



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Facultad de Filosofía y Letras
Colegio de Geografía

***“Variaciones estacionales en la línea de costa entre el
Canal de Cuautla y el Estero de San Cristóbal,
Nayarit”.***

T E S I S

Presentada por:

Mayra Cruz González

Para obtener el título de:

Licenciada en Geografía

Asesor:

Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez

Miembros del jurado:

Ocean. Raymundo Lecuanda Camacho

Dra. Rosalía Vidal Zepeda

Geóg. Andrés Fernando Benítez Omaña

Dr. José Ramón Hernández Santana

México D.F., 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

El análisis de los mecanismos de funcionamiento en la evolución de la línea de costa del frente deltaico Santiago-San Pedro permite elaborar una explicación preliminar sobre las probables consecuencias de la interacción entre la población y los ambientes costeros en el área de estudio. Para conocer la morfodinámica de la costa entre estaciones del año, en julio de 2010 y febrero de 2011 se levantaron perfiles de playa en 17 estaciones y para calcular la velocidad de desplazamiento de la franja costera en los últimos 41 años, se emplearon los métodos de transectos y de tasa de punto final. Se han registrado cifras alarmantes de retroceso a lo largo de la Playa Coyotes de hasta -17.2 m/a entre 1970 y 2011, mientras que al sur de la Playa del Rey la línea de costa ha registrado una cifra máxima de avance de hasta 15.7 m/a en el mismo período. Los impactos de fenómenos hidrometeorológicos con potencial destrucción de manglares, el cierre y apertura de bocas artificiales, y la propia fisiografía de cordones litorales son algunas de las probables causas de los cambios en la posición de la línea de costa en este sistema fluvio-deltaico. Sin el conocimiento de los mecanismos que afectan el sistema costero, es difícil atribuir el origen de las causas que están generando procesos de escala global, como el cambio climático, y es más complicado aún hacer predicciones sobre su evolución.

A mi madre y a mis hermanos Enrique, Adrián y Francisco.



Agradecimientos

La realización de ésta investigación se debe al esfuerzo académico y personal de varias personas interesadas en el desarrollo del conocimiento relacionado con los ambientes costeros. Especialmente, reconozco el invaluable apoyo del Mtro. Raymundo Lecuanda Camacho, investigador del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, formador y maestro de varias generaciones en el campo científico de Sedimentología y Oceanografía Física de ésta institución, partidario de la rigurosidad en la ciencia y generoso sembrador de conciencia crítica para una mejor comprensión de la realidad.

Quiero reconocer y agradecer también al Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez del Instituto de Geografía de la UNAM, su experiencia e interés en el conocimiento de los sistemas de humedales han sido recogidos en esta tesis. Su equipo de trabajo también colaboró de varias formas y para ellos mi agradecimiento: José Manuel Figueroa Maheng y Magdiel Barrios Rodríguez.

De la misma institución forman parte la Dra. Rosalía Vidal y el Dr. José Ramón Hernández Santana quienes con sus oportunas sugerencias y comentarios durante el proceso de revisión enriquecieron esta investigación; también agradezco al Mtro. Andrés Benítez Omaña de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM el apoyo mostrado desde un inicio y concretado al momento de ser miembro del jurado.

El trabajo en campo fue posible gracias al apoyo del Mtro. Manuel Blanco y Correa Magallanes, investigador de la Universidad Autónoma de Nayarit, quien facilitó los recursos físicos y humanos para trabajar en el área de estudio. Agradezco a su equipo integrado por Gabriela López Cano, Edwin Alberto Jacobo Sapien, Héctor Blanco Fuentes y Ricardo Blanco Fuentes, por la colaboración recibida en las campañas de trabajo *in situ*; y de manera especial al Mtro. Julio Gómez Gurrola, docente en la misma universidad por sus valiosos comentarios y por el apoyo brindado en campo.

La Dra. Martha Reguero Reza, el Dr. Sergio Licea Durán, el Mtro. Ranulfo Rodríguez, el Mtro. Carlos Illescas, el Dr. Artemio Gallegos y el Dr. Faustino Rodríguez del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, son académicos que también estuvieron involucrados con la realización de esta tesis, directa o indirectamente, también para ellos mi agradecimiento y reconocimiento.

Agradezco el apoyo brindado por la Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra de la UNAM que, por conducto del Lic. Saúl Armendariz, facilitó buena parte del material bibliográfico empleado en el proceso de investigación. Quedo agradecida también con las instituciones que me permitieron disponer del equipo e infraestructura necesaria durante la realización de esta tesis, el Instituto de Geografía y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

Mis amigos son muy importantes en cada momento de mi vida, saben cuánto aprecio tenerlos y les doy mi gratitud también.

Esta investigación fue financiada parcialmente con una beca y gastos de trabajo en campo por el CONACYT y el gobierno del Estado de Nayarit mediante el proyecto de Fondos Mixtos NAY-2008-C04-109589, titulado “Impacto y estrategias de mitigación del cambio climático en el Estado de Nayarit”; otro aporte financiero procedió del Programa Becas para la Educación Superior de la SEP en su modalidad de Titulación.

Tabla de contenidos

Resumen.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	1
I. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Sistemas costeros.....	4
1.2 Complejidad e imprecisiones en la terminología básica.....	5
1.3 Variaciones en la posición de la línea de costa.....	7
1.3.1 Velocidad y dirección de los cambios.....	9
1.3.2 Escalas de espacio y tiempo el análisis de la evolución de la línea de costa.....	10
1.4 Algunas causas y factores relacionados con su evolución.....	12
1.5 Fuentes de datos espaciales.....	13
1.6 Indicadores para la identificación de la línea de costa.....	16
1.6.1 Indicadores <i>heurísticos</i>	18
1.7 Técnicas de detección de su posición.....	22
1.8 Métodos de medición de cambios en la posición de la línea de costa.....	24
1.8.1 Método de tasa de regresión lineal.....	25
1.8.2 Método de tasa de punto final.....	26
1.8.3 Otros métodos estadísticos.....	26
1.9 Estudios previos en el área de estudio.....	27
II. ÁREA DE ESTUDIO.....	29
2.1 Características climáticas.....	31
2.2 Sistemas hidrográficos.....	34
2.3 Tipo de suelo y vegetación.....	35
2.4 Algunas variables de carácter oceanográfico.....	35
2.5 Evolución de la posición de la línea de costa en el Cuaternario reciente.....	36
2.6 Población e infraestructura.....	40
III. MÉTODOS.....	42
3.1 Levantamiento de perfiles transversales de playa.....	42
3.1.1 Levantamiento de perfiles en campo.....	43
3.1.2 Análisis de perfiles de playa con BPAT.....	47
3.2 Medición de cambios en la posición de la línea de costa.....	50
3.2.1 Compilación de datos.....	50
3.2.2 Identificación y detección de la posición de la línea de costa.....	53

3.2.3 Determinación areal y lineal del desplazamiento de la línea de costa.....	57
3.2.4 Método de <i>polígonos</i> y de <i>transectos</i>	57
3.2.5 Método de transectos y cálculo de tasas de cambio con DSAS.....	60
IV. RESULTADOS Y OBSERVACIONES	64
4.1 Evolución de la línea de costa durante las últimas cuatro décadas.....	64
4.1.1 Sector A: Canal de Cuautla — Boca Ensenada.....	65
4.1.2 Sector B: Boca Ensenada — Boca Camichín.....	70
4.1.3 Sector C: Boca Camichín — Boca Asadero.....	74
4.1.4 Sector D: Boca Asadero — Boca Cegada.....	78
4.1.5 Sector E: Boca Cegada — Boca El Vigía.....	83
4.1.6 Sector F: Boca El Vigía — Boca El Borrego.....	87
4.2 Cambios en la posición de la línea de costa	
en mesoescalas de tiempo (julio, 2010- febrero, 2011).....	97
4.2.1 El ancho de playa y el desplazamiento de la interplaya.....	102
4.2.2 El ancho de playa y la pendiente.....	102
4.2.3 El desplazamiento de la interplaya y la pendiente.....	103
4.2.4 Cambios en el volumen de sedimentos.....	105
4.2.5 Aspectos morfológicos de los perfiles de playa	106
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	108
5.1 Relación entre las tasas de cambio y los perfiles de playa.....	108
5.2 El papel de las bocas en la distribución del tipo de línea de costa.....	111
5.3 La naturaleza de las posibles causas en las variaciones de la línea de costa.....	113
5.4 Los segmentos de línea de costa de aparente estabilidad	
y el significado de “equilibrio”.....	118
5.5 Impactos derivados de las variaciones en la línea de costa.....	120
VI. CONCLUSIONES	121
Lista de referencias	123
Lista de tablas	
Lista de figuras	
Acrónimos	
<i>Anexo 1 Regionalización de la línea de costa considerando criterios geomórficos</i>	

INTRODUCCIÓN

Las líneas de costa son elementos del paisaje que forman parte de la compleja y difusa franja de transición entre los ecosistemas marino y continental, por lo tanto, están sometidas a los constantes cambios en el flujo de materia y energía entre ambos ambientes. La naturaleza de esa dinámica, registra en la actualidad, incrementos adicionales debido a los impactos derivados del cambio climático y sus diversos efectos en los sistemas terrestres; la magnitud y frecuencia de estos impactos varía de acuerdo a escalas espaciales y temporales (Burkett *et al.*, 2001; Ortiz, 1988).

De manera imprevista, los efectos locales derivados del impacto del cambio climático son reforzados por acciones antrópicas ejercidas en el área de estudio durante las últimas décadas. Estos procesos tienen una expresión en la organización espacial de las unidades del relieve y paisaje costero que puede ser apreciada en los cambios de la línea de costa (Galvano y Leatherman, 2005).

Curry y Moore (1963) reconstruyeron la historia del sistema paleodeltaico Santiago-San Pedro desde el Pleistoceno Superior hasta principios del siglo XX, encontraron que hace aproximadamente 18 000 a.C. la línea de costa se localizaba en el actual reborde de plataforma continental; este estudio permitió proponer a Ortiz (1979) el proceso de hundimiento diferencial debido a la subsidencia del continente como una posible causa del retroceso de la línea de costa registrado para ese período de tiempo.

A partir de fuentes de datos históricas, como mapas portulanos y cartas de navegación, realizadas durante la época colonial (siglos XVI y XIX), Curry *et al.* (1969) identificaron también otros cambios de distinta magnitud en la posición de la línea de costa que sugirieron, podrían haberse originado por procesos de origen natural como el cierre y apertura de bocas o los cambios en la trayectoria del curso de los ríos que desembocan en la costa, por mencionar algunos ejemplos.

Durante las últimas décadas del siglo XX se construyeron obras de ingeniería en el sector que incluye la costa del delta del río Grande de Santiago que muy probablemente también tengan efectos de grado no determinado en la expresión fisiográfica del relieve y, por lo tanto, en el emplazamiento espacial de la línea de costa, algunas de las obras incluyen presas en la cuenca del río Grande de Santiago, apertura o cierre artificial de bocas y también la construcción de escolleras y espigones a lo largo del sector costero objetivo de esta investigación.

De lo anterior cabe cuestionar en qué magnitud y expresión fisiográfica han cambiado los mecanismos de autorregulación del sistema deltaico Santiago-San Pedro tomando en cuenta los impactos derivados de las acciones del cambio global, entendiendo como cambio global los procesos de origen natural y antrópicos que tienen efectos en los distintos sistemas terrestres a escala planetaria (Rotmans y de Vries, 1997).

Planteamiento del problema de investigación, hipótesis y objetivos

El conocimiento de la evolución del sistema deltaico Santiago-San Pedro y el comportamiento de los mecanismos que intervienen en su estructura implica estudios complejos, costosos y requiere de series de datos que abarquen un amplio período de tiempo. La medición de las variaciones de la posición de la línea de costa es una forma sencilla e indirecta de obtener una primera aproximación, desde el punto de vista geomorfológico, a lo que podría considerarse en escalas de tiempo “humano”, su historia reciente. También aporta elementos de análisis para identificar algunas de las consecuencias derivadas de los procesos naturales y antrópicos que están interactuando, en la actualidad, en este sistema deltaico.

Ante este escenario, cabe preguntarse de manera específica: ¿Cuánto ha avanzado o ha retrocedido la posición de la línea de costa estudiada durante las últimas décadas? ¿Cómo es la expresión espacial de esos cambios y cuáles son los sectores que presentan desplazamiento en la posición de la línea de costa en un grado que pueda representar un peligro? ¿Qué dimensión tienen los factores de distinto origen que intervienen en los cambios temporales y espaciales de la posición de la línea de costa como elementos de análisis para estimar sus consecuencias?

Esta investigación toma como directriz una hipótesis que postula que la evolución de la línea de costa es resultado de las relaciones entre los diversos factores presentes en el sistema costero, por lo tanto, el análisis de sus mecanismos de funcionamiento permitirá elaborar una explicación preliminar sobre las probables consecuencias de la interacción entre la población y los ambientes costeros.

