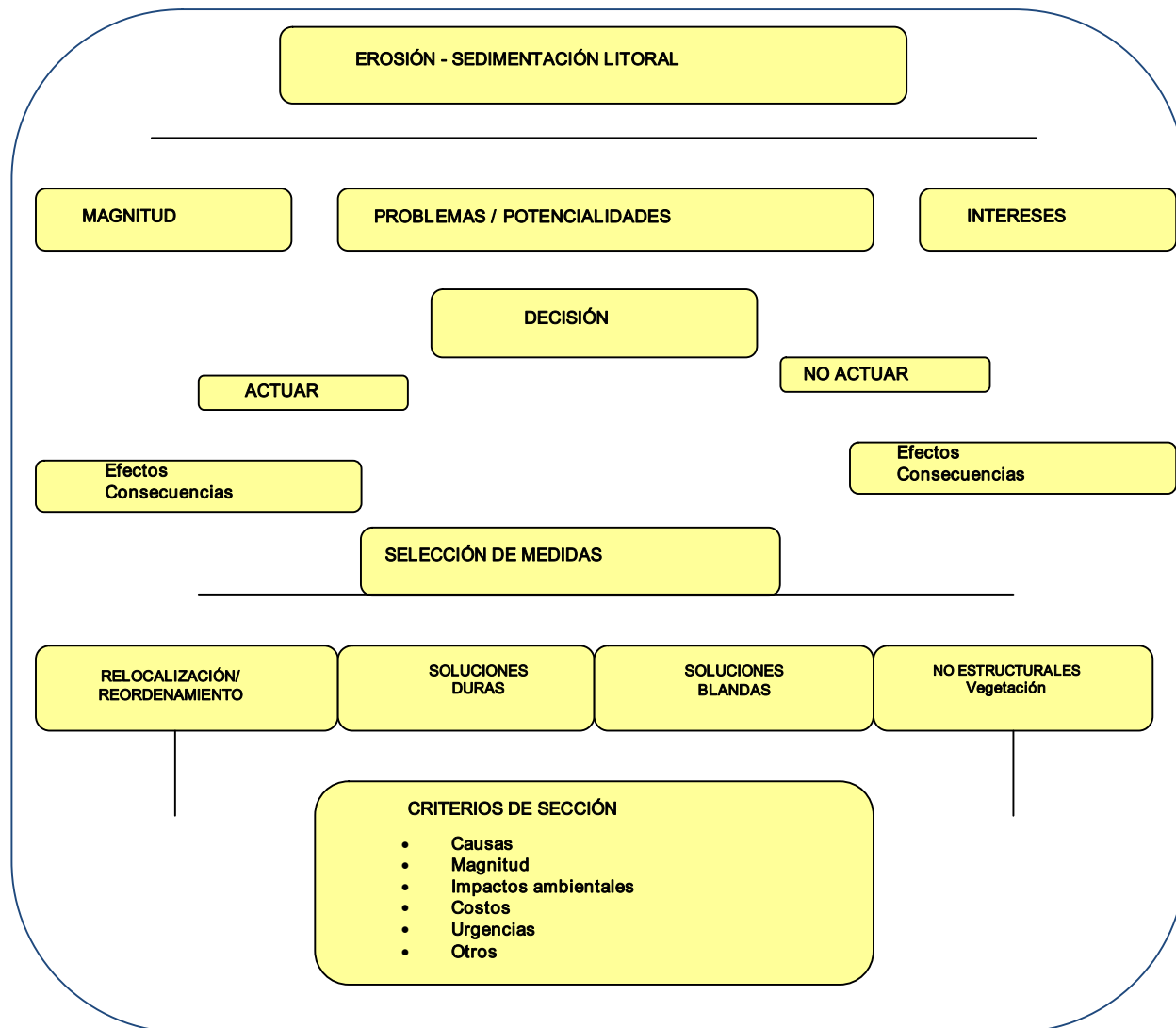


Figura 41. Esquema metodológico para abordar los trabajos de protección de costa.

Seleccionar la mejor solución ingenieril y ambiental, a los problemas específicos de la erosión requiere del entendiendo de los procesos costeros que tienen lugar en las costas y una clara definición de problema y las causas que lo generan. Solo así se podrán sugerir las mejores alternativas para resolver los problemas de la erosión en las costas.

4.1. Posibles soluciones técnicas y modelos numéricos predictivos

En el este acápite se hacen una valoración de las soluciones técnicas que son posible llevar a cabo en playa El Espino para enfrentar los problemas de la erosión. Se refieren las bondades e inconveniencias de cada una de ella y se definen los modelos numéricos predictivos a utilizar.

4.1.1. Espigones

Los espigones son estructuras que se colocan de manera perpendicular a la costa. Su función es interceptar los sedimentos que se mueven paralelo a la línea de costa. Por eso su efectividad depende, en primera instancia, de la existencia de un transporte de arena conocido en magnitud y dirección.

En cuanto a su forma, pueden ser totalmente rectos, curvos, en forma de una T o en ele. En cuanto a los materiales que los componen pueden ser de rocas, hormigón, madera, tablestaca, fibras textiles, entre otros. En cuanto a la cantidad de arena que retienen pueden ser permeables e impermeables.

La construcción de un espigón provoca acumulación en un lado y erosión en el lado contrario. Ambos efectos dependen de la orientación, longitud, altura, permeabilidad y espaciamiento de la estructura. Como consecuencia de esta particularidad, la playa termina convertida en un campo de espigones y un comportamiento diferencial de la playa ahora encajonados a ambos lados (Figura 42).



Figura 42. Campo de espigones en La Guardia, Isla Margarita, imagen Google Earth

Debido a este comportamiento, al lado erosivo del espigón requiere ser protegido con revestimientos. Muchas veces, las fuertes corrientes de resaca que se forman asociadas a estas estructuras, terminan por erosionar la arena contenida por los mismos y se requiere de

permanentes trabajos de alimentación artificial de arena. Por ello, la construcción de espigones suelen ser alternativas poco viables y sólo se justifican al final de la celda litoral, luego de precisos estudios del funcionamiento del sistema costera o para proteger la entrada de marinas y puertos.

Modelo predictivo de respuesta de la línea de costa con el empleo de espigones

El comportamiento de los procesos de erosión y sedimentación pueden ser estimados utilizados modelados numéricos. A continuación se refiere el modelo predictivo propuesto por Pelnard-Considere (1956).

$$y = 2\sqrt{\varepsilon t} \tan(\alpha_b) \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right)^2 \right] - \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right) \right\} \quad \text{para } t < t_f$$

Donde:

t_f -es el tiempo final antes de que ocurra el bypassing [s]

$$t_f = \frac{Y^2 \pi}{4\varepsilon \tan^2(\alpha_b)}$$

Y-Longitud de la estructura. [m]

$\operatorname{erfc} ()$ -es la función del error complementario

Que se define como:

$$\begin{aligned} \operatorname{erfc} () &= 1 - \operatorname{erf} () \\ \operatorname{erf} () &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz \end{aligned}$$

Puede ser expresada también como:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{(2n+1)n!} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{10} - \frac{x^7}{42} + \frac{x^9}{216} - \dots \right)$$

Las condiciones de borde para esta ecuación son:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{dy}{dx} \\ X &= \infty \\ y &= 0 \end{aligned}$$

Estas condiciones son para todos los tiempos.

La condición inicial para esta solución es $y=0$ para un $t=0$ y en donde no ocurre el bypass.

Pelnard-Considère (1956) obtuvo una segunda solución para cuando el tiempo fuera mayor que el t_f , es decir para cuando ocurriera el bypassing de forma natural. Las condiciones de borde para esta solución son:

$$y=Y, x=0, x=\infty$$

Estas son para todos los tiempos mayores que cero ($t>0$).

La solución para estas condiciones específicas de borde es:

$$y = Y^* \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon * t_2}} \right), \quad t > t_f$$

Donde:

$$t_2 = t - 0.38 * t_f$$

t-Tiempo inicial a partir de que la estructura comienza a traspasar arena.

Ventajas y desventajas del empleo de los espigones

Como toda solución de ingeniería, los espigones tienen desventajas en su empleo que deben ser tenidas muy en cuenta. A continuación se refieren sus ventajas y desventajas a partir de consideraciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

Ventajas	Desventajas
1. Los espigones son efectivos para controlar la erosión debida al transporte de sedimentos a lo largo de la orilla.	1. Los espigones no son efectivos para impedir la perdida de arena hacia el fondo del mar
2. Se tiene mucha información sobre el comportamiento de los espigones en variadas condiciones ambientales	2. En los espigones se generan corrientes fuertes de agua a lo largo de sus francos produciéndose pérdida de sedimentos hacia el fondo del mar
3. Los espigones se construyen desde la playa hacia el mar siendo relativamente económico su construcción	3. Los espigones generan erosión en las playa vecinas al impedir el paso de sedimentos a lo largo de la orilla
4. Los espigones no cambian las condiciones de la zona de rompimiento de las olas. La altura de la ola luego de contruidos los espigones prácticamente no cambia	4. No existe suficiente claridad sobre la filosofía de diseño. Si deben ser largos o cortos, altos o bajos, permeables o impermeables
5. Los espigones pueden construirse con muchos tipos de materiales diferentes (roca, pilotes, tablestaca, gaviones, bolsacretos, etc).	
6. Los espigones permiten ajustar sus dimensiones después de contruidos para ajustarlos a los efectos generados	

Tabla 5. Ventajas y desventajas del empleo de espigones

Teniendo en cuenta que en Playa El Espino y las costas salvadoreñas en general, se producen fuertes corrientes de resaca, no resulta recomendable el uso de espigones pues incrementarían la magnitud de estas corrientes y la pérdida de arena en dirección al mar.

4.1.2 Diques rompeolas

Los diques rompeolas son estructuras que se construyen alejadas de la playa, paralelas a la orilla y cuyo objetivo es la retención de la arena en la playa y reducir la altura y energía de las olas. Al reducir la energía de la ola, facilita la acumulación de arena entre la estructura y la playa. El resultado final es una playa con un saliente hacia al mar localizados frente al rompeolas.

Pueden construirse individualmente o como unidades espaciadas, unas a continuación de otras. En un sistema de rompeolas la distancia entre segmentos, la longitud de los segmentos y la distancia a la orilla juegan un papel muy importante. Un sólo rompeolas, generalmente tiene muy poco efecto sobre la playa, a menos que sea de gran longitud, por lo que se acostumbra a construir un sistema de varios rompeolas espaciados unos de otros (Figura 43).

La forma definitiva de la orilla depende de la localización, longitud y espaciamiento de los rompeolas; la dirección longitud y altura de las olas, y la cantidad de arena disponible. Pueden ser construidos por encima del nivel del mar, semisumergidos y totalmente sumergidos. Su altura determina la energía de ola disipada, la cantidad de arena acumulada y la formación de tómbolos.

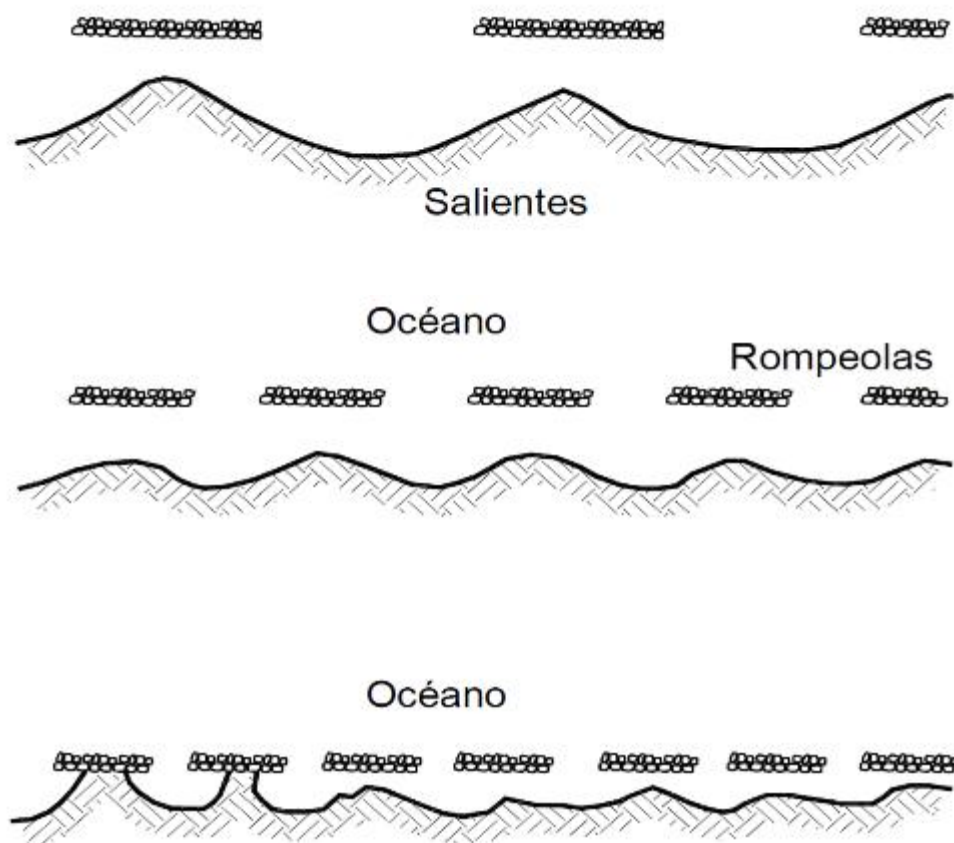


Figura 43. Espaciamientos y longitudes de rompeolas y su efecto sobre la playa
Fuente: Shore Protection Projects (2001)

Modelo predictivo de respuesta de la línea de costa con el empleo de rompeolas

En la literatura se pueden encontrar diferentes criterios para determinar la respuesta de la línea de costa ante la presencia de los elementos antes mencionados. Dally y Pope 1986), propusieron la siguiente ecuación:

$$Is = e^{\left(1.72 - 0.41 \frac{Ls}{Y}\right)}$$

Donde:

Is: Índice de la playa [-]

Ls: Longitud de la ola [m]

Y: Distancia desde la costa hasta el elemento [m]

El valor que se obtenga mediante el uso de esta ecuación determina la respuesta de la playa al rompeolas. A continuación se refiere las cinco posible condiciones según CEM (2001).

Para $Is < 2$ Formación de tómbolos

Para $2 < Is < 3$ Tómbolos periódicos

Para $3 < Is < 4$ Salientes bien desarrollados

Para $4 < Is < 5$ Formación de salientes

Para $Is > 5$ Sin sinuosidad

Ventajas y desventajas del empleo de los diques rompeolas

A continuación se refieren sus ventajas y desventajas del empleo de los rompeolas a partir de consideraciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

Ventajas	Desventajas
1. Los rompeolas son efectivos para controlar tanto la erosión por transporte a lo largo de la orilla, como el transporte de arena hacia el fondo del mar	1. Pueden ser costosos porque se requiere construirlos en la mitad del mar.
2. Los rompeolas son muy efectivos para estabilizar líneas de playa proteger estructuras junto a la orilla	2. Afectan significativamente las características de la zona de rompimiento de las olas y pueden restringir la práctica de algunos deportes como surfing y el baño en la vecindad de las estructuras
3. Pueden diseñarse sumergidos para que no afecten el paisaje	3. Constituyen un peligro serio para la navegación
4. Pueden diseñarse permitiendo el paso de arena y controlar la tasa de paso de sedimentos	4. Constituyen peligro para los nadadores
5. Pueden construirse de roca, bloques y materiales relativamente económicos	5. Pueden disminuir la calidad del agua si dificultan la circulación del agua entre las estructuras y la playa
6. Pueden diseñarse para airear y mejorar la calidad del agua junto a la orilla	6. Pueden conectarse con la playa formando tómbolos, los cuales afectan la configuración de la línea de costa y erosión en zonas vecinas.
7. Existe mucha experiencia en el uso de los rompeolas	
8. Reducen significativamente la altura de la ola junto a la playa	

Tablas 6. Ventajas y desventajas del empleo de los rompeolas

Esta es una solución que podría ser utilizando en la estabilización de la línea de costa en los sitios de mayor erosión en playa El Espino, debiéndose elegir con mucho cuidado el tipo de material para su construcción. Una solución económica podría ser utilizar troncos de cocoteros colocados en forma de una tablestaca, detrás de la actual zona de rompiente.

4.1.3. Obras de protección del borde litoral

Los revestimientos, muros y malecones, se encuentran entre las estructuras de protección del borde litoral más frecuentemente utilizadas. Estas son soluciones que ayudan a proteger las áreas e instalaciones que se encuentran sobre las playas y zonas detrás de ellas, pero no representan protección alguna para la playa, sino todo lo contrario. Su colocación afecta el funcionamiento natural de la playa y favorece la aparición de los procesos erosivos y la intensificación de los ya existentes.

Numerosas estructuras ha sido diseñada y creadas para la protección de los edificios, instalaciones y propiedades contra la acción del mar. Bolsas geotextiles, gaviones, roca, y estructuras prefabricadas son las soluciones más aplicadas. A continuación se refieren algunos de ellos.

Estructuras geotextiles

Resultan muy variadas, desde pequeños sacos a bolsas alargadas de gran tamaño manufacturadas con geotextil de alta resistencia, rellenas de arena o de piedra. Estos tubos deben resistir abrasión, desgarre y punzonamiento.

El tamaño de las bolsas de varios metros de ancho y de grandes longitudes las convierte en estructuras de gran peso que no son fácilmente removidas por las fuerzas del oleaje y su flexibilidad les permite adaptarse a las características específicas del área.