El objetivo general de este trabajo es analizar la evolución de la posición de la línea de costa durante las últimas décadas en función de los cambios en su configuración espacial.

Para llevar a cabo ese objetivo se proponen otros de carácter particular que llevan el siguiente orden:

- a) el análisis de la expresión espacial de los cambios en la posición de la línea de costa,
- b) el análisis de los cambios en los rasgos geomórficos del perfil de playa, y

- c) la evaluación de la pertinencia de los métodos empleados como medios para aproximarse al conocimiento de la evolución de la línea de costa.

Se considera que la obtención de estos datos brinda información básica e indispensable para la toma de decisiones en la implementación de políticas en el manejo y administración del espacio costero. La línea de costa es uno de los rasgos del relieve reconocidos por el International Geographic Data Committee (IGDC) como uno de los 27 rasgos más importantes por su alto valor para una comunidad diversa de usuarios (Li *et al.*, 2002), por lo tanto, la calificación y cuantificación de sus cambios puede brindar también elementos de análisis para otros fines en los sectores público y privado.

I.MARCO TEÓRICO

1.1 Sistemas costeros

En la actualidad existen diversos paradigmas científicos según los particulares puntos de vista de las ramas de la ciencia para tratar de explicar nuestra realidad física y abstracta, en particular, los geógrafos también han adoptado diversos enfoques para encontrar respuestas a las cuestiones que plantea la interacción entre la población y el ambiente.

El paradigma sistémico originalmente postulado por Bogdanov en 1912(Lakhan y Trenhaile, 1989), aporta un enfoque extrapolable que permite analizar los ambientes costeros en función de sus interrelaciones con otros ambientes a partir de diversas escalas de interacción, esto es sumamente útil cuando se trata de abordar problemas particulares para tratar de encontrar soluciones específicas, pues dependiendo del objetivo planteado en el estudio se puede adoptar una escala espacial y temporal determinada de análisis. Otra particularidad del enfoque sistémico es que se puede adoptar un punto de vista holista o reduccionista en el cual, independientemente del objetivo de análisis, los ambientes costeros alternan continuamente su jerarquía como sistemas, subsistemas o componentes del sistema.

Dado el contexto anterior, se reconoce que los ambientes costeros son sistemas físicos naturales con complejas relaciones entre los elementos de su estructura, con cambios en la entrada y salida de materia y energía que son los responsables de procesos como el transporte, erosión y depositación de sedimentos, cuya expresión fisiográfica en el relieve es sólo una de las tantas respuestas posibles de su condición como sistema. El desequilibrio en sus poblaciones animales y vegetales, en la salinización de sus suelos, y la pérdida y modificaciones en la cobertura de las comunidades vegetales como el manglar, son parte de las respuestas del sistema ante los cambios en su estructura interna.

Cada uno de los elementos interactuantes de la estructura u organización del sistema costero puede ser considerado como una variable o un factor desencadenante de procesos cuya singularidad o multiplicidad dará lugar a una respuesta y, por lo tanto, a la búsqueda de sus respectivos estados de equilibrio. Particularmente, en las costas arenosas los cambios en rasgos geomórficos como islas barrera, cordones de playa, flechas arenosas (*spits*), dunas, bermas, escalones de berma, por mencionar algunos, son la respuesta fisiográfica en el relieve a los diversos procesos operantes (Haslett, 2000). Por lo tanto, las variaciones en el ancho de playa y en su posición en la línea de costa son también una respuesta a la magnitud e intensidad con que operan los distintos factores presentes en cada playa.

Particularmente en el sistema deltaico Santiago-San Pedro, es difícil evaluar la magnitud e intensidad de los factores inherentes a este sistema, también es complicado predecir su evolución en las próximas décadas, pero los cambios en la posición de la línea de costa correspondiente al frente deltaico aportan evidencias de la actividad reciente que requieren ser cuantificados, al menos en forma preliminar.

1.2 Complejidad e imprecisiones en la terminología básica

Los términos *coastline* y *shoreline* son quizá los más frecuentes de encontrar en la literatura relacionada con costas pero su significado sigue presentando ambigüedades en su propio idioma: el inglés. Ambos términos son utilizados como sinónimos y se emplean indistintamente para definir al límite entre el mar y el continente, pero al considerar su variabilidad en el espacio y el tiempo, para efectos prácticos dicha definición resulta insuficiente. La cuestión se complica aún más al intentar traducirlos e introducirlos en la literatura geológica en español, pues no hay consenso general en su uso y significado, pero si confusión y descuido en su utilización.

Oertel (2005) señala que los términos *coastline* y *shoreline* refieren a una línea usada para designar la división entre el agua y la tierra, porque no sólo se utilizan cuando se habla de límites entre el mar y el continente, también son empleados cuando se delimitan cuerpos de agua interiores como lagos y lagunas. El primero suele utilizarse cuando el límite es determinado con mayor exactitud (generalmente, tomando como referencia un *datum* de marea, referencia vertical de la superficie del mar representada en un plano “estático” por métodos estadísticos y numéricos) mientras que el segundo se emplea cuando se requiere menor exactitud, tomando como referencia algún elemento físico o no como indicador aproximado de la posición de la línea de costa.

En otro sentido, Boak y Turner (2005) reconocen también la naturaleza de este límite en escalas espaciales y temporales para referirse al concepto *shoreline* no en un sentido linear sino como zona transicional al considerar a ésta como:

“...*the position of the land–water interface at one instant in time.*”

En esta definición, el atributo de intermitencia temporal le confiere un carácter de límite borroso, porque la posición del límite entre el mar y el continente generaría un número infinito de fronteras según las oscilaciones de su posición entre marea alta y marea baja (Nguyen *et al.*, 2008); es decir, a mayor amplitud en la zona intermareal habría mayor “borrosidad” en el límite.

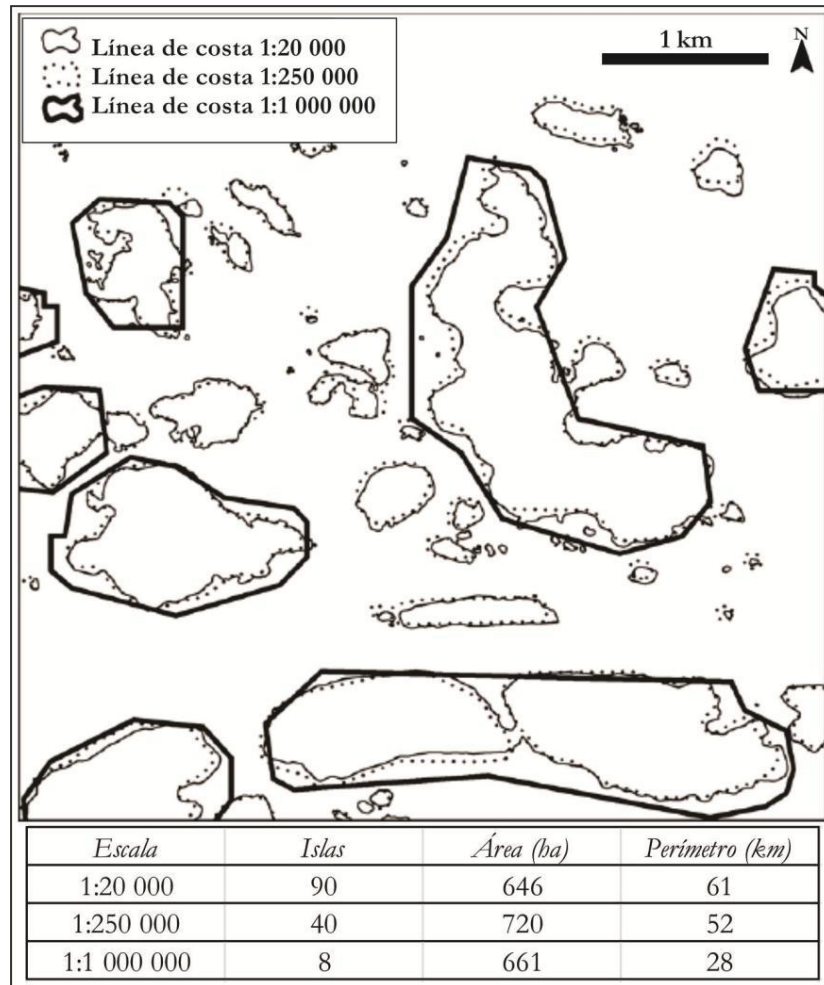


Figura 1.1 Variaciones en los atributos geométricos de la línea de costa según las diferentes escalas de representación en la cartografía. Hay una relación directamente proporcional entre las escalas mayores y el grado de precisión necesario para su adecuada representación. Adaptado de Tolvanen y Kalliola (2008).

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Norteamérica (NOAA) ha intentado atenuar ese carácter de límite borroso, definiendo los términos *coastline* y *shoreline* como la intersección entre un *datum* de marea y la tierra, aclarando que hay varios usos legales, técnicos y generales en la utilización de ambos términos. Para los E.E.U.U. y otros países, el interés por aclarar este término va más allá de fines académicos o científicos pues conlleva intereses económicos y legales concernientes con la delimitación exacta de los terrenos costeros que son propiedad federal o privada (Goodwin *et al.*, 2009; Hicks, 2006).

En cualquier caso, cuando se realizan intentos por establecer con mayor precisión la posición de la línea de costa, inevitablemente se está construyendo también una definición más contundente o, por lo menos, más efectiva a la hora de intentar ponerla en práctica con diferentes objetivos. Efectivamente, la línea de costa es un límite entre el mar y las tierras emergidas usualmente representado de forma lineal en la cartografía, pero en realidad se trata de un límite borroso e inestable por su instantaneidad en el espacio y tiempo y también por su atributo especial como forma geométrica fractal (Figura 1.1).

La traducción al español de ambos términos, *shoreline* y *coastline*, es simplemente línea de costa, han sido adoptados en nuestra lengua como sinónimos, pero esto no significa que el problema esté resuelto sino todo lo contrario, faltan discusiones y acuerdos para la nomenclatura de los límites entre agua y tierra ya sean continentales o marinos.

Es claro que aún no se ha llegado a consensos en la adopción de una definición consistente, pero es necesario considerar que en cualquier investigación que involucre estudios de detección y medición de la posición de la línea de costa es preciso enunciar claramente la definición y el rasgo indicador seleccionados para poder evaluar y contrastar la información con la de otras investigaciones realizadas o subsecuentes (Byrnes *et al.*, 2002).

Para el desarrollo de esta investigación se adopta y utiliza la siguiente definición operativa de línea de costa: el límite aproximado entre el mar y el continente cuyo rasgo indicador en el relieve es la posición de la línea de marea alta (HWL). Como sugieren Camfield y Morang (1996), este es el mejor indicador para comparaciones históricas de la línea de costa por su fácil identificación en distintas técnicas empleadas para su detección, incluyendo las utilizadas en el trabajo en campo.

1.3 Variaciones en la posición de la línea de costa

Como se ha mencionado antes, una línea de costa tiene un carácter unidimensional además de un atributo de límite espacial entre dos medios: uno sólido, representado por el continente y otro líquido, representado por el mar. Esto brinda la oportunidad de aclarar algunos parámetros utilizados para medir los cambios en su posición: avance, retroceso, erosión y acreción.

Resulta inconveniente hablar de erosión o acreción de una línea de costa porque ambos términos se refieren a la remoción de material, procesos que no pueden presentarse en una línea de costa debido a su carácter unidimensional. Si la línea de costa se desplaza hacia el continente se describe como **retroceso**, mientras que el desplazamiento hacia el mar es denominado **avance**, como ambos son procesos que implican desplazamiento comúnmente se expresan cuantitativamente en unidades lineares (metros, pies, etcétera). En otras palabras, una línea de costa puede “moverse” pero no ganar o perder material.

Por otra parte, una playa puede ganar o perder sedimentos según diferentes escalas de tiempo y espacio; cuando la costa registra un incremento en su volumen de sedimentos se le llama **acreción** y el proceso opuesto es conocido como **erosión**. La acreción y erosión en una costa pueden o no generar cambios en su morfología perimetral, depende de la cantidad y del lugar donde se depositen o de donde se remuevan los sedimentos. Generalmente el balance de sedimentos se incluye como una variable de análisis de la evolución de los sistemas costeros, su medición es en unidades de volumen por lo que se utilizan las unidades correspondientes (Oertel, 2005).

La relación existente entre la velocidad de desplazamiento de una línea de costa o de cambios en el volumen de sedimentos de una franja costera con respecto al tiempo se suele expresar en tasas de cambio y de sedimentación. Esta relación cuantitativa representa adecuadamente la función existente entre el movimiento de la línea de costa o de los sedimentos y el tiempo transcurrido de acuerdo al período de medición. Las unidades para medir la tasa de cambio de la línea de costa usualmente se expresan en metros/año, mientras que la tasa de sedimentación comúnmente se cuantifica en $m^3/año$.