Colchones de bloques articulados de concreto

Los colchones de bloques articulados de concreto son estructuras de gran área que resisten las fuerzas del oleaje y protegen las áreas arriba de la orilla de la erosión marina. Estos colchones consisten en bloques prefabricados de concreto de altura entre 10 y 30 centímetros amarrados entre sí por medio de cables de poliéster. Estos colchones se colocan sobre una capa de piedra de aproximadamente 30 centímetros de espesor, la cual descansa sobre un geotextil de alta resistencia. La capa de piedra tiene por objeto ayudar al drenaje y garantizar una cimentación estable y uniforme para el colchón.

Enrocados

La protección utilizando enrocados es tal vez la más antigua. Los enrocados son bloque de roca de gran tamaño, los cuales se colocan sobre mantos de geotextil cubriendo el área de orilla que se requiere proteger. El tamaño y calidad de la roca utilizada, el espesor del manto de enrocado y la pendiente son los factores a determinar en el diseño.

Elementos de concreto

Son bloques o elementos de concreto simple o armado cuya forma facilita el entrelace entre los elementos y permiten acumular fuerzas que resistan el embate del oleaje. De estos elementos los más utilizados son tribar, los dolos, los tetrápodos, hexápodos y cubos. También pueden ser bolsas de geotextil que se rellenan de concreto o mortero.

Ventajas y desventajas del empleo de muros, revestimientos y malecones

Los revestimientos, muros y malecones son estructuras que ayudan a proteger las instalaciones interiores, edificios y propiedades contra los agentes del mar, pero no son obras que contribuyan a solucionar la pérdida de arena en las playas. A continuación se refieren sus ventajas y desventajas del empleo de estas obras (tabla 7).

Ventajas	Desventajas
1. Permiten la protección efectiva de las instalaciones interiores, edificios y propiedades contra los agentes del mar	1. Afectan el funcionamiento natural de la playa
2. Resultan muy fácil de construir y existe una amplia gama de materiales para su construcción	2. Favorece la aparición de los procesos erosivos y la intensificación de los ya existente.
3. Existe mucha experiencia en el uso y construcción de las obras.	3. Se pierde el atractivo fundamental y la motivación del asentamiento en la playa.
4. Resultan relativamente poco costosos	4. Afectan significativamente las características del oleaje, provocando una fuerte reflexión.
	5. Afectan la configuración de la línea de costa y erosión en zonas vecinas.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de las obras de protección del borde litoral



Figura 44: Puede apreciarse la existencia de grandes escarpes en la parte posterior del muro derribado por las olas

Teniendo en cuenta las características de playa El Espino y el uso turístico de la misma, las estructuras de protección de borde (muros, revestimientos, malecones, etc.), no resultan una solución adecuada, pues tiende incrementar los procesos erosivos al incrementarse los procesos de turbulencia y con ello el arrastre de arena fuera de la playa. Luego de algún tiempo terminan destruidos y se convierten en un serio obstáculo para el disfrute de la playa (Figura 44).

Alimentación artificial de arena

La alimentación artificial de arena es uno de los métodos más comúnmente utilizado en la mitigación de la erosión en playas. Consiste en aportar sedimentos de granulometría igual o superior a los existentes en la playa, por lo que se requiere de la existencia de arena en cantidad y



calidad para ser utilizados en estos trabajos, además de su explotación a un costo razonable.

Se ha convertido en la solución más utilizada en los trabajos de regeneración de playa, pues los resultados se obtienen de manera inmediata, los impactos son mínimos y transitorios y no introduce estructuras permanentes en la costa, lo que afecta considerablemente la calidad de los paisajes, entre otros perjuicios (Figura 45)

Figura 45 Trabajos de regeneración de playa Varadero, Cuba

Modelo predictivo de respuesta de la línea de costa al vertimiento artificial de arena

En la literatura se pueden encontrar diferentes modelos para determinar la respuesta de la playa a un vertimiento artificial de arena. El modelo de Brunn (1954) y Dean (1977) de perfil de equilibrio se ha convertido en el criterio más utilizado en los últimos tiempos. Ello se debe a que describe las características principales de los perfiles de equilibrio empleando un número mínimo de parámetros, hace una clara distinción de los factores que condicionan la forma del perfil y a partir de la función se han desarrollado numerosas aplicaciones para la ingeniería costera.

A continuación se refiere el modelo de Dean (1977), para determinar la cantidad de arena a verter en la playa para estabilizar la línea de costa.

$$h = Ay^{2/3}$$

Donde

h , profundidad

A , parámetro dimensional que depende de la granulometría de la arena

y , distancia de la costa

$$A = \left[\frac{24 D_*}{5 \rho g^{2/3} \gamma^2} \right]^{2/3}$$

Los valores de A están tabulados en la tabla III-3-3 del capítulo 3 (*Cross-Shore Sediment Transport Processes*), del manual de ingeniería de costas del cuerpo de ingeniero del ejército de los Estados Unidos

Para determinar si el perfil es interceptado ó no se obtuvieron las siguiente desigualdades

$$W \left(\frac{A_N}{Dc} \right)^{1/n} + \left(\frac{A_N}{A_F} \right)^{1/n} < 1, \text{ los perfiles se interceptan}$$

$$W \left(\frac{A_N}{Dc} \right)^{1/n} + \left(\frac{A_N}{A_F} \right)^{1/n} > 1, \text{ los perfiles no se interceptan}$$

Donde

A_N , parámetro A de la arena nativa

A_F , parámetro A de la arena de préstamo

Para determinar el volumen (V) de arena que se requiere verter en la playa para lograr un ancho de berma determinado, se utilizan las ecuaciones siguientes, en dependencia de la condición de intercepción del perfil (tabla 8).

Tipo de Perfil	Volumen
Sumergido	$V = \frac{3}{5} \left(\frac{Dc}{A_F} \right)^{5/2} (A_N - A_F) \quad (4.15)$
No Interceptado	$V = BW + \frac{3}{5} \left(\frac{Dc}{A_F} \right)^{5/2} \left(A_N \left[1 + W \left(\frac{A_F}{Dc} \right)^{3/2} \right]^{5/3} - A_F \right) \quad (4.16)$
Interceptado	$V = BW + \left(\frac{\frac{3}{5} W^{5/3} A_N A_F}{\left(A_F^{3/2} - A_N^{3/2} \right)^{2/3}} \right) \quad (4.17)$

Tabla 8. Relación del volumen según tipo de perfiles

Donde:

W , ancho de la berma deseado en el momento de la colocación

B , altura de la berma

Dc , profundidad de cierre del perfil

Ventajas y desventajas del empleo de la alimentación artificial de arena

La alimentación artificial de arena se ha convertido prácticamente en la única solución para enfrentar los problemas de regresión de playas en el mundo. A continuación se refieren sus ventajas y desventajas del empleo de estas obras (tabla 9).

Teniendo en cuenta que estos trabajos resultan costosos, no se justifica económicamente llevar a cabo estos trabajos en playa El Espino.

Ventajas	Desventajas
1. Incorpora los volúmenes de arena que la playa requiere en función de un ancho de berma deseado	1. Requiere de arena de características granulométricas similares y en cantidades suficientes
2. Los resultados se obtienen de la manera inmediata	2. Los trabajos resultan costosos
3. No introduce elementos ajenos al medio	
4. No se producen afectaciones negativas al paisaje	
5. Los impactos son mínimos y transitorios	

Tabla 9. Ventajas y desventajas de la alimentación artificial de arena

4.1.4. Relocalización de instalaciones y reordenación litoral

La relocalización de las instalaciones, infraestructuras y viviendas, tiene como objetivo fundamental reducir los daños causados por las tormentas, mareas, oleajes y la erosión, e inducir la mejor ubicación de las actividades económicas y sociales, infraestructuras y equipamientos con relación al aprovechamiento racional de los recursos naturales y la zona costera en su conjunto.

Si bien debe ser la última alternativa a aplicar para el control de la erosión, ante los graves problemas de erosión que sufren algunas playas, la relocalización de las instalaciones a veces constituye la única opción viable, aun cuando se apliquen otras alternativas ingenieriles.

El mantenimiento y reconstrucción de instalaciones destruidas o dañados cada año por el mar y la erosión, es una opción cuestionable económica y ambientalmente. La relocalización de las instalaciones y el reordenamiento del espacio litoral, además de ser una alternativa adecuada para mitigar la erosión, es una opción viable para promover un desarrollo económico sustentable que satisfaga las necesidades reales de la población presente y futura.

Con su aplicación es posible reducir la vulnerabilidad y riesgo de los pobladores, incluyendo la pérdida de vidas humanas, y reducir los pagos de seguro por daños por inundaciones, los costos por evacuaciones de emergencia, salud pública, pérdida de propiedades e inmuebles. Esto permite asignar las tierras bajo nuevos usos, que incluyan el desarrollo de áreas naturales, santuarios de aves, especies marinas y otros usos, considerando los altos valores naturales y fragilidad del ecosistema, que puedan generar igualmente ingresos.

Esta alternativa debe ir aparejada al establecimiento de un límite mínimo de construcción en la zona costera que considere los ritmos de erosión anual de cada sitio y del cambio de viejos estilos constructivos y prácticas de construcción que nada favorecen el funcionamiento de estos ecosistemas. Asimismo debe ir aparejado a la creación del marco legal e institucional que garantice su cumplimiento.

Ventajas y desventajas de la relocalización y reordenamiento litoral

A continuación se refieren sus ventajas y desventajas del empleo de la relocalización y reordenamiento litoral a partir de algunas experiencias en Estados Unidos, España y Cuba (tabla 10).

Ventajas	Desventajas
1. Reduce la vulnerabilidad y riesgos de los pobladores, incluyendo la pérdida de vidas humanas.	1. Genera cambios en los estilos de vidas.
2. Reduce los costos por evacuaciones de emergencia, salud pública, pérdida de propiedades e inmuebles.	2. Reduce los niveles de ingreso de los pobladores a corto plazo.
3. Asegura el mejoramiento ambiental de los ecosistemas.	3. Puede generar pérdidas de tradiciones culturales.
4. Permite el rescate de ambientes naturales que de otro modo se perderían.	4. Se requiere del uso combinados de otras soluciones.
5. No introduce elementos ajenos al medio.	
6. Permite hacer un mejor uso de los suelos y el aprovechamiento racional de los recursos naturales.	

Tabla 10. Ventajas y desventajas de la relocalización y reordenamiento litoral

Teniendo en cuenta que la erosión en playa El Espino se debe, en buena medida, a la ocupación de la playa con la construcción de viviendas y muros que han aumentado la magnitud de los procesos de erosión, al impedir que la energía de la ola se disipe, las tipologías constructivas utilizadas y el poco ancho de la barra en las zonas más urbanizadas, este debe ser una de las alternativas a llevar a cabo.

4.1.5. Reforestación o revegetación

El uso de vegetación es la manera más común y económica de retener la arena en la playa. La función principal de la vegetación es la de capturar los sedimentos más finos que son transportados por las olas y el viento, y contribuir a la formación de dunas.

Las dunas tienen dos funciones muy importantes en los procesos costeros. Primero evitan la inundación por el mar de los territorios interiores durante las tormentas y segundo constituyen una reserva de arena para alimentar a la playa cuando es erosionada.

Como respuesta a los oleajes de tormenta, la playa disminuye su ancho al perder parte de la arena contenida en la berma y dunas. Este material se deposita en la pendiente submarina, en forma de barra, que hace que las olas rompan más lejos de la playa y pierdan parte de su energía.

La existencia de dunas en la playa, reduce la cantidad de arena que la playa pierde, al aportarle arena para la formación de barras. Luego con olas más suaves la arena retorna lentamente a la parte emergida de la playa.

Para el uso de esta técnica en las playas, en un inicio se plantan hierbas y rastreras que toleren alta salinidad, luego vegetación de mayor porte, preferentemente arbustos.

El bejuco de playa (*Ipomoea pes caprae*) es la vegetación rastrera, más común encontrada en las playas de El Salvador. Ella crece muy rápidamente y es posible reproducirla, mediante siembra directa, colectando los rejos que están apoyados en la arena y tienen raíz.

En la zona intermareal se pueden sembrar especies de mangle. La primera especie a sembrar es el mangle prieto (*Avicennia germinans*), seguido de mangle blanco (*Laguncularia racemosa*). Una vez que estas dos especies están establecidas se procede a la siembra del mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Junto con ello se pueden sembrar algunas hierbas que toleren la salinidad, preferiblemente especies encontradas en la zona.

Ventajas y desventajas del empleo de vegetación

El uso de vegetación para estabilizar playas se ha convertido en una técnica muy efectiva sobre todo en costas donde la energía de la ola no es grade y la erosión no tiene valores dramáticos. A continuación se refieren sus ventajas y desventajas del empleo de esta técnica a partir de algunas experiencias en Estados Unidos y Cuba (tabla 11).

Ventajas		Desventajas	
1. Los trabajos resultan poco costosos	5. Es un proceso que puede resultar lento.		
2. Pueden ser realizados por personas de la comunidad	6. Se requiere de la existencia de viveros y bancos de semillas.		
3. No introduce elementos ajenos al medio	7. A veces se requiere del uso combinados de otras soluciones		
4. No se producen afectaciones negativas al paisaje			

Tabla 11. Ventajas y desventajas de la alimentación artificial de arena

Teniendo en cuenta las causas y magnitud de la erosión en playa EL Espino esta es una de las técnicas que debe emplearse en la mitigación de los procesos erosivos que están teniendo lugar allí.

4.2. Actuaciones a llevar a cabo

Si bien la información que se dispone hoy no es suficiente para promover la construcción de obras ingenieriles para mitigar los procesos de erosión que tienen lugar en El Espino, la magnitud de la erosión que tiene lugar allí y las causas, no permiten esperar para la ejecución de las primeras acciones.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada una de las posibles alternativas a llevar a cabo para el control de la erosión en las costas y en función de la información que se dispone se propone llevar a cabo las siguientes actuaciones.

4.2.1. Reforestación o revegetación

Como fue explicado con anterioridad, el uso de vegetación es la manera más común y económica de retener la arena en la playa. La función principal de la vegetación es la de capturar los sedimentos más finos que son transportados por las olas y el viento, y contribuir a la formación de dunas.

Las especies a plantar y reproducir se relacionan a continuación:

Nombre común	Nombre científico	Propagación
Bejuco de playa	<i>Ipomoea pes caprae</i>	Semillas o siembra directa
Espartillo	<i>Jouvea pilosa</i>	Semillas o siembra directa
Hierba de costa	<i>Heliotropium curassavicum</i>	Semillas o siembra directa
Manzanilla de la muerte	<i>Hipponame mancinella</i>	Semillas o siembra directa
Carbón	<i>Mimosa tenuiflora</i>	Semillas
Mangle prieto o Isthate	<i>Avicennia germinans</i>	Semillas
Mangle blanco o Cincahuite	<i>Laguncularia racemosa</i>	Semillas
Mangle rojo o mangle	<i>Rhizophora mangle</i>	Semillas

Tabla 12: Especies a plantar y reproducir

Fuente: propia

En un inicio se plantan hierbas (Espartillo y Hierba de costa) y rastreras (Bejuco de playa) que toleren alta salinidad, luego vegetación de mayor porte. El bejuco de playa crece muy rápidamente y es posible reproducirla, mediante siembra directa, colectando los rejos que están apoyados en la arena y tienen raíz. Similar ocurre con el Espartillo y la Hierba de costa, aunque es menos tolerante que el Bejuco de playa.

En la zona de canales se deben sembrar especies de mangle. La primera especie a sembrar es el mangle prieto (*Avicennia germinans*), seguido de mangle blanco (*Laguncularia racemosa*). Una vez que estas dos especies están establecidas se procede a la siembra del mangle rojo (*Rhizophora mangle*). Junto con ello se pueden sembrar algunas hierbas.

4.2.2. Relocalización de instalaciones y reordenamiento litoral

Ante los graves problemas de erosión que sufre la playa El Espino, la relocalización de las instalaciones que se encuentran en primera línea de costa, a menos de 100 m del mar, referido al nivel medio del mar, debe ser una de las primeras acciones a llevar a cabo, muy particularmente en la zona del valle El Espino. Solo podrán mantenerse en esta área las instalaciones construidos sobre pilotes distantes a más de 60 m de la costa referido al nivel medio del mar.

Con esta acción se pretende aumentar el ancho de la playa, de manera tal que la ola pueda recorrer toda la playa sin chocar con obstáculos, lo que favorecerá la disipación su energía y la disminución de su potencial erosivo.

Inmediatamente después de eliminadas las instalaciones se procederá a la reforestación con las especies y conceptos manejados en el acápite anterior. La concepción es que con la ayuda de la vegetación y demás actuaciones que se proponen a continuación se logre contener la erosión de la playa en esta zona, lo que evitará la pérdida de la isla barra en un corto plazo de tiempo.

Como fue comentada en los acápites anteriores, con su aplicación es posible reducir la vulnerabilidad y riesgo de los pobladores, incluyendo la pérdida de vidas humanas y asignar las tierras bajo nuevos usos, que incluya el desarrollo de áreas naturales, santuarios de aves, especies marinas y otros usos, considerando los altos valores naturales y fragilidad del ecosistema, que puedan generar igualmente ingresos.

Deberán buscarse mecanismo de compensación de las personas asentadas allí, que incluyan la construcción de viviendas en áreas de menor riesgo e incentivos para el desarrollo de acciones dirigidas a la recuperación de la propia playa.