Una dificultad para medir con precisión y exactitud los cambios en la posición de la línea de costa es su variación constante en el espacio y en el tiempo. Un sólo día de visita a la playa confirma esta aseveración pues las marcas de agua dejadas en la arena por mareas previas constituyen la evidencia de cambios instantáneos en una escala de tiempo muy corta (horas, días).

En escalas de tiempo mayores (décadas o siglos), los cambios pueden ser apreciados mediante la comparación de las líneas de costa representadas en mapas, fotografías aéreas, imágenes de satélite y otras fuentes de información. Los cambios en la vegetación, las modificaciones en las construcciones y en las poblaciones ribereñas son otra evidencia importante en las variaciones en la posición de la línea de costa.

1.3.1 Velocidad y dirección de los cambios en la posición de la línea de costa

Una afirmación de amplia aceptación actual es, que la naturaleza del material del que están constituidas las líneas de costa juega un papel relevante en los cambios a los que puedan estar sometidas, es decir, se espera un mayor dinamismo en las costas arenosas que en las costas rocosas. Respecto a esta reflexión existe un consenso general en considerar que las costas arenosas presentan mayores variaciones en su posición en escalas temporales de largo y corto plazo que las costas rocosas. Sin embargo, las costas rocosas también pueden ser altamente sensibles a los cambios provocados por factores externos de alta magnitud y baja frecuencia; factores también conocidos como eventos extremos (Hansom, 2001).

La relevancia que tiene el considerar la magnitud de respuesta de los ambientes costeros ante factores externos, en función de la naturaleza del material del que están constituidas, también justifica lo esencial que son las mediciones de los cambios en la posición de la línea de costa, mismos que deben ser considerados para el adecuado manejo de las zonas costeras. Pero, ¿cómo podemos determinar la magnitud con que se desplazan las líneas de costa?, ¿qué rangos temporales serán conveniente considerar de acuerdo al objetivo de estudio?, ¿qué significado tiene una tasa de avance de 2.8 m/a ó una de retroceso de 1.5 m/a desde la perspectiva de la vulnerabilidad?

Considerar algunas variables cualitativas de velocidad como *lento, medio o rápido* puede llevar a confusiones o a malas interpretaciones pues son tan diversas las tasas de cambio, como diferentes son los ambientes costeros en los que se han realizado mediciones para obtener dichas tasas. Adicionalmente, la pertinencia de considerar criterios de representación de datos útiles y de fácil lectura para quienes se acerquen a este tipo de información, se vuelve imperiosa por la necesidad de evaluar la calidad de los datos generados mediante su aplicación en casos de estudio específicos.

No es una empresa fácil y quizá esa sea la razón por la cual hasta el momento no se conoce alguna norma de amplia aceptación para tratar de uniformizar el criterio “magnitud” en las mediciones de la franja costera e incluso, algunos autores prefieren no emplear este término. La intención de nuestro estudio tampoco es profundizar esta ausencia de conocimiento, aquí solo expone la forma en la que otras investigaciones abordan la dimensión temporal y espacial para medir y evaluar los cambios en la línea de costa.

1.3.2 Escalas de espacio y tiempo en el análisis de la evolución de la línea de costa.

Para estructurar el análisis de algunas variables que sirvan como guía para la identificación de variaciones en un sistema costero, es preciso categorizar las dimensiones de tiempo y espacio en función del rango de comportamiento de los factores y procesos que intervienen en el mismo.

Algunos autores han realizado propuestas con distintos objetivos pero con la idea común de considerar ciertos criterios como procesos frecuentes de oleaje y geomorfología, factores determinantes de distinto orden, magnitud de la respuesta de las formas del relieve costero, entre otros (Cowell^{a,b} *et al.*, 2003; Schwarzer *et al.*, 2003; Stive *et al.*, 1990; Stive *et al.*, 2002 y Terwindt y Battjes, 1990). Aunque hay diferencias cuando se comparan las propuestas de rangos de tiempo y espacio para evaluar la evolución de las líneas de costa es claro que coinciden en la asignación de los rangos extremos, es decir, en los rangos de mayor y menor amplitud (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Escala espacio-temporal relacionada con el análisis de la evolución de la línea de costa según el objetivo de estudio¹.

Escala	Tiempo		Espacio	Factores determinantes	Variables de análisis de uso generalizado	Métodos de análisis ampliamente aceptados
	Período					
Microescala	Segundos- horas	0-10 m	Turbulencia, oleaje, mar de fondo, fluctuaciones instantáneas del nivel del mar, deslizamientos, eventos extremos.	<ul style="list-style-type: none"> • Posición de la línea de costa. • Morfología y morfometría de las formas del ambiente costero en mar y continente (dunas, barras, subacuáticas, ripples, plumas de sedimentos de ríos). 	² Perfiles de playa con distintas técnicas. Monitorio de los elementos morfológicos de playa con el sistema de video ARGUS (Stive <i>et al.</i> , 2002). Cuantificación de las variaciones en el volumen de sedimentos. (Schwarzer <i>et al.</i> , 2003)	
Mesoescala	Días-meses	10 m - 1 km	Mareas, mareas de tormenta, avenidas de ríos, variabilidad estacional.			
Macroescala	Estaciones - años	1 km - 100 km	Variaciones en el clima de oleaje, ciclos en las bocas de marea y en las barras.	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución y composición de los sedimentos. • Posición del nivel del mar. • Morfología y morfometría de la plataforma continental. 	³ Comparación de elementos morfológicos de la costa a partir de diferentes fuentes cartográficas (mapas, imágenes de satélite, fotografías aéreas, modelos digitales de elevación, documentos históricos, etc.). Batimetría.	
Megaescala	Décadas-siglos	10 km - 1000 km	Balace de sedimentos, ascenso o descenso del nivel del mar, cambio climático.			
Metaescala	> Milenios	> 10,000 km	Subsistencia geológica, cambios diferenciales en el fondo oceánico, neotectónica.	⁴ Métodos de estratigrafía y sedimentología (análisis de composición y distribución de sedimentos); datación de unidades estratigráficas con C ¹⁴ y polen, entre otras.		

¹ Elaboración propia a partir de Cowell_{a,b} *et al.*, 2003; Schwarzer *et al.*, 2003; Stive *et al.*, 1990; Stive *et al.*, 2002 y Terwindt y Batjes, 1990.

² Observación directa en campo; ³ observación indirecta a partir de diversas fuentes; ⁴ interpretación de datos procedentes de diferentes técnicas.

Las dimensiones espacio y tiempo asignadas como rangos de medición para clasificar los factores que se consideran determinantes son una de tantas posibilidades para jerarquizar los elementos que intervienen en los procesos costeros (factores, formas resultantes, variables de análisis). En el caso de los rangos de tiempo, se han empleado períodos de tiempo convencionales, establecidos por la humanidad en función de cálculos matemáticos (meses, décadas, siglos) con períodos de tiempo “naturales” que obedecen a movimientos de la Tierra en el Universo como la rotación y la traslación.

La combinación de escalas de tiempo “artificiales” y “naturales” con la intención de ajustar el funcionamiento de un sistema natural a cierta clasificación para facilitar su análisis, revela varias cuestiones que producen incertidumbre. En primer lugar, para tal clasificación quizá debieran considerarse criterios de clasificación de rangos de tiempo acordes con la naturaleza de los procesos que intervienen en el sistema costero; no basadas en rangos de tiempo establecidos para otros fines. En segundo lugar, hacen falta reflexiones y más conocimientos en el tipo de trayectoria que siguen los factores y procesos presentes en la evolución de la costa (lineal, cíclica, aleatoria, etcétera).

1.4 Algunas causas y factores relacionados con la evolución de la línea de costa

Una de las motivaciones principales de varios autores que investigan los ambientes costeros es, precisamente, conocer los mecanismos que intervienen en el funcionamiento de su estructura; su mejor comprensión facilitaría el análisis de la magnitud que tienen las diferentes causas y factores implicados en la evolución de la línea de costa. Pero en un universo de factores de naturaleza diversa (hídricos, meteóricos, geológicos, oceanográficos, antrópicos, por mencionar algunos) es complicado discernir cuáles han tenido mayor magnitud y frecuencia; del lado inverso, retomando el concepto *sensibilidad* de Hansom (2001), cabe cuestionarse ante cuáles de estos factores ha sido más sensible la costa.

Otro de los temas principales que hoy generan inquietud es la dimensión que abarcan cada uno de esos factores en diversas escalas espacio-temporales. Por ejemplo, en modelos de predicción de la posición de la línea de costa para macro y mega escalas de tiempo, algunos autores prefieren eliminar líneas de costa que se hayan documentado a partir de tormentas porque consideran que esta información solo produce “ruido” porque las líneas de costa tienden a recuperar su posición original después de un cierto período de tiempo (Dolan *et al.*, 1991; Smith y Zarillo, 1990); mientras que, para otros autores esta misma información puede ser incorporada en los análisis por el hecho de que da cuenta de sus efectos para cierta escala de tiempo (Fletcher *et al.*, 2003).

Quizá en la naturaleza hay muy pocos límites absolutos, y en el caso de los ambientes costeros pareciera que los límites funcionan mayoritariamente con límites “borrosos”, de ahí que los procesos y los factores que dan forma a su estructura tengan un carácter de “simultaneidad” entre diversas escalas espacio-temporales (Lecuanda, 1996). Un factor de metaescala como la subsidencia del terreno puede estar actuando con uno de microescala como la turbulencia, entonces la apreciación de sus efectos solo podría ser posible en las mismas escalas temporales; podríamos denominar a este particular comportamiento de los factores como *de jerarquía multiescalar simultánea*.

En la Tabla 1.1 las variables utilizadas para el análisis de la evolución de la línea de costa no tienen límites absolutos espacio-temporales porque son susceptibles de cambio en cualquier rango, pero hay factores cuyos efectos afectan gradual y diferencialmente de manera más acentuada dichas variables, por lo tanto, si en un estudio sistemático se emplean los métodos adecuados de acuerdo al objetivo de investigación, es factible conocer la evolución de la línea de costa con mayor margen de certidumbre.

1.5 Fuentes de datos espaciales

Los datos espaciales disponibles para detectar la posición de la línea de costa pueden ser clasificados, por su formato, como *análogos* o *digitales*. En el primer caso nos estaríamos refiriendo a fuentes de información que no han sido procesados por ningún medio de producción automatizado, mientras que en el segundo caso, se trata de información generada mediante procesos automatizados y computacionales. En la actualidad, existen varios programas diseñados para el tratamiento de la información cartográfica que permiten combinar la información obtenida de ambas fuentes. Estos avances han simplificado laboriosas técnicas empleadas hasta hace dos décadas para el procesamiento de la información análoga, un ejemplo era la difícil tarea de ortorrectificar las fotografías aéreas y después hacer coincidir las líneas de costa de distintas fechas en una sola escala (Moore, 2000).

También hay una mayor disponibilidad de datos digitales que ha incrementado la oportunidad de seleccionar entre varias opciones; mejor aún, existen bancos de datos con libre acceso y descarga de imágenes digitales que benefician a varios países cuyo acceso a información espacial local es limitado o nulo (Tabla 1.2).

Aunque la tecnología actual permite acceder a muchos de esos recursos hay criterios que no se debe olvidar considerar antes de decidir cuáles serán las fuentes utilizadas como serían la longitud del período de tiempo a ser estudiado y la calidad de los resultados deseada. Dentro de esos criterios figuran otros atributos cartográficos y geométricos como la escala de representación, los sistemas de coordenadas y de proyección.

Si el período de estudios comprende varios años o décadas atrás, normalmente se dispondrá de fuentes análogas como fotografías aéreas, mapas topográficos y croquis; en ese caso, es de gran importancia conseguir la mayor cantidad de información espacial de esa época y los datos digitales servirán como la referencia de la posición de la línea de costa más reciente. Por otra parte, si se requiere comparar las líneas de costa en intervalos de meses o años recientes probablemente sea necesario conseguir imágenes satelitales que cubran el período de tiempo con cierta frecuencia.

La relación entre el propósito del estudio y las fuentes de información está condicionada también en función de la precisión, exactitud y nivel de actualización requeridos no sólo en el presente sino también en potencial aplicación para proyectos futuros. En este como en cualquier otro estudio es indispensable hacer alguna verificación en campo, aunque de forma sólo cualitativa, para validar la información.

Tabla 1.2 Fuentes de datos espaciales empleadas en el análisis de la evolución de las costas¹

Datos análogos	Datos digitales
Fotografías aéreas análogas	Fotografías aéreas digitales
Videos para interpretación visual	Video (Argus System)
Datos obtenidos mediante levantamientos topográficos con aparatos analógicos (perfiles de playa)	Imágenes de satélite (Landsat, SPOT, Terra/ASTER, Ikonos, Quickbird, WorldView, GeoEye,
Mapas topográficos y temáticos	Modelos digitales de elevación generados con LIDAR, SRTM, TerraSAR-X, TanDEM-X, ASTER GDEM
Portulanos	Datos obtenidos mediante levantamientos topográficos con equipo automático (GPS, estación total, LIDAR)
Croquis	Mapas topográficos y temáticos en formato digital

¹Elaboración propia, basada en Oguchi *et al.*, 2011.