4.2.3. Colocación de diques rompeolas

Debido a la posibilidad de que con la ejecución de las dos alternativas anteriores no sea suficiente para contener los efectos de la erosión de la zona de playa, particularmente en aquellas zonas donde resulta crítica, se recomienda la colocación de diques rompeolas.

Para el diseño y colocación de estos se seguirán los criterios técnicos y modelos numéricos referidos anteriormente, debiéndose priorizar la construcción de diques semisumergidos. Una solución económica podría ser utilizar troncos de cocoteros colocados en forma de una tablestaca, detrás de la actual zona de rompiente. La otra solución sería el empleo de geotubos rellenos de arena, evitándose el uso de hormigón y rocas.

4.3. Creación y aplicación del marco legal e institucional

El análisis de la erosión en playa El Espino demostró que se deben fundamentalmente a causas antropogénicas por la asimilación de la playa sin tener en cuenta el funcionamiento de estos espacios y la extrapolación de estilos constructivos y prácticas de construcción que nada favorecen el funcionamiento de estos ecosistemas.

La intensificación o aparición de los procesos de erosión de la playa El Espino, como en otras playas de El Salvador, pudo haber sido evitado en alguna medida, de haber existido un marco legal e institucional regulatorio que priorice la protección ambiental y el uso racional de los recursos naturales y la reducción de la vulnerabilidad y riesgo de las comunidades en las zonas costeras.

La aplicación de las actuaciones referidas anteriormente será insuficiente si no van aparejadas con la creación y aplicación de medidas regulatorias. Este marco regulatorio debe contemplar, entre otros aspectos, los siguientes:

- Establecer una distancia mínima de construcción en las costas atendiendo a los ritmos anuales de retroceso.

- Promover el uso de construcciones sobre pilotes, teniendo en cuenta la cota máxima de inundación.
- Establecer un área de dominio público, de ancho variable, en función del tipo de costa donde no se autorizarán desarrollos, excepto aquellos que sean ligeros, desmontables y que no impliquen la ocupación permanente de la costa.
- Limitar el desarrollo de proyectos que impliquen alojamiento o habitación en la zona de inundación por las mareas vivas equinocciales y eventos hidrometeorológicos extremos.
- Establecer una franja de protección mínima de 30 m alrededor de los ríos, arroyos, esteros, quebradas y otros cursos de agua, e impulsar proyectos de reforestación para restituir los bosques en galerías.
- Evitar el uso de soluciones duras (espigones, rompeolas y muros) como alternativa para la protección de costa.
- Favorecer el uso de soluciones blandas y no estructurales en la playa y zonas costeras (alimentación artificial de arena, reforestación y relocalización de instalaciones).
- Regular la extracción de áridos (arenas, gravas y guijarros) en la cuencas hidrográficas que aporten sedimentos directamente a la costa. Establecer como requisito indispensable para las nuevas explotaciones haber rehabilitado las áreas minadas, incluyendo la restitución del bosque en galería.
- Promover que los desarrollos urbanos y turísticos se realicen en forma de cuña, desde los territorios interiores, garantizando a ambos lados áreas de amortiguamiento y conservación natural de los paisajes.
- Establecer como zonas de conservación, las áreas de anidación de tortuga y otras especies de importancia nacional, regional o internacional.
- Prohibir la circulación vehicular en las zonas de playa incluyendo el área de dominio público.
- Prohibir la eliminación de la vegetación natural en las áreas de dominio público, incluyendo las áreas de dunas.
- Prohibir las extracciones de arena en las zonas de playa. Sólo se autorizarán en la plataforma marina en zonas que no constituyen fuente de aporte natural de playas vecinas o para la recuperación o mejoramiento de la propia playa.
- Impulsar proyectos para recuperar la zona costera, de dominio público, que se establezca en función con el tipo de costa.

- Promover organizaciones conservacionistas comunitarias orientadas hacia la educación ambiental y el rescate ambiental de las playas, manglares y otros ecosistemas costeros degradados.
- Fomentar el desarrollo de proyectos de reforestación en las zonas de playas y manglares utilizando especies propias de estos ecosistemas.
- Prohibir la disposición de aguas servidas en las zonas de playas y en sitios donde las corrientes litorales la lleven a estas. Las disposiciones que se autoricen deben cumplir los requisitos de calidad establecidos en la normativa legal vigente.
- Contemplar dentro de nuevos proyectos de desarrollo que se autoricen los sistemas de recolección, disposición y tratamiento de las aguas servidas y de recolección y disposición de desechos sólidos.

5. CONCLUSIONES

Playa El Espino está localizada en una isla barra progradante constituida por sedimentos terrígenos finos, sometida a procesos erosivos con una magnitud de 2.77 m para los últimos 30 años y una tendencia a incrementarse.

Los estudios están basados en el análisis multitemporal de imágenes aéreas y satelitales, complementados con visitas al terrero, por lo que la magnitud de los procesos de erosión, pueden ser superiores a los identificados en las fotos e imágenes aéreas.

No se cuenta con una data suficiente de perfiles de playa u otros estudios que permitan obtener información más precisa sobre la magnitud de los procesos de erosión-sedimentación, ni sobre las posibles fuentes de aporte sedimentaria a la playa.

Los procesos de erosión que están teniendo lugar en la playa están determinados fundamentalmente por acciones antropogénicas. En ella se destaca la eliminación de la vegetación original de la playa y la construcción de instalaciones y viviendas sobre la zona activa de la playa, utilizando estilos constructivos que nada favorecen el funcionamiento morfodinámico de las playas.

La determinación de los corrientes litorales, a partir de las características del oleaje y el uso de indicadores geomorfológicos, demostraron la existencia de una deriva litoral neta en dirección Este-sureste, aunque bajo determinadas condiciones se produce un transporte en sentido inverso.

La magnitud y las causas de la erosión presentes en playa El Espino requieren necesariamente de la ejecución de medidas para contrarrestar los efectos de los procesos erosivos. De no ejecutarse las acciones que se proponen, la erosión se incrementará y provocará la fractura de la isla barra donde se encuentra la playa.

La información disponible en la actualidad no es suficiente para modelar el comportamiento de la introducción de obras ingenieriles (espigones y rompeolas) dirigidas a mitigar los efectos de la erosión en la zona.

Las ventajas y desventajas de las diferentes alternativas a utilizar para el control de la erosión en playa y la información disponible sobre la playa, evidenciaron que la alternativa más viable para contrarrestar los efectos de la erosión es mediante el empleo de vegetación con especies propias de estos ecosistemas, complementado con la relocalización de las viviendas e instalaciones existentes en primera línea de playa. Una vez ejecutadas estas acciones se podría apelar a la colocación de una batería de diques rompeolas semisumergidos y la alimentación artificial de arena.

La ejecución de cualquier actuación en playa El Espino debe ir acompañada de estudios previos que permitan conocer, con alto nivel de fiabilidad, el funcionamiento morfodinámico de la playa, los ciclos erosivos, la tasa de pérdida anual de sedimentos, las características del relieve del fondo, la dirección y velocidad de las corrientes litorales, entre otros aspectos (Tener en cuenta el seguimiento al comportamiento de la erosión ante las medidas implementadas, para corroborar su eficacia y aplicabilidad.).

La efectividad de las acciones que se proponen en el estudio, dependen de la creación y aplicación de un marco legal e institucional, que garantice el cumplimiento de las medidas regulatorias que se proponen en el informe.

6. RECOMENDACIONES

Ampliar el número de estaciones de la red de monitoreo de los procesos morfodinámicos del perfil de playa y realizar el monitoreo con una frecuencia trimestral, cumpliendo con el procedimiento tecnológico referido en el presente informe.

Llevar a cabo el estudio sedimentológico de la playa y de las corrientes litorales superficiales siguiendo el procedimiento establecido en el anexo 2 del informe.

Crear la base legal e institucional que garantice el uso y manejo de la zona costera, con una visión de desarrollo a largo plazo, que considere el crecimiento económico y la conservación ambiental de los ecosistemas.

Establecer un plan de reordenamiento de la zona costera que contenga zonas de conservación y amortiguamiento de las actividades económicas, e incluya el desarrollo de actividades recreativas, de bajo impacto en áreas naturales, que puedan generar ingresos.

Utilizar la vegetación como la principal alternativa para el control de los procesos erosivos presentes en playa, complementada con la relocalización de las viviendas e instalaciones existentes en primera línea de playa. Sólo después de ejecutadas estas acciones se debe apelar a la colocación de una batería de diques rompeolas semisumergidos o a la alimentación artificial de arena, incluso ambas.

Llevar a cabo los estudios previos necesarios, antes de introducir cualquier solución ingenieril de control de la erosión que fundamenten, con alto nivel de certeza, la necesidad de dichas soluciones y sus características.