Algunos autores como Li *et al.*, (2001), Honeycutt *et al.*, (2001), Genz *et al.*, (2007) han abordado el tema de las fuentes de error en los cálculos para obtener las tasas de cambio de la línea de costa. Dichos autores destacan la importancia de evitar errores derivados la recopilación de la información con la que fueron realizadas las fuentes de datos; es cierto que no hay forma de controlar esos errores pero es importante tenerlos en cuenta al momento de estimar el rango de incertidumbre involucrado en los cálculos.

Otro punto que destacan los mismos autores es la posibilidad de monitorear la posición de un indicador de la línea de costa como una forma de evaluar la evolución de la línea de costa, pero también como un medio para validar sus variaciones de forma directa. Para ese fin, los perfiles de playa representan un excelente método por su facilidad y bajo costo, permiten registrar la posición de la línea de costa con una frecuencia determinada en diferentes escalas de tiempo y brindan la oportunidad de registrar otros cambios en los elementos geomórficos de la costa.

Detectar y delinear la línea de costa directamente en campo utilizando GPS, transportado por un vehículo o una persona, es otro método que ha demostrado ser altamente efectivo como fuente de información y como forma de monitoreo presenta errores que no rebasan los centímetros o los decímetros (Baptista *et al.*, 2011), (Figura1.2).



Figura 1.2 A) Vehículo adaptado con dos antenas GPS para recepción de señal de alta frecuencia, registra la línea de costa en sectores relativamente rectos de la playa. B) Antena GPS adaptada a monociclo y controlada por el operador, es útil para delinear la línea de costa en sectores de relieve o topografía “accidentados” o modificados por el hombre. (Baptista *et al.*, 2011).

1.6 Indicadores para la identificación de la línea de costa

Un indicador de la posición de la línea de costa es algún rasgo físico de la costa perceptible de forma cualitativa o cuantitativa tanto en campo como en distintas fuentes de información cartográfica. Una de las finalidades de utilizar indicadores es tomar un rasgo útil de referencia en la costa el cual pueda servir como una aproximación de la posición “real” de la línea de costa en un tiempo y espacio específicos. En términos generales los elementos físicos que sirven como indicadores podrían clasificarse de acuerdo a dos criterios principales: la estrategia de identificación y la técnica de detección.

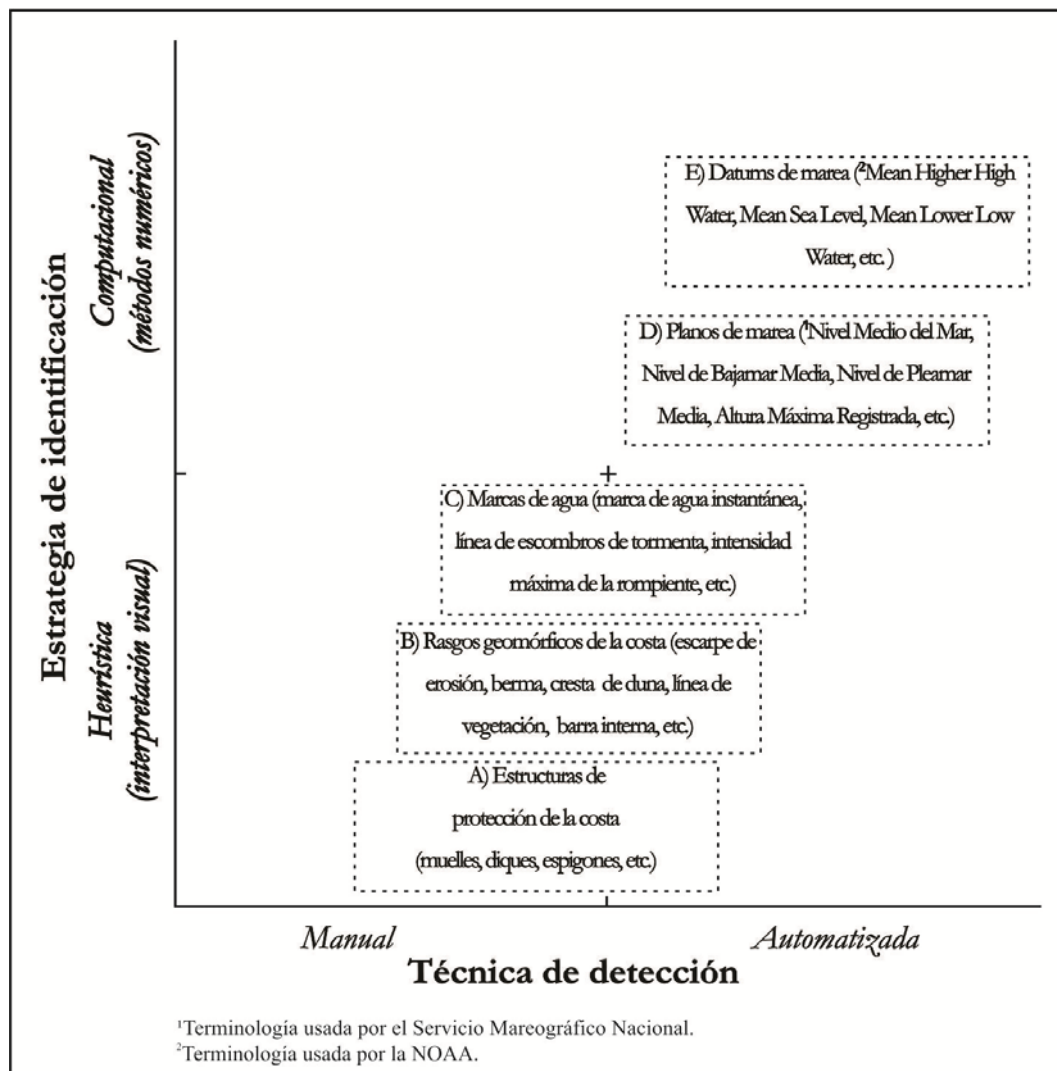


Figura 1.3 Clasificación de los indicadores de la posición de la línea de costa en función del enfoque adoptado para su identificación y de la técnica empleada para su detección. Elaboración propia, basada en Boak y Turner, (2005); Pajak y Leatherman, (2002).

En la Figura 1.3 los elementos físicos se agrupan en categorías de indicadores de la posición de la línea de costa y se clasifican en función de la estrategia utilizada para reconocer su posición (estrategia de identificación) y de la técnica utilizada para trazar la línea de costa (técnica de detección¹). El reconocimiento de la posición de la línea de costa se puede llevar a cabo de forma visual por un operario o por un medio electrónico (*software*), que generalmente utilizará algún método numérico para llevar a cabo dicha acción.

Mientras que el trazado de la línea de costa necesariamente habrá pasado por el proceso previo de identificación y podrá llevarse a cabo manualmente por medio de un operario o también podrá trazarse automáticamente mediante un *software*. De acuerdo a las características de cada categoría de elementos físicos estos podrán alternar su condición para servir como indicadores de la posición de la línea de costa de acuerdo a la estrategia y técnica seleccionada.

Los elementos físicos de las categorías A), B) y C) son indicadores *heurísticos* porque su identificación está basada en criterios subjetivos, es decir, se interpretan visualmente (por un usuario o computadora) según los atributos de representación en la fuente de datos que se esté utilizando. Por ejemplo, la línea de vegetación o la marca de agua instantánea son identificadas de acuerdo a contrastes tonales en los colores o en los píxeles de las imágenes.

Al basarse en indicadores *heurísticos* se puede detectar la línea de costa tanto manual como automáticamente, el nivel de exactitud y precisión en este proceso dependen de las propiedades de la imagen que se adopten como criterio de representación del indicador (brillantez, contraste tonal, intensidad del píxel, *artificial neural network*, etc.); el grado de subjetividad y apreciación al trazar la posición de la línea de costa dependerá directamente de los criterios considerados a partir de las propiedades de la imagen.

¹ **Detección** es una palabra de origen inglés—to detect—que proviene del latín *detectus* y esta última del verbo *detegere*, que significa descubrir, revelar, identificar. En esta investigación se propone su uso para designar la etapa de digitalización de la línea de costa en la cual, una vez identificada su posición en la fuente de datos se procede a trazarla utilizando técnicas manuales o automatizadas. Cuando se habla de identificación solo nos estamos refiriendo a la “visualización” de la posición de la línea de costa, mientras que al hablar de detección se asume que para poder trazar su posición previamente debió haber sido identificada. Entonces una línea de costa puede ser identificada y no necesariamente trazada, pero si decimos “detectar”, inevitablemente estamos ya incluyendo el proceso de identificar.

Por otra parte, los planos de marea (D) y datums de marea (E) son elementos físicos que se convierten en indicadores *computacionales* de la línea de costa cuando se obtiene la sucesión lineal de su intersección con un *modelo digital del terreno costero* (MDTC)² y con datos batimétricos. Tanto el cálculo de los planos estáticos de referencia del nivel del mar (planos y datums de marea) como la obtención de los MDTC son determinados por métodos estadísticos y numéricos (Li *et al.*, 2002).

El criterio adoptado en la utilización de estos indicadores es cuantitativo, por lo tanto, algunos autores piensan que su utilización es sinónimo de objetividad. Dado el origen de los *indicadores computacionales*, solo pueden ser identificados con técnicas de detección automatizadas que funcionan bajo modelos de derivación matemática (topología y *clusters*).

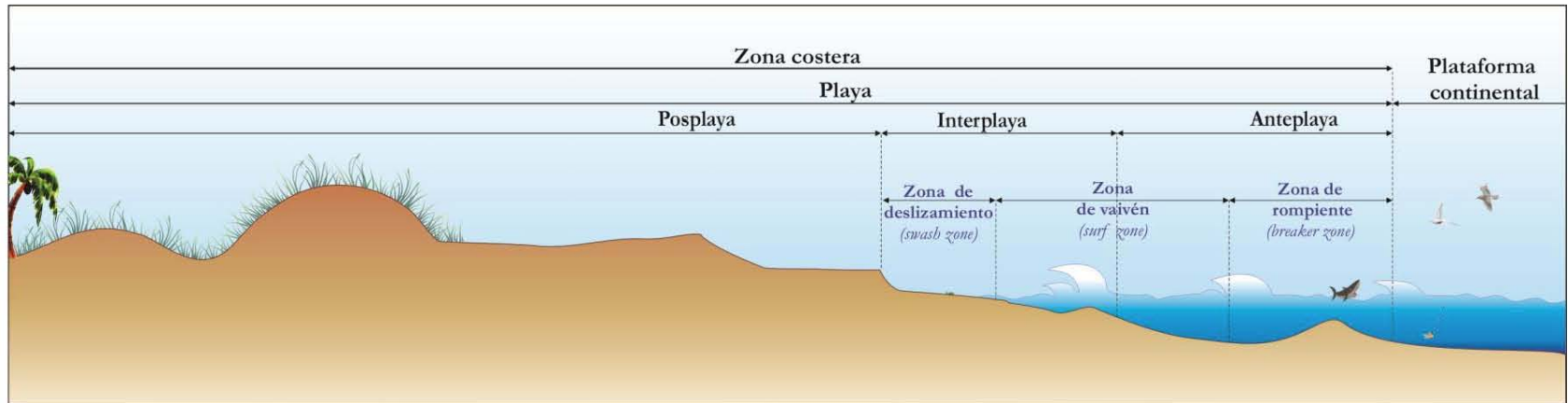
1.6.1 Indicadores *heurísticos*

Algunos elementos del relieve de la playa subaérea como el escarpe de erosión, la berma, el escalón de berma, la línea de vegetación, el pie de duna, la cresta de duna, entre otros, son los que más comúnmente se consideran en la categoría de rasgos geomórficos de la costa (categoría B de los indicadores de la posición de la línea de costa, Figura 1.3); mientras que en el dominio subacuático también hay otros elementos morfológicos que entran en la misma categoría como la barra interna y el escalón de playa, aunque su uso es de menor frecuencia.