7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo (1998). Estrategia para el Manejo de los Recursos Costeros y Marinos en América Latina y el Caribe. Washington, D.C.
- Bruun P. (1988). The Bruun Rule of Shore Erosion by Sea-Level Rise: A Discussion on Large-scale Two and Three Dimensional Usage. *Journal of Coastal Research*. P. 627-648; Charlottesville.
- Coastal Engineering Manual (2002): Engineering and Design. Department of the Army. Washington, D. C.
- Davis, W. M. (1902). *Elementary Physical Geography*. Ginn. New. York, 401 p.
- Derruau, M. (1970). *Geomorfología*. Ediciones Ariel, S. A. Barcelona, 442 p.
- Dietrich G. (1957). *General Oceanography*. John Wiley & Sons. U.S.A.
- Egorov, N. I. (1983). *Oceanografía Física*. V/O Vneshtorgizdat, Leningrado, 553 p.
- Galster R. W and M.L. Schwartz. (1990). Ediz Hook: A case History of Coastal Erosion and Rehabilitation. *Journal of Coastal Research*, p. 103-113, Florida.
- Guilcher A. (1957). *Morfología Litoral y Submarina*. Ediciones Omega S. A. Barcelona, 274 p.
- H.G.Guierloff-Emden ((1959) *La Costa de El Salvador*, Monografía Morfológica-Ocenográfica
- Hattersley, R.T and D.N. Foster (1968) *Problems of Beach Erosion and Some Solutions*. Australian Civil Engineering. Vol. 9. Sydney.
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change), 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment of Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Jacobsen, E. and Schwartz, M. L. (1981). The Use of Geomorphic Indicators to Determine the Direction of Net Shore Drift. *Shore and Beach*. p. 38-43.
- James, R. J. (2000). From Beaches to Beach Environments: Linking the Ecology, Human-Use and Management of Beaches In Australia. *Ocean & Coastal Management*; No. 43; p. 495-514
- Johnson, D. W. (1919). *Shore Processes and Shoreline Development*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 584 p.
- Komar, P.D. (1976). *Beach Profiles. Beach Processes and Sedimentations*. Pretice Hall. New Jersey.
- Madden J. D. (1978). Coastline Delineation by Aerial Photography. *The Australian Surveyor*, Vol. 29, No. 2; p. 76-82.
- Rodríguez R., et al. (1999). Proyecto Ejecutivo de Regeneración del Sector Costero Don Lino, Holguín. Grupo de Recursos Naturales, CITMA. Holguín. 31 h.
- Rodríguez R., et al. (2000). Proyecto Ejecutivo de Regeneración del Sector Costero Guardalavaca. CITMA, Holguín, 87 h.
- Rodríguez R., Córdova E, y J. Guarch (2001). Proyecto Técnico de Regeneración de Playa Pesquero Nuevo, Holguín. CESIGMA, 54 h.
- Rodríguez R., Córdova E, y J. Guarch (2002). Estudio de Factibilidad Técnico Ambiental para la Regeneración del Litoral de Corinthia, Holguín. CESIGMA, 42 h.
- Rodríguez R., Córdova E, y J. Guarch (2002). Proyecto Ejecutivo de Regeneración de Playa Los Bajos. CITMA, Holguín, 43 h.
- Rodríguez R., Córdova E, y A. Vega (2003). Proyecto Ejecutivo de Regeneración de Playa Estero Ciego. CITMA, Holguín, 54 h.
- Rodríguez R. (2004). Erosión. Algo Más Sobre Cayo Bariay. *Revista de Ciencia, Innovación y Desarrollo*. Volumen 9, No. 1, La Habana, p. 35-39.

Rodríguez R., y E. Córdova (2005). Efectividad de los Trabajos de Alimentación Artificial con Arenas Ejecutado en Playa Estero Ciego, entre 1997 y 1998. Revista de Ciencias Holguín, Año XI, No.3, septiembre. www.ciencias.holguin.cu

Rodríguez R., Córdova E. y R. Álvarez (2006). La Erosión en la Costa de la Ciudad de Gibara, Cuba. Revista de Ciencias Holguín, No. 1, Año XII, Marzo. www.ciencias.holguin.cu

Rodríguez R., y E. Córdova (2006). La Erosión en las Playas de la Región Nororiental de Cuba. Revista Geográfica No 139. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. México

Schwartz, M. L. (1967). The Bruun Theory of Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. The Journal of Geology, Vol. 75 No. 1, p. 76-92.

Schwartz M.L. (1971). The Multiple Causality of Barrier Islands. The Journal of Geology. Vol. 79, No.1. p. 91-94.

Schwartz M.L, Mahala J. and H. S. Bronson (1985). Net Shore-Drift Along the Pacific Coast of Washington State. Shore and Beach, p. 21-25.

Schwartz M.L, and B. D. Anderson. (1986). Coastal Geomorphology of Padre Island, Mexico. Shore and Beach, p. 22-29.

Schwartz M.L, et al. (1987). Geomorphology and Net Shore-Drift of the Pacific Coast of Washington. U:S Geological survey, Washington.

Schwartz M.L; Wallace R. S and E. E. Jacobsen. (1987). Net Shore-Drift in Puget Sound. Engineering Geology in Washington, Vol. II. Washington Division of Geology and Earth Resources, Bulletin 78.

Schwartz M.L; Fabbri P. and R. S. Wallace. (1987). Geomorphology of Dungeness Spi, Washington, USA. Journal of Coastal Research, p. 451-455, Charlottesville.

Schwartz, M. L., Juanes, J. L., Foyo, J., Garcia, G. (1991). Artificial Nourishment at Varadero Beach, Cuba. Proceeding. Coastal Sediments' 91. Seattle.

Schwartz M. L. (1996). Restoration of Washington State Park Beaches. Proceedings of the Fifteenth International Conference of Coastal Society, Seattle.

Shore Protection Manual (1984). Coastal Engineering Research Center. Department of the Army U.S.A.

Thornburry, W. D. (1960). Principios de Geomorfología. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, 627 p.

Titus, J. (2006). Sea-Level Rise, Effect. Encyclopedia of Coastal Science. Washington, [en prensa].

UNEP (2003). GEO: Global Environment Outlook 3. Pasado, Presente y Futuro. www.unep.org:80/geo/geo3/spanish/overview/012.htm

UNEP (2003). GEO: Global Environment Outlook 3. América Latina y el Caribe. Perspectiva del Medio Ambiente.

UNEP/ROLAC. GPA. (2003). Diagnosis of the Erosion Processes in the Caribbean Sandy Beaches" Executive Summary. Environmental Agency. Ministry of Science, Technology and Environment of Cuba. La Habana.

UNESCO (1987). CCOP/SOPAC-OIC Workshop on Coastal Processes in the South Pacific Island Nations. Intergovernmental Oceanographic Commission. Workshop Report No. 51.

Weerakkody U. (1988). Mapping Coastal Evolution in Sri Lanka using aerial photographs. ITC Journal, p. 188-195. The Netherlands.

Weerakkody U. (1993). Coastal Classification for Practical Applications. ITC Journal, p. 386-390. The Netherlands.

World Bank (1997). Environmental Department, Land, Water and Natural Habitat Division, 631 p.

8 ANEXOS

ANEXO 1: PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN Y MONITOREO

La ejecución de cualquier actuación en playa El Espino debe ir acompañada de estudios previos que permitan conocer, con alto nivel de fiabilidad, el funcionamiento morfodinámico del perfil de playa, los ciclos erosivos, la tendencia a corto y largo plazo, la magnitud de los procesos de erosión actuales, la tasa de pérdida anual de sedimentos, las características del relieve del fondo, la dirección y velocidad de las corrientes litorales, entre otros, incluyendo los componentes biológicos

Esto indudablemente requerirá de estudios específicos que den respuesta a estos aspectos. A continuación se presentan las consideraciones técnicas para llevar a cabo el monitoreo morfodinámicos del perfil de playa, el estudio de los sedimentos y dirección y velocidad de las corrientes litorales superficiales, que respondan a la mayoría de las interrogantes antes planteadas.

Monitoreo morfodinámico del perfil de playa

El monitoreo sistemático del perfil de playa aporta información valiosa sobre los ciclos erosivos, la tendencia a corto y largo plazo, la magnitud de los procesos de erosión actuales y la tasa de pérdida anual de sedimentos en la playa. Permitirá evaluar la efectividad de las actuaciones a llevar a cabo y la necesidad o no de llevar a cabo nuevas actuaciones.

Los perfiles que se encuentran en este momento en playa El Espino, no son representativos de los procesos morfodinámicos que ocurren allí. Solo hay cinco perfiles que están distantes a más de 1.5 km, que se monitorean con una frecuencia anual. Por ello es necesario densificar la red de monitoreo, con monumentos distantes apropiadamente a 500 m unos de otros, que sean representativos de los fenómenos que ocurren en los diferentes sectores de la playa y que cubran la playa en toda su extensión.

Para ello, se colocarán monumentos (mojones de lindero) de 0.20 x 0.20 m de ancho y 0.15 m de alto, enterrados 0.50 m en el suelo, que serán amarrados cartográficamente a la red geodésica nacional.

A continuación se especifica el método de trabajo y procedimiento tecnológico.

Método de trabajo

- Perfilación topobatómetrica georreferenciados perpendicular a la costa con frecuencia trimestral.
- Mediciones in situ en zona de tierra y mar (h de escarpes, h de acantilados, dimensiones de elementos geomorfológicos, otros de interés).
- Observación visual.
- Registro fotográfico.

Procedimiento técnico

- Los perfiles de playa se realizarán con un teodolito taquimétrico o una estación total donde su error en la comprobación del ángulo de inclinación no sobrepase los 5 mm.
- Los perfiles se realizarán a través del replanteo del perfil inicial y la diferencia entre sus piquetes no deben sobrepasar los 4 m y deberán registrar cualquier cambio del relieve o profundidad en la zona de baño.
- La longitud de los perfiles está en función de las profundidades referidas al nivel medio del mar. Debe tratarse de llegar hasta la profundidad de 1.50 m.
- Los perfiles deben ejecutarse en bajamar como condición óptima de la observación.
- La altura del instrumento se tomará con un bastón de centrado o cinta métrica.
- Al comienzo de las observaciones deben tomarse las condiciones meteorológicas.
- Se tomarán además los valores de la profundidad en los puntos donde la regla esté en el agua.
- Se anotará la hora y la fecha del día en se comienza a realizar el perfil.
- Se tomarán tres muestras de sedimentos en cada perfil, siempre que este lo permita (uno en la berma y dos en el agua). Se debe tener en cuenta que estas muestras deben ser representativas de la zona donde se tome dicha muestra.

Muestreo sedimentológico

El conocimiento de las características sedimentarias que componen la playa resulta esencial en la elección de cualquier alternativa ingenieril para el control de los procesos de erosión.

En playa El Espino sólo se ha realizado un muestreo de los sedimentos, en dos perfiles de playa que cubren la parte noroeste de la playa, para un total de 6 muestras. Esto resulta insuficiente para conocer las características sedimentarias en una playa que tiene 11.7 km de extensión.

Por ello es necesario llevar a cabo un estudio sedimentario detallado que permita conocer un alto grado de certeza las características granulométricas, su distribución espacial en la playa y su color y composición genética. Ello contribuirá a determinar las fuentes naturales de aporte de sedimentos a la playa y aportará información sobre el transporte sedimentario y la deriva litoral neta.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- El muestreo deberá ser realizado dos veces al año, uno coincidiendo con la época de lluvia y el otro en la época de seca.
- Las líneas de muestreo se harán coincidir con los monumentos colocados para medir las variaciones morfológicas el perfil de playa.
- En cada perfil serán tomadas seis muestreas, cuatro en la parte emergida y dos en la parte sumergida. Los puntos de muestreo serán: cara de la duna al mar, parte media de la berma, cara superior y cara inferior y luego en el agua, uno a 10 m de la costa y el otro a 30 m.
- Para el muestreo será retirada la capa de los dos primeros centímetros y se tomará una muestra de aproximadamente un (1) kg de peso, que será previamente numerada.
- El muestreo en el agua será realizado con un muestreador para evitar que se escapen las fracciones finas de la muestra.
- La granulometría y el peso específico serán determinados por el método de ensayo estándar para el análisis del tamaño de las partículas de suelo y método de ensayo estándar para la determinación del peso específico de los suelos, según Normas ASTM D-422-98 y D-854-92, respectivamente.
- La composición mineralógica serán determinada mediante observación visual al microscopio estereoscópico, sobre la base del conteo de 200 granos.
- Para el análisis del color se introducirá la muestra en una scanner y se digitalizará a una resolución de 1200 ppp. Luego se comparará con muestras patrones previamente definidos.

Estudio de la corrientes litorales superficiales

La definición de la dirección y velocidad de las corrientes litorales son esenciales para comprender las particularidades del transporte sedimentario a lo largo de la costa. Ello requiere de instrumentos precisos que serán colocados en determinados sitios de la playa previamente definidos en función de los objetivos hacia los cuales se enfoque el estudio.

Al no disponerse de correntómetros o sondas para llevar a cabo estos estudios, es posible el uso de flotadores a la deriva. Ellos serán contruidos flotadores de madera en forma de cruz, con lados de 25 cm. Cada flotador será numerado y pintado con pintura amarilla o anaranjada fluorescente que permita su fácil identificación en el agua, bajo variadas condiciones meteorológicas.

A continuación se explica el procedimiento a seguir:

- Los flotadores serán lanzados a al agua en la parte posterior de la zona de rompiente.
- Mediante el método de intercepción directa con el uso de teodolitos o sistema de navegación satelital GPS será seguido los movimientos del flotador.

- Los periodos de lectura serán cada 15 min, por intervalos de 3 horas.
- En el momento de la colocación del flotado se tomará la hora y las condiciones meteorológicas presentes: dirección y velocidad del viento, dirección y altura de la ola, condiciones de la marea (paro de marea, bajamar, pleamar, llenante o vaciante).
- Los flotadores deben ser lanzados en varios sitios de la playa. Se recomienda hacer coincidir los puntos de lanzamiento con los monumentos de muestreo.
- El estudio deberá realizarse con sistematicidad y con variadas condiciones hidrodinámicas, tanto en la época de lluvia como en la época de seca.

ANEXO 2: LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA ORDENACIÓN DE LA ZONA COSTERA SALVADOREÑA

Objetivo:

Implementar una reglamentación de ocupación de la zona costera tendente a disminuir las amenazas y vulnerabilidad, y asegurar la protección de la zona costera y los ecosistemas, teniendo cuenta los usos de la zona costera.

Desarrollos urbanos y turísticos permanentes

- Establecer una distancia mínima de construcción en las costas, atendiendo a los ritmos anuales de retroceso. Para las costas de playa debe tener un ancho mínimo de 200 m, desde el nivel medio de la pleamar. En el caso de la presencia de dunas, a 20 m del pie de la duna a tierra de la cadena de duna mejor estabilizada por la vegetación, nunca a distancia inferiores a los 200 m. Para las costas rocosas bajas y acantiladas el ancho mínimo será de 50 m del borde rocoso o acantilado.
- Establecer un área de dominio público, de ancho variable, en función del tipo de costa donde no se autorizarán desarrollos, excepto aquellos que sean ligeros, desmontables y que no impliquen la ocupación permanente de la costa. Solo se autorizarán dentro de estas zonas la construcción de instalaciones que por su naturaleza no pueden tener otra ubicación tales como puertos, marinas, bases náuticas y similares.
- Prohibir la eliminación de la vegetación natural en las áreas de dominio público, incluyendo las áreas de dunas, independientemente de su ubicación.
- Limitar el desarrollo de proyectos que impliquen alojamiento o habitación en la zona de inundación por las mareas vivas equinocciales y eventos hidrometeorológicos extremos. En los casos que se utilicen deben ser sobre pilotes y tener en cuenta la cota máxima de inundación.
- Prohibir las extracciones de arena en las zonas de playa, dunas, barras y bocanas. Sólo se autorizarán en la plataforma marina en zonas que no constituyen fuente de aporte natural de playas vecinas, o para la recuperación o mejoramiento de la propia playa.
- Impulsar proyectos para recuperar la zona costera, de dominio público, que se establezca en función con el tipo de costa.
- Promover que los desarrollos urbanos y turísticos se realicen en forma de cuña, desde los territorios interiores, garantizando a ambos lados áreas de amortiguamiento y conservación natural de los paisajes.
- Prohibir terminantemente la intervención de pendientes igual o mayor al 35%.

- Contemplar dentro de nuevos proyectos de desarrollo que se autoricen los sistemas de recolección, disposición y tratamiento de las aguas servidas y de recolección y disposición de desechos sólidos.
- Prohibir la disposición de aguas servidas en las zonas de playas y en sitios donde las corrientes litorales la lleven a estas. Las disposiciones que se autoricen deben cumplir los requisitos de calidad establecidos en la normativa legal vigente.
- Establecer una franja de protección mínima de 50 m alrededor de los ríos, arroyos, esteros, quebradas y otros cursos de agua, e impulsar proyectos de reforestación para restituir los bosques en galerías.
- Promover organizaciones conservacionistas comunitarias orientadas hacia la educación ambiental y el rescate ambiental de las playas, manglares y otros ecosistemas costeros degradados.
- Fomentar el desarrollo de proyectos de reforestación en las zonas de playas y manglares utilizando especies propias de estos ecosistemas.