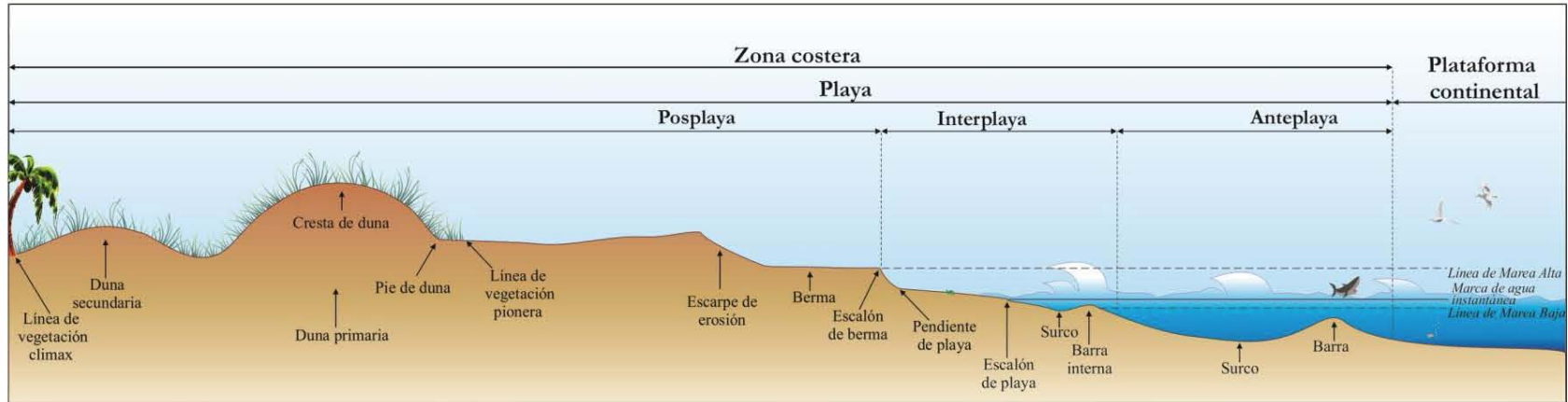
La terminología usada en español para nombrar los rasgos geomórficos de la costa y los procesos de oleaje es extensa y tampoco hay consenso en su utilización, por lo tanto, los que se mencionan en esta investigación son una propuesta en el vasto panorama semántico de las costas (Figura 1.4).

Por otra parte, cuando se emplean los elementos físicos relacionados con las marcas de marea se pueden presentar algunas dificultades en su detección manual, la razón es que en las fotografías aéreas y otras fuentes de información donde es posible apreciar dichas marcas por contrastes tonales puede haber varias líneas en la playa; su apreciación directa en campo resulta más fácil aunque no se elimina la posibilidad de que también se puedan generar confusiones (Figura 1.5).

² Traducido al español de las siglas en inglés CTM (Coastal Terrain Model), (Li *et al.*, 2002).



Clasificación de las zonas del perfil de playa de acuerdo a los siguientes criterios:
Procesos de oleaje
Procesos morfodinámicos



Indicadores de la línea de costa :
Rasgos geomórficos (categoría B)
Marcas de agua (categoría C)

Figura 1.4 Indicadores de la línea de costa y zonas del perfil de playa. En la clasificación de las zonas del perfil de playa en función de procesos de oleaje y morfodinámicos también influye el carácter de inestabilidad de la posición de la línea de costa, por lo tanto, algunos indicadores heurísticos de la posición de la línea de costa más comunes de encontrar en una playa arenosa también son sujetos a esa misma condición. La terminología adoptada para nombrar a los rasgos geomórficos está basada en Guillén y Díaz (1990). Elaboración propia.



Figura 1.5 Marcas de agua más comunes de identificar directamente en campo. En algunos lugares como Playa del Rey, se pueden identificar hasta seis marcas de agua; aunque varían en rangos de tiempo de microescala, se asumen como promedio de la posición relativa de la línea de costa.

Es claro que cualquier elemento físico en todos los tipos de costa variarán de forma natural en el tiempo a velocidades difícilmente pronosticables, de ahí la importancia de seleccionar un rasgo que pueda ser repetible, fácil de detectar y comparable entre las diferentes fuentes de información a ser utilizadas (Boak y Turner, 2005; Crowell *et al.*, 1991; Pajak y Leatherman, 2002).

Algunos autores mencionan el indicador que han empleado para detectar la posición de la línea de costa simplemente como el límite húmedo/seco, la línea de arena húmeda o el límite húmedo (Crowell *et al.*, 1991; Ruggiero y List, 2009; Smith y Zarillo, 1990), esta ambigüedad puede generar inconsistencias si se requiere la repetición de los mismos estudios en el futuro, es cierto que es difícil atribuir a cada uno de los rasgos mencionados el “verdadero límite” pero al menos sería conveniente seleccionar aquel que presente menos problemas en su detección.

Cuando se combina un indicador *heurístico* con una técnica de detección manual es recomendable que al momento de digitalizar la línea de costa la acción sea ejecutada por una sola persona, es un hecho que la interpretación visual de cualquier indicador es algo subjetivo, pero además de utilizar imágenes con buena resolución, o que por lo menos permitan apreciar las tonalidades entre la arena húmeda y seca, esta recomendación puede disminuir posibles errores al momento de trazar su posición.

De acuerdo a las fuentes de datos disponibles para llevar a cabo esta investigación, el indicador más conveniente para ser tomado como la posición “verdadera” de la línea de costa es la línea de marea alta, es decir, la marca máxima de la línea húmeda/seca (d), (Figura 1.6).

La selección de la línea de marea alta (HWL) en este estudio responde a las recomendaciones ya mencionadas; además, otro asunto a considerar es, que la variabilidad de la línea de marea alta disminuye en las costas arenosas de pendiente baja y con presencia de bermas la mayor parte del año, como es el caso de la franja de costa de la que se ocupa este estudio. Estos atributos geomórficos de la costa resultan relevantes cuando se desconoce el indicador utilizado en otras fuentes de información para detectar la línea de costa.

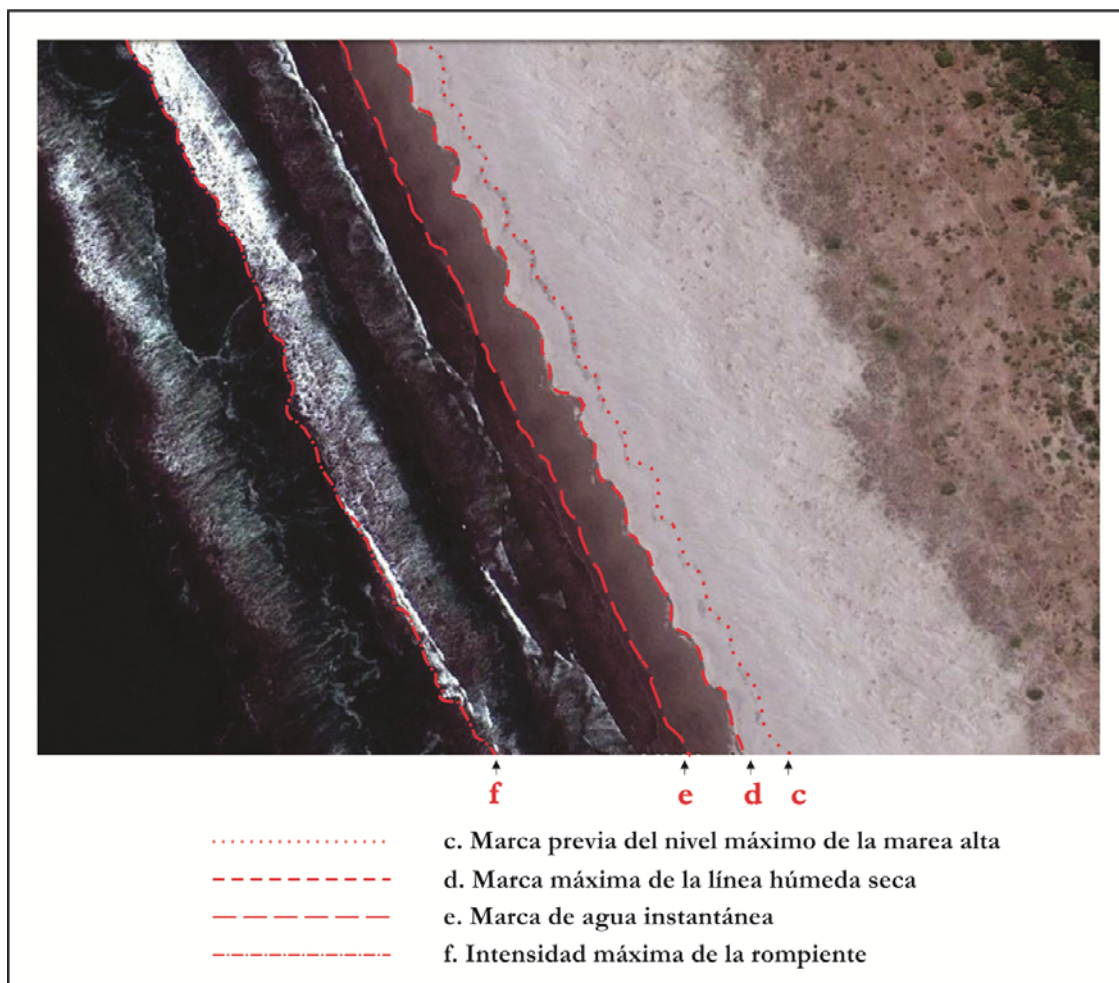


Figura 1.6 Marcas de agua identificadas en una fotografía satelital de Google Earth correspondiente a la Barra Camichín. Su presencia en cantidad y forma está en función, principalmente, de las características de la playa y de la resolución de la imagen.

1.7 Técnicas de detección de su posición

Cuando se habla de “detectar la línea de costa” se está aludiendo al proceso mediante el cual se identifica su posición en distintas fuentes de información, que puede llevarse a cabo con técnicas manuales (método subjetivo) o automatizadas (método objetivo). En el primer caso (método subjetivo), se utiliza un *indicador visible* en la fuente de información que servirá como línea de aproximación de la “verdadera” línea de costa para trazarla manualmente directamente en las imágenes o mediante la utilización de un software en imágenes digitalizadas (Boak y Turner, 2005).

En el segundo caso (método objetivo), la identificación de la línea de costa se realiza mediante técnicas automatizadas que pueden emplear tanto indicadores *visibles* como *digitales*; algunas de estas técnicas utilizan algoritmos computacionales basados en los contrastes tonales en los píxeles, en este caso la detección de la posición de la línea de costa puede llevarse a cabo sin la intervención del usuario, la finalidad es lograr la mayor precisión posible (Pearre y Puleo, 2009).

Las técnicas manuales de detección son las que se han empleado con mayor frecuencia, esto se debe principalmente, a la disponibilidad de las fuentes de datos históricos que en su mayoría dificultan la utilización de indicadores *digitales*. En México son aún incipientes las investigaciones que tienen como objetivo medir las tasas de avance y retroceso en las franjas costeras con ambas técnicas. Entre los trabajos hasta ahora publicados que destacan haber utilizado técnicas manuales se encuentran los de Ortiz y Pérez (1999) y Santana *et al.* (2008).

La investigación que llevaron a cabo Pearre y Puleo (2009) es un caso de estudio en el que se detectó la línea de costa automáticamente, ellos utilizaron imágenes de video para aplicar un método basado en el desarrollo de un algoritmo que identifica las variaciones en la intensidad del brillo y tono de los píxeles. Los tres pasos que integran el método de detección son los siguientes:

- (1) se localiza el valor 'pico' de intensidad en el brillo y tono de la imagen de video que, fisiográficamente, en el perfil de playa correspondería a la zona de vaivén (*surf zone*)
- (2) se obtiene un valor de intensidad como promedio de las intensidades 'pico' de los píxeles hacia el continente, este se toma como línea de base de referencia
- (3) finalmente, los valores de las intensidades 'pico' que caen bajo la línea base hacia el continente, en posición transversal mar-continente, se establecen como la línea de costa

La detección de la línea de costa parece sencilla pero no es así, esta tarea en realidad implica varias etapas dependiendo del tipo de fuentes de información que se tengan disponibles. En primer lugar es necesario hacer coincidir las líneas de costa de las diferentes fuentes de información en un solo sistema de georreferenciación para que sean realmente comparables. En segundo lugar, hay que asegurarse que el indicador de la posición de la línea de costa sea repetible en todas las fuentes de información y, por último, hay que evaluar la precisión y exactitud de la técnica de detección a utilizar (manual o automatizada), en función del objetivo para el cual se está llevando a cabo el estudio (Figura 1.7).

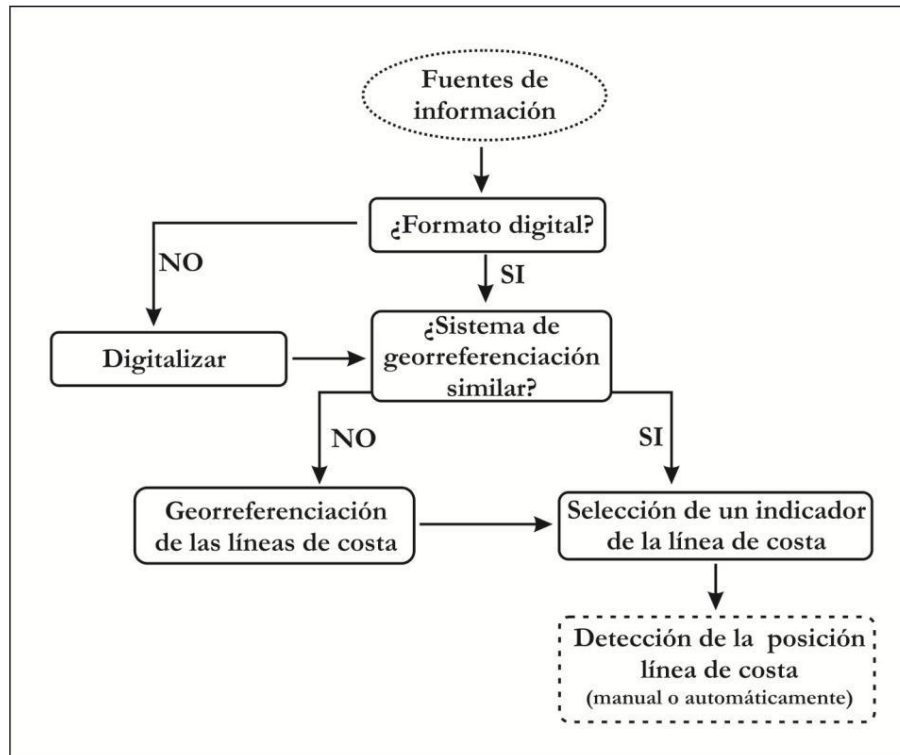


Figura 1.7 Secuencia de etapas en la detección de la posición de la línea de costa. Elaboración propia.

Resumiendo, actualmente hay dos técnicas de detección de la línea de costa: manual y automatizada. A este proceso es al que se refieren varios autores cuando mencionan el concepto de *shoreline mapping* en la literatura en inglés. A pesar de que han evolucionado las técnicas para hacer coincidir en una misma escala espacial las distintas fuentes y para georreferenciar los datos, aún son incipientes los esfuerzos en cuanto a la automatización de procesos para detectar la posición de la línea de costa.

1.8. Métodos de medición de cambios en la posición de la línea de costa

Además de la tasa de cambio de la línea de costa otro de los índices más utilizados por los investigadores de costas, ingenieros y por personas involucradas con el manejo de costas es la pérdida o ganancia de material en la playa, es decir, las variaciones en el volumen de sedimentos en la playa, cuando el valor es positivo significa acreción mientras que cuando son valores negativos se está hablando de erosión, la unidades se expresan en volumen por tiempo, con mayor frecuencia en $m^3/año$.

Las tasas de cambio se calculan, esencialmente, por métodos estadísticos para analizar las variaciones de la línea de costa en distintas fechas. Como señalan Dolan *et al.* (1991):

“In most applications, the shoreline rate-of-change statistic is expected to reflect a cumulative summary of the processes which have impacted the coast through time”.

Teniendo esta idea en mente es preciso destacar que al calcular las tasas de cambio se están obteniendo valores “absolutos”, es decir, a menos que se tenga un programa de monitoreo de la línea de costa que abarque el período de medición en forma sistemática, se desconoce la distribución e intensidad con que han ocurrido las variaciones en la posición de la línea de costa en escalas de tiempo más cortas. Si se requiere conocer la evolución de la línea de costa o de cualquier otro elemento de la playa en un mayor nivel de precisión entonces tendría que recurrirse a otro método de monitoreo, es decir, uno que contemplara el levantamiento de datos de forma sistemática en tiempo y espacio, como la obtención de perfiles de playa o la videografía.

Existen varios métodos estadísticos para calcular las tasas de cambio de la línea de costa referidas en la literatura en inglés, su traducción al español también presenta ambigüedades, para tratar de mantener cierta uniformidad se han tomado los términos empleados por Del Río y Gracia (2008). Un punto común en todos los métodos empleados con anterioridad es su principio básico de medir las diferencias entre las posiciones de la línea de costa a través del tiempo. En los siguientes párrafos se presentan algunos de los más frecuentes de encontrar en diversos estudios.

1.8.1 Método de tasa de regresión lineal

El análisis de regresión lineal (LRR) utiliza el método de cuadrados mínimos para calcular una línea de “mejor ajuste” para las posiciones de la línea de costa utilizadas en el cálculo. La pendiente de la línea resultante aporta un estimado de la tasa de cambio de la línea de costa expresada en metros/año (Dolan *et al.*, 1991; Moore *et al.*, 2006). Este método estadístico frecuentemente es calculado mediante un software, característica que le otorga cierta ventaja porque se considera que hay robustez al emplear técnicas estadísticas y métodos numéricos. También es conocido en la literatura como método de cuadrados mínimos ordinarios.

Honeycutt *et al.* (2001) señalan que, específicamente, en estudios de predicción de los cambios en la posición de la línea de costa este método presenta un mayor grado de precisión:

“While there are certainly cases where end-point rates may yield good forecasts (e.g., long temporal span, with storm shorelines omitted), linear-regression rates generally provide superior predictions”.

1.8.2 Método de tasa de punto final

Es el método de medición más simple para determinar la distancia de desplazamiento en metros por cada año transcurrido en un periodo de tiempo y, probablemente sea el más ampliamente utilizado en diversas investigaciones. Consiste en obtener la distancia total entre dos líneas de costa de distintas fechas; el valor obtenido es dividido entre el período de años transcurrido. En este método únicamente se consideran dos líneas de costa: la línea de costa más antigua y la más reciente. Si se requiere calcular tasas de cambio para otros períodos de tiempo es posible hacer combinaciones para obtener las tasas de cambio incluyendo todas las posiciones (Dolan *et al.*, 1991; Fenster *et al.*, 1993; Genz *et al.*, 2007; Morton *et al.*, 2005).

1.8.3 Otros métodos estadísticos

Honeycutt *et al.* (2001) también exponen el problema que representan los fenómenos meteorológicos extremos como factor de incertidumbre o influencia en los cálculos de las tasas de cambio y, resumen sus puntos de vista y de otros autores de la siguiente manera:

- a) La ocurrencia de los eventos extremos se verá reflejada en el retroceso de la línea de costa y de ahí su necesidad de ser tomados en cuenta para la obtención de valores negativos (erosión).
- b) El tiempo transcurrido entre cada medición es suficiente para “borrar” su efecto en la línea de costa y
- c) Este tipo de fenómenos sí pueden dar lugar a incertidumbre en los datos y hasta influir negativamente en los resultados.

Para abordar esta situación Genz *et al.*(2007) realizaron un estudio en el que comparan distintos métodos estadísticos para calcular las tasas de retroceso en un segmento de línea de costa en Maui, Hawaii, además de los métodos arriba mencionados incluyeron nuevos métodos o variantes como son³: *average of rates* (AOR), *minimum description length* (MDL), *jackknifing* (JK), *ordinary least squares* (OLS), *reweighted least squares* (RLS), *weighted least squares* (WLS), *reweighted weighted least squares* (RWLS), *least absolute deviation* (LAD) y *weighted least absolute deviation* (WLAD). Después de aplicar todos estos métodos en el caso de estudio realizaron una evaluación del error de incertidumbre en las mediciones de la tasa de cambio considerando algunas variables como el conocimiento o desconocimiento de la incertidumbre en los datos derivada de los métodos de detección de la línea de costa y de la influencia de las tormentas, entre otras, estos investigadores concluyeron que el método de regresión lineal es el que recomendarían en estudios con incertidumbre difícil de cuantificar.

Como se ha visto, cualquier método de medición de cambios solo estará calculando desplazamiento en un plano horizontal de la línea de costa, la precisión y exactitud en los valores obtenidos está en función de la cantidad y calidad de los datos seleccionados. Se considera que a mayor cantidad de datos de posición de línea de costa con una frecuencia establecida según los objetivos que persiga el estudio, mayor será el conocimiento de la dimensión que ocupan las variables consideradas en la evolución de la línea de costa.

1.9 Estudios previos en el área de estudio

Durante la década de 1950 algunos centros de investigación norteamericanos como el Instituto de Geofísica de la Universidad de California (bajo auspicio de la Oficina de Investigación Naval), la Institución Scripps de Oceanografía (con el apoyo del Instituto Americano del Petróleo) y el Laboratorio de Sismología del Instituto de Tecnología de California emprendieron una serie de investigaciones para conocer el origen y la estructura geológica del Golfo de California, en parte motivados por el interés científico que despertó lo que definían como:

“...a natural laboratory for the study of many aspects of sedimentology and oceanography in which the effects of various factors can ultimately be isolated.”⁴

³Para una descripción detallada de cada método que se menciona, revisar la sección correspondiente en el artículo citado (Genz *et al.*, 2007).

⁴Manuscrito recibido en 1963 como prefacio de la Memoria 3 del Simposio “Marine Geology of the Gulf of California” (van Andel y Shor, 1964).

La expedición *Mar Vermilion* fue la primera de un extenso programa de investigación integrado por estudios de geología, sedimentología, estratigrafía, oceanografía física y geomorfología en la plataforma continental y en la zona continental adyacente al Golfo de California. Como integrantes de dicho programa Joseph R. Curray y David G. Moore se encargaron de estudiar la geomorfología en parte de la planicie costera y de la plataforma continental en Nayarit; en las investigaciones que llevaron a cabo emplearon varios métodos que en su momento se consideraron muy vanguardistas; sus aportes en el conocimiento de la génesis y evolución de los cordones litorales aún tienen vigencia en la actualidad (Curray *et al.*, 1969; van Andel y Shor, 1964).

En ese marco se inscriben los estudios de morfología a detalle y de la historia sedimentológica de más de 7 000 AP del sistema deltaico Santiago-San Pedro que constituyen un documento de gran valor en el análisis de la evolución de dicho sistema.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El Canal de Cuautla se localiza en la porción septentrional de litoral del estado de Nayarit mientras que el Estero de San Cristóbal corresponde a la porción central, ambos son límites espaciales de la línea de costa seleccionada para este estudio, al norte y sur respectivamente. El Océano Pacífico sirve de límite al oeste mientras, que la región conocida como Marismas Nacionales delimita la porción oriental correspondiente al continente.

La orientación general de este segmento de línea de costa es NE-SW con una extensión longitudinal de aproximadamente 98.2 km que representa el 1.1 % de la longitud de línea de costa externa calculada para el Pacífico en 8,429.6 km según Ortiz y de la Lanza (2006). Para efectos prácticos de la presente investigación sus límites están acotados por un polígono regular cuyas coordenadas son 22°15', 21° 30'N en latitud y 105°15', 105°40' W en longitud (Figura 2.1).

Es parte de la subprovincia fisiográfica *Delta del Río Grande de Santiago* que a su vez está incluida en la provincia fisiográfica *Llanura Costera del Pacífico* (INEGI^b, 2010). Dentro de la regionalización de costas llevada a cabo por Ortiz y de la Lanza (2006) el área de estudio se localiza en la región Centro Occidental del Pacífico Mexicano que comprende 395.9 km de costas bajas arenosas, por lo que la longitud de este sector abarca el 25 % del total.

Esta franja costera está constituida en toda su extensión por playas bajas arenosas con tamaños de grano de finos a muy finos, según la escala de Wentworth (1922), estos datos fueron obtenidos por análisis mecánico para determinar la distribución general del tamaño de grano siguiendo los estándares de análisis de la petrografía sedimentaria propuestos por Carver (1971) y coinciden con lo reportado por Curray *et al.*(1969) quienes consignan los mismos valores de tamaño de grano en las arenas de la zona de anteplaya y de la barra interna.

La costa es el borde perimetral hacia la plataforma continental de las planicies bajas fluvio-deltaicas de los ríos Grande de Santiago y San Pedro; Hernández Santana *et al.* (2007) en su análisis de morfoestructuras regionales atribuyen un carácter de génesis múltiple (marino, fluvial, lacustre y palustre) como antecedente evolutivo de estas planicies, de las que Lugo Hubp *et al.* (1990) reportan una pendiente topográfica menor a los 0.5° (> 1%).