Turístico-recreacional

- Establecer un plan de manejo de las actividades recreacionales que se desarrollan en el área de playa.
- Unificar los criterios en el manejo de la permisología de la franja marino-costera.
- Asegurar un área mínima de 40 m desde el nivel medio de la pleamar libre de obstáculos que facilite el paseo y tránsito peatonal sobre la playa.
- Prohibir los desarrollos turísticos que impliquen la ocupación de toda la zona costera de manera intensiva.
- Asegurar que los desarrollos turísticos garanticen el libre acceso a las zonas de playa y la costa en general.
- Incentivar el rescate de áreas de valor patrimonial en áreas costeras (sistemas de fortificaciones históricas).
- Elaborar los planes de manejo y reglamento de uso del recurso playa de sol y baño.
- Implementar sistemas de información y divulgación permanente de la actividad turística.
- Establecer como zonas de conservación las áreas de anidación de tortuga y otras especies de importancia nacional, regional o internacional.
- Prohibir la circulación vehicular en las zonas de playa incluyendo el área de dominio público.

- Prohibir la eliminación de la vegetación natural en las áreas de dominio público, incluyendo las áreas de dunas.
- Prohibir las extracciones de arena en las zonas de playa. Sólo se autorizarán en la plataforma marina en zonas que no constituyen fuente de aporte natural de playas vecinas o para la recuperación o mejoramiento de la propia playa.

Uso pesquero

- Autorizar los desarrollos portuarios y la construcción de estructuras ingenieras conexas, previa realización de los estudios de impactos ambientales y en correspondencia con los resultados aportados por este.
- Establecer planes de manejo y reglamento de usos de la zona marino-costera para las comunidades pesqueras.
- Implementar planes de manejo y conservación de recursos pesqueros tendentes a consolidar y preservar los espacios para la actividad pesquera artesanal.
- Establecer un ancho mínimo de apertura de los sistemas de pesca de camarón y otras especies.

Uso agrícola

- Favorecer el desarrollo de prácticas de producción sostenible, con el uso de controladores biológicos y abonos orgánicos.
- Los desarrollos agrícolas que se autoricen no podrán eliminar la vegetación natural en la zona de dominio público, esteros, bosques de galería y dunas.

Uso minero

- Prohibir las extracciones de arena en las zonas de playa, dunas, barras y bocanas. Sólo se autorizarán en la plataforma marina en zonas que no constituyen fuente de aporte natural de playas vecinas, o para la recuperación o mejoramiento de la propia playa.
- Regular la extracción de áridos (arenas, gravas y guijarros) en la cuencas hidrográficas que aporten sedimentos directamente a la costa.
- Establecer como requisito indispensable para las nuevas explotaciones haber rehabilitado las áreas minadas, incluyendo la restitución del bosque en galería.

ANEXO 3. TÉRMINOS Y DEFINICIONES SOBRE COSTAS Y PLAYAS

A continuación se refieren los términos y definiciones más usados en el trabajo y las accesiones sobre la base de la cual fueron usadas.

Costa: Representa la zona de contacto entre el mar y la tierra emergida.

Línea de costa: Marca la posición del nivel del agua en cualquier tiempo dado y varía entre las posiciones de orilla de la pleamar y bajamar.

Zona costera: Para determinar sus límites generalmente los científicos apelan al resultado de la acción del fenómeno más típico que en ella se observa (El oleaje). Es espacio que comprende es muy variado, dependiendo de las consideraciones de cada país. En general hacia tierra se toma el espacio donde llegan las máximas mareas.

Playa: Forma acumulativa propia de algunos sectores de la zona costera, constituida por sedimentos específicos de diferentes granulometría y en diferentes proporciones con capacidad de ser removidos a trasladados por los agentes hidrometeorológicos.

Berma (Berm): Parte casi horizontal de la playa contigua a la zona frontal. En ocasiones se presenta como una serie de pequeñas terrazas sucesivas constituidas en distintos estados del mar. Sus sedimentos suelen ser ligeramente menos grueso que los que se encuentran en la zona frontal y ligeramente mayores que los que se encuentran en las dunas.

Su límite hacia tierra lo constituye el pie de la duna o escarpe en caso en que la duna no exista. En caso que ninguna de las dos exista entonces es hasta donde lleguen los últimos sedimentos constituyentes de la playa.

Cresta de la berma (Berm crest): Límite hacia el mar de la berma. Suele ser el punto más elevado, sobre todo después de las tormentas como consecuencia de la acumulación de arena producida por el trabajo de las olas. Parte más alta que pueden barrer las olas.

Zona frontal (Foreshore) o cara de la playa: Parte inclinada de la playa comprendida entre la berma y el nivel de la bajamar. Una parte de la zona frontal necesariamente permanece sumergida durante la pleamar y sobre la otra el agua se desliza en movimientos alternos de avance y retroceso según las olas.

Surco prelitoral (Long shore trough): Depresión nanofrmica que se extiende a lo largo de la línea de costa en la última zona de rompiente del oleaje y sus límites están dados por los niveles de pleamar y bajamar.

Barra prelitoral (Long shore bar): Franja alargada de arena paralela a la orilla o casi paralela que en ocasiones se puede descubrir durante el refluo de la marea y el oleaje.

Los geomorfológicos franceses refieren que las barras prelitorales (low) y los surcos prelitorales (full) son sucesiones de crestas y surcos cuyo desnivel raramente sobrepasa un metro de altura, paralelo o a menudo ligeramente oblicuo a la orilla.

Tómbolos (Tomboles): Formación emergida de arena que une a una isla o un escollo con el continente u otra isla. Su formación se explica por la refracción de las olas detrás de la isla o por el depósito de materiales en la unión de los dos trenes de olas, de las olas que encierran la isla.

Hemitómbolos (Hemitombolos): Formación sumergida de arena. No se une completamente con la tierra firme.

Cordón litoral o camellón de tormenta (Barrier): Acumulación alargada de sedimentos groseros (gravas, cantos, guijarros y restos orgánicos) arrojados por las olas durante las tormentas que se extiende paralelo a la costa. Pueden observarse en las playas después de los temporales aunque en ciertos lugares de la zona costera se consolidan formando elementos perennes.

Personas inexpertas suelen confundirlos este camellón con dunas, pero las características granulométricas no son las mismas, ni los procesos que la originan.

Festones (Cusp o beach cusp): Formas acumulativas nanofórmicas en forma de medialuna que se producen en las playas constituidas fundamentalmente por sedimentos finos y con un balance positivo, sus cuernos apuntan a la dirección predominante del oleaje. Se desarrollan preferentemente en las zonas sumergidas aunque pueden aparecer en la zona frontal.

Canal de la corriente de resaca (Rip channel): Surco perpendicular a la orilla cuyo ancho puede ser variable y que es resultado de la corriente mencionada.

Dunas: Formas acumulativas (cóncava) que suele ser el límite hacia tierra de la berma. Su formación se explica por una alimentación a arena a partir de la playa como consecuencia de fuertes vientos.

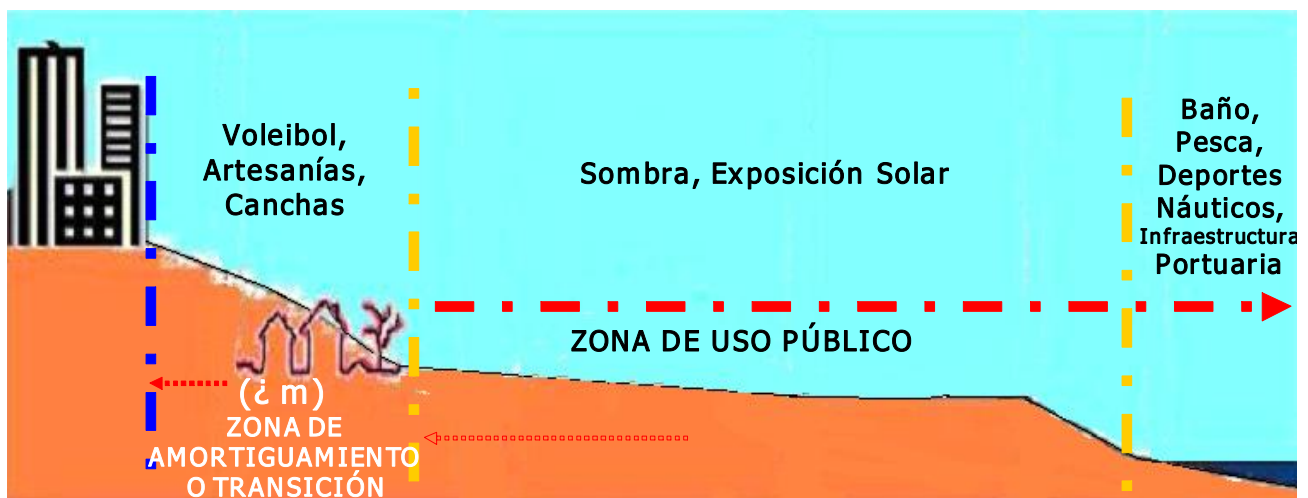
ANEXO 4. ELEMENTOS A TENER EN CUENTA EN EL USO Y MANEJO DE LAS PLAYAS



Elementos geomorfológicos del perfil de playa



Elementos funcionales del perfil de playa



Zonificación funcional de la playa atendiendo a los usos