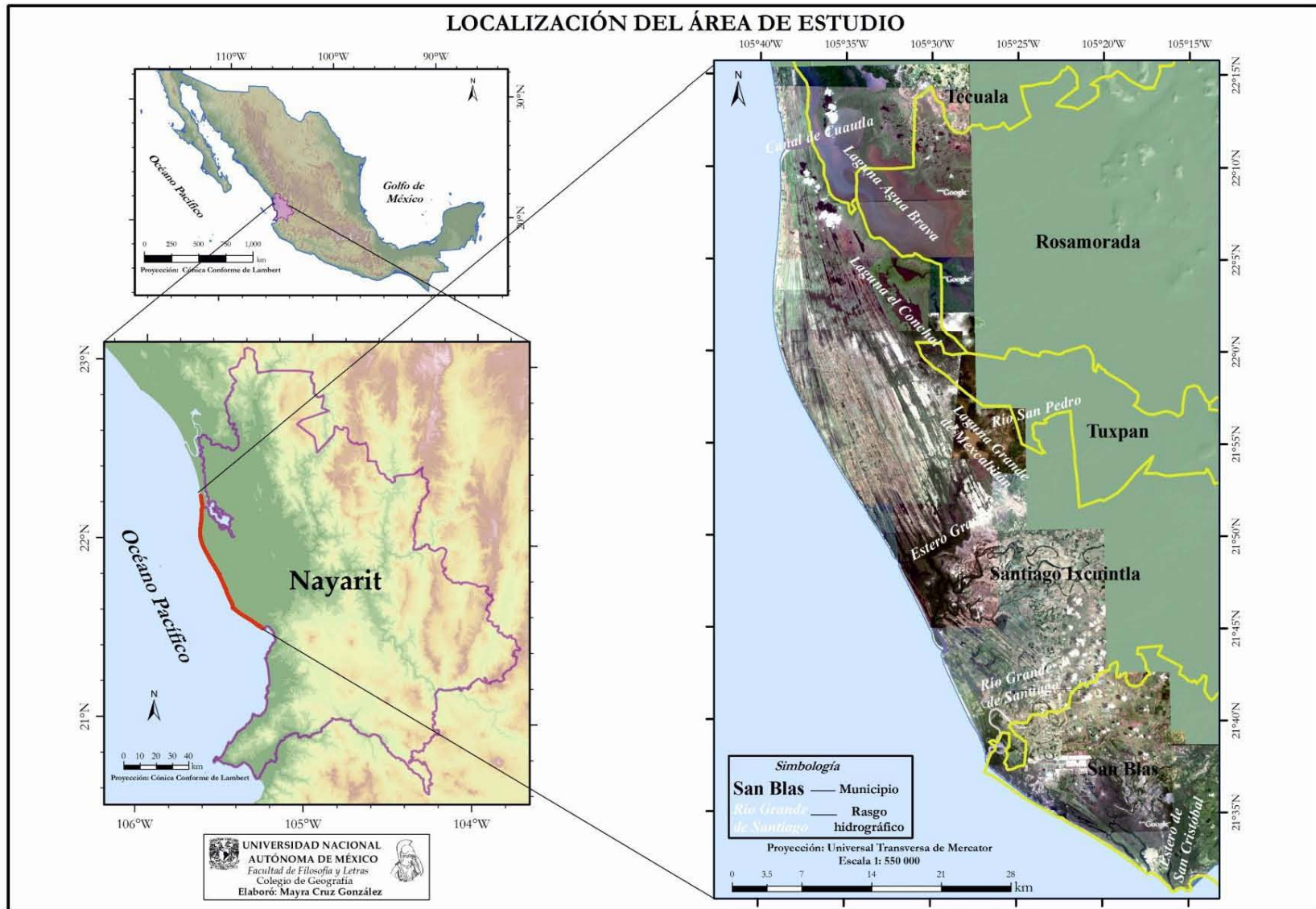


Figura 2.1 La línea de costa que es la transición en el frente del sistema deltaico San Pedro-Santiago hacia el Océano Pacífico, desde el Canal de Cuautla hasta el estero de San Cristóbal, forma parte del área de estudiada en esta investigación.

El antiguo delta del río San Pedro coalesce en la actualidad con el delta activo del río Grande de Santiago para formar un sistema fluvio-deltaico de forma cuspada con dominio predominante del oleaje y del régimen fluvial en su morfodinámica, según la clasificación de Galloway (1975) en Penland y Kulp (2005). Las planicies deltaicas parte del mencionado sistema contienen alrededor de 280 cordones litorales dispuestos con distintas orientaciones respecto a la línea de costa; la orientación de cada cordón litoral corresponde a las diferentes fases de formación que requirieron de condiciones hidrodinámicas y climáticas particulares más o menos semejantes en su momento de formación.

En su porción más extensa en anchura, la planicie de cordones litorales alcanza hasta 15 km cerca del poblado de Santa Cruz. Algunos rasgos morfológicos sobresalientes de esta sucesión de cordones litorales son que la separación entre cada uno de ellos va de los 15 a 200 m de cresta a cresta, con un promedio de 50 m; en cuanto a su altura, los cordones con mejor desarrollo tienen una elevación máxima de 1 a 2 msnm mientras que los *caños* de inundación entre los cordones (espacio de separación entre cada uno de los cordones en sentido longitudinal), tienen una profundidad que oscila entre los -1 y -0.50 metros por debajo del nivel del medio del mar. Longitudinalmente, los cordones abarcan la extensión total de la subprovincia *Delta del Río Grande de Santiago*.

La actual planicie deltaica de los ríos San Pedro y Grande de Santiago es resultante del depósito de aluviones antiguos pre-transgresivos estratificados (limo-arcillosos y arcillo-limosos) que sobreyacen a las rocas continentales más antiguas, su altura sobre el nivel del mar tiene un rango de 10 a 20 m. La planicie baja fluvio-deltaica es la porción adyacente a la línea de costa, tiene una altura máxima de 10 m sobre el nivel del mar, contiene los depósitos de sedimentos más recientes acumulados en las lagunas, marismas y pantanos de la región (Romo y Ortiz, 2001) incluyendo los depósitos del evento de regresión que Curray *et al.*, (1969) ubican entre 4 500 y 3 600 AP.

2.1 Características climáticas

La amplia disponibilidad de datos de temperatura y precipitación consignadas por Vidal (2005) y Vidal y Hernández (1992) han permitido establecer que la región se caracteriza por tener un clima cálido subhúmedo (Aw) con diferentes rangos de humedad que son menores hacia el norte y mayores hacia el sur. La temperatura media anual es de 26°C, la temporada más cálida se registra durante los meses de junio a agosto, en los que se pueden presentar temperaturas superiores a 30°C mientras que la temporada fría abarca desde diciembre hasta marzo, meses en los que en la llanura privan condiciones semicálidas de temperaturas que oscilan entre los 18 y 22°C.

En cuanto a los regímenes de precipitación, se registran 1 200 mm anuales en la porción norte hasta 1 500 mm en la porción sur del sector de estudio. Los meses más secos se hallan entre marzo y abril, durante este período se registra la menor cantidad de precipitación con solo 4mm; en general la región se caracteriza por un régimen pluviométrico de verano con porcentaje bajo de lluvia invernal $w(w)$, ya que en invierno se recibe menos del 5 % de la precipitación total anual mientras que los meses más lluviosos son julio, agosto y septiembre (Figura 2.2).

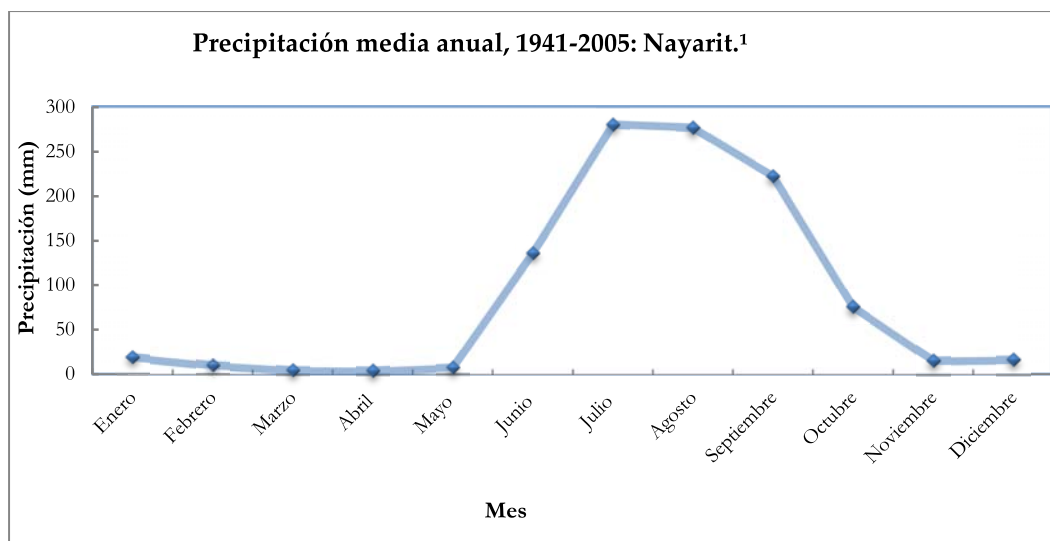


Figura 2.2 Precipitación media anual en el estado de Nayarit registrada durante el periodo 1941-2005. ¹Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2012).

Los ciclones tropicales tienen presencia a finales de verano y principios de otoño, es decir, en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, en éste último se han registrado la mayor parte de los eventos extremos. Durante las anteriores cuatro décadas dieciséis ciclones tropicales han impactado las costas nayaritas, cinco de estos han entrado a tierra por las costas del sector litoral que abarca esta investigación, el huracán Kenna ha sido el de mayor intensidad registrado hasta este momento (Tabla 2.1).

Tabla. 2.1 Ciclones tropicales que impactaron las costas del estado de Nayarit, 1970 a 2011¹.

Año	Período	Nombre	Categoría	Vientos máximos en impacto (km/h)	Lugar de entrada a tierra o costa más cercana
1970	26-30 jun.	Eileen	Tormenta Tropical	65	Las Coloradas, Nay.
1971	6-13 oct.	Priscilla	Tormenta Tropical	75	Santa Cruz, Nay.
1975	22-25 oct.	Olivia	Huracan 3	181	Mazatlán, Sin.
1976	25-30 oct.	Naomi	Depresión tropical	45	Mazatlán, Sin.
1981	24-30 oct.	Otis	Tormenta Tropical	100	Caimanero, Sin.
1983	21-28 mayo	Adolph	Tormenta Tropical	65	Chamela y Puerto Vallarta, Jal.- Santa Cruz, Nay.
1983	11-19 oct.	Tico	Huracán 3	205	Caimanero, Sin.
1986	15-22 oct.	Roslyn	Huracán 1	120	Mazatlán, Sin.
1987	22-26 jul.	Eugene	Tormenta Tropical	72	Miramar, Nayarit
1994	8-15 oct.	Rosa	Huracán 2	165	Escuinapa, Sin.
1996	30 sept.-04 oct.	Hernán	Huracán 1 (Depresión Tropical)	120 (45)	Cihuatlán, Jal. (San Blas, Nay.)
2000	20-22 sept.	Norman	Depresión tropical	45	Mazatlán, Sin.
2002	21-25 oct.	Kenna	Huracán 4	230	San Blas, Nay.
2003	3-7 oct.	Olaf	Tormenta Tropical	100	Cihuatlán, Jal. (San Blas, Nay.)
2003	1-9 oct.	Nora	Depresión tropical	45	Mazatlán, Sin.
2011	5-12 oct.	Jova	Huracan 2	160	La Fortuna, Jalisco

¹Fuentes: Servicio Meteorológico Nacional, 2012; Unisys Weather, 2012.

2.2 Sistemas hidrográficos

De acuerdo con la clasificación ecogeográfica de cuencas hidrológicas elaborada por Ortiz (2010), gran parte de la región la ocupan las extensas cuencas del Río San Pedro-Mezquital y la del río Grande de Santiago, que por el grado de complejidad en su estructura física y biológica se consideran alóctonas. Es decir, su cauce principal es distante lo que origina una gran diversidad espacial en los componentes naturales de la cuenca, desde su nacimiento hasta su desembocadura en el mar, y por lo tanto, son responsables de la heterogeneidad en los paisajes que integran el sistema costero.

Por otra parte, Blanco y Correa (2009) propone una regionalización hidrológica de la recién declarada Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales en la cual clasifica el sistema hidrológico en función del grado de interconectividad de los cauces, esteros, lagunas, marismas y albuferas presentes en la planicie fluvial con su dominio espacial (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Regionalización hidrológica de Marismas Nacionales¹

Categoría	Nombre
Cuencas bajas	Río Santiago
	Río San Pedro
Cuencas locales	Las Haciendas
	San Cristóbal
	El Pozo-El Rey
Cuencas mareales	Boca La Cegada
	Boca Asadero
	Boca Los Corchos
	Boca Camichín-Talegas
	Boca El Colorado
	Boca de Cuautla

¹Fuente: Blanco y Correa (2009).

Las cuencas mareales y los sistemas lagunares costeros como Teacapan—Agua Brava y Laguna Grande de Mexcaltitán están intercomunicados por varios *caños* y esteros alimentados por las corrientes de marea y por la escorrentía que descarga de las cuencas bajas. En el *inventario* del espacio costero mexicano que realizan Ortiz y de la Lanza (2006) destacan la importancia que tienen las marismas y sus principales aportes de sedimentos y de escurrimiento, al mencionar que:

“En el Pacífico mexicano (...) el mayor desarrollo de marismas es la Planicie Costera Nayarita con una superficie de 1 400 km². Esta zona esta formada por amplias llanuras aluviales de los ríos Acaponeta, San Pedro y Santiago, Baluarte, Cañas, Rosa Morada y Bejuco”.

El único delta de carácter costero es del río Grande de Santiago, los deltas de otros ríos como el San Pedro, Las Cañas y Acaponeta son lacustres, es decir, desembocan en la margen litoral interna.

2.3 Tipo de suelo y vegetación

De acuerdo con la clasificación de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007) los suelos con mayor extensión en el área de estudio son los solonchak, seguido por los fluvisoles y, en menor extensión, los cambisoles y otros suelos como luvisoles y feozems. La presencia de los suelos solonchak se debe a que en zonas pantanosas y de planicies de inundación estacional hay mayor aptitud para su desarrollo; mientras que los fluvisoles, cambisoles y luvisoles evolucionan en las planicies de acumulación bajas y medias (Díaz, 2005).

En esta región se localiza el ecosistema de manglares más extenso de las costas del Pacífico mexicano, reconocidos como el sistema Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales- incluido en 1995 en la Lista de Humedales de Importancia Internacional por la Convención Ramsar y, posteriormente, en 1998, como Área Importante para la Conservación de las Aves (AICA) por su importancia ecológica y económica para el país y por su papel como regulador de procesos hidrológicos, biológicos y geomorfológicos para los distintos paisajes físico-geográficos de la región (Berlanga, 2006).

Las especies dominantes de manglar en la región son *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Avicenia germinans* (mangle negro). Entre los tipos de vegetación presentes en la región se hallan la selva baja caducifolia y la selva mediana subperennifolia, el palmar, la vegetación halófila, de dunas costeras y la acuática en la cual se distinguen principalmente dos tipos de comunidades: el tular y la vegetación flotante (CONAFOR, 2009).

2.4 Algunas variables de carácter oceanográfico

Los niveles de mareas y las corrientes asociadas se relacionan con la entrada de la cuña salina en la porción del curso bajo de los esteros formando parte del sistema hidrológico. Gracias a que existe ese intercambio de marea es posible dar soporte al ecosistema de manglar que como es sabido, es rico en bienes y servicios ambientales, proporciona un flujo constante de energía, materia e información para los propios ecosistemas de manglar y los ecosistemas adyacentes.

El rango medio de marea es micromareal (0.70 a 0.85 m) mientras que las mareas predominantes son las mixtas semidiurnas de acuerdo a datos obtenidos de las estaciones mareográficas San Blas y Mazatlán (Servicio Mareográfico Nacional, 2011). En cuanto a las condiciones de oleaje, Montaña (1983) reporta que su dirección es, principalmente: Noroeste, Norte, Oeste y Suroeste pero las olas de mayor energía son las que provienen del Suroeste y Oeste asociadas a tormentas tropicales.

2.5 Evolución de la posición de la línea de costa en el Cuaternario reciente

Durante el Pleistoceno Superior e inicios del Holoceno (25 000—4 750 AP) la posición de la línea de costa migró gradualmente hacia el mar más de 125 km en dirección perpendicular a su actual emplazamiento, en este período los ríos San Pedro y Santiago compartían su cauce y desembocaban juntos en el actual reborde de plataforma continental. Como consecuencia de los cambios climáticos hubo períodos alternados de ascensos y descensos rápidos en el nivel del mar, que dieron lugar a sucesivas fases transgresivas y regresivas con la evidente inestabilidad de la línea de costa, de estar ubicada en ese límite llegó a estar emplazada hasta 15 km hacia la actual planicie fluvio deltaica.

No fue hasta el período de regresión del Holoceno (4 750—3 600 AP) cuando hubo una primera estabilización de la línea de costa, afirmación muy relativa, porque aproximadamente a partir de esta fecha, comenzaron también las fases alternadas de construcción de cordones litorales que caracterizan al actual sistema costero.

Davies Jr. y FitzGerald (2009) y Otvos (2005) mencionan que cada cordón litoral representa una antigua línea de costa porque mientras se forma uno nuevo, cada uno es una playa reciente y también refieren que para que los cordones litorales puedan completar su ciclo de formación se necesitan de oleajes de baja energía y del aporte de sedimentos de cuerpos de agua cercanos o de la plataforma continental superficial, por lo tanto, eso explica que las mayores tasas de formación tuvieran lugar en condiciones de estabilidad relativa del clima.

Se calcula que durante ese intervalo de tiempo, que abarcó aproximadamente 1 150 años, se llegaron a construir hasta 74 cordones litorales con un promedio de formación estimado de 12.2 años para cada uno; posterior a este período regresivo, un cambio local en el clima (3 600-1 500 AP) tuvo repercusiones en el régimen hidrológico y en el aporte de sedimentos cuyos efectos no han sido determinados, pero se infiere que incidieron en la disminución de la velocidad de formación de cordones litorales, que disminuyó a 16.5 años por cada cordón litoral.

Se considera que de 1 500 a 500 AP nuevamente se aceleró la construcción de cordones, dando como resultado que sólo en este período se formaran hasta 80 cordones con la misma velocidad que durante el primer período de relativa estabilidad de la línea de costa (12.2 años). Otro evento de gran importancia que muy probablemente tuvo efectos en la configuración de la línea de costa regional de ese momento geológico fue el cambio de curso del río Grande de Santiago hacia el sur, cerca de San Blas.

En esta etapa (aproximadamente 1 500 a 500 AP), la configuración de la línea de costa tuvo como mayor agente de modificación el río Grande de Santiago que registró importantes cambios en su curso, en la posición de su desembocadura y en su delta. Hace 1 000 años, se desprendió un distributario que se abrió paso hacia el sur, muy cerca del actual pueblo de San Blas. Este ramal abandonó 500 años después su curso principal y se separó del río San Pedro migrando hacia la actual desembocadura del río Santiago, este es el origen del actual delta del río Grande de Santiago que en siglos posteriores tuvo otros cambios.

Durante estos últimos 500 años, el nuevo distributario fue abandonado formando otro hacia el norte, que también quedó abandonado hasta encontrar su desembocadura actual y con ello la formación de un nuevo delta y la erosión del antiguo (Figura 2.3).

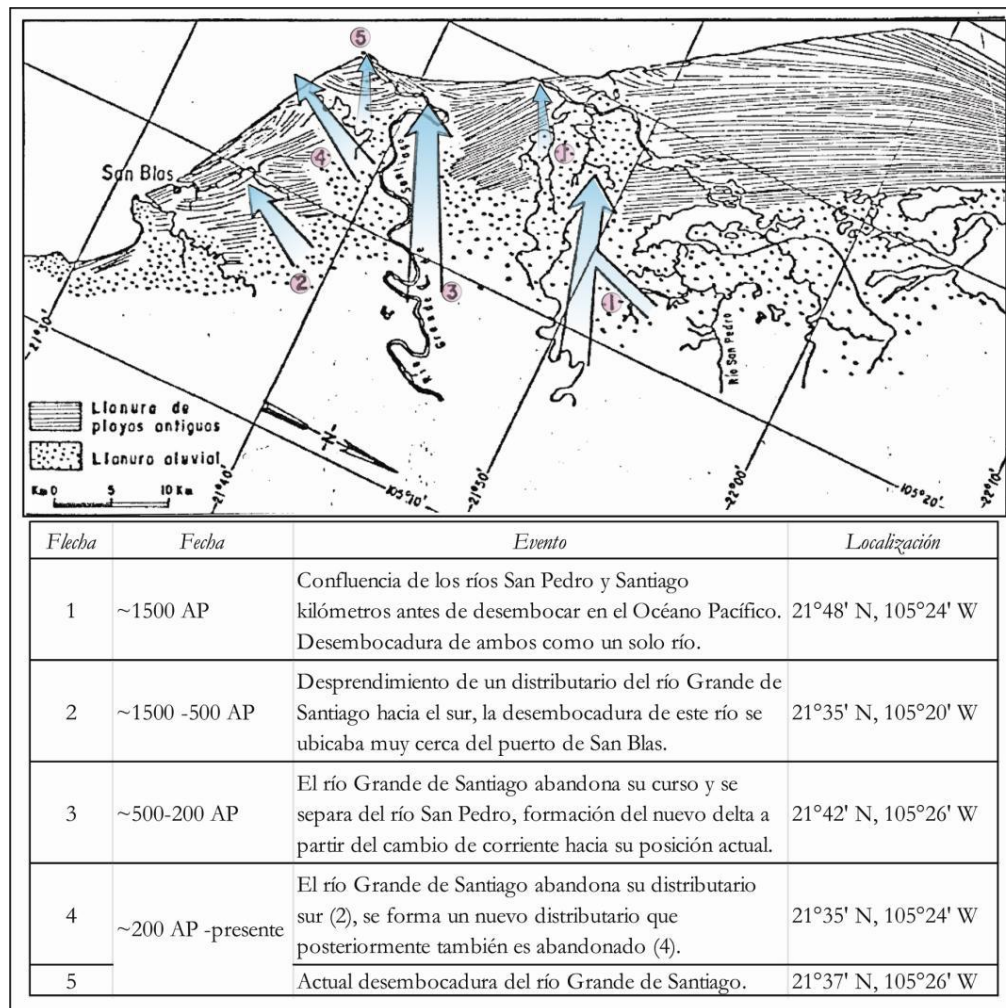


Figura 2.3 Dirección de flujo de las corrientes fluviales del sistema deltaico San Pedro-Santiago durante la fase regresiva de evolución. Los cambios de la posición relativa de las desembocaduras de los ríos ocurrieron en varios eventos en una metaescala de tiempo, cada uno de esos cambios generó variaciones en la posición y orientación de la línea de costa. Modificado y adaptado de Ortiz (1978) y Romo y Ortiz (2001).

Las evidencias cartográficas de las primeras exploraciones realizadas por los españoles en el área muestran tres bocas cerca del río Grande de Santiago. En 1822, el gobierno británico realizó una carta de navegación del puerto de San Blas en la que no aparece la actual Boca el Borrego, sólo está representada la Boca el Vigía. La formación de la boca actual del río Grande de Santiago no se ha podido fechar con exactitud, pero de acuerdo a las evidencias de cartografía histórica se puede asegurar que corresponde a la segunda mitad del siglo XIX (Figura 2.4).

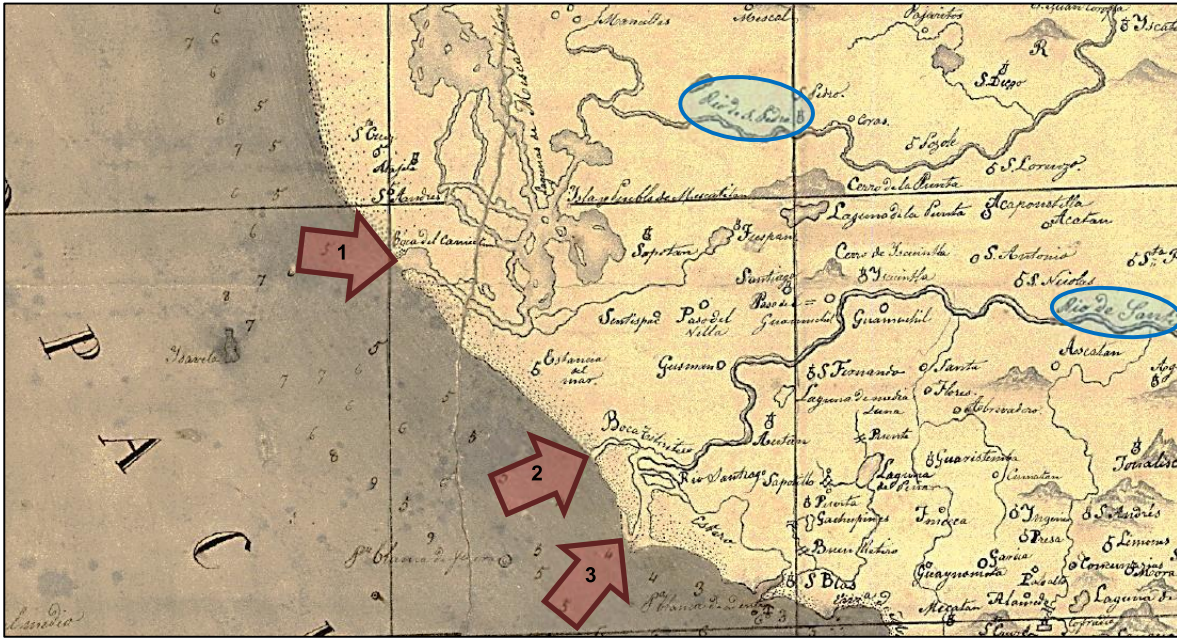


Figura 2.4 El sistema deltaico Santiago-San Pedro en el siglo XIX. El Teniente de Navio de la Marina Nacional José María Narváez, es autor de este mapa fechado en 1824, se representa al río Grande de Santiago con dos desembocaduras hacia el mar (flechas rojas 2 y 3). Los óvalos azules destacan las etiquetas de los ríos San Pedro y Grande de Santiago, nótese la ausencia de cauces de interconectividad entre ambos ríos y la orientación de la Boca Camichín en la flecha roja 1. (Narváez, 1824).

Entre las modificaciones artificiales en la línea de costa o en la parte continental adyacente destaca la construcción del Canal de Cuautla, construido durante los años de 1974 a 1976 a cargo de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos. Al término de la obra, tenía un ancho de 40 m, una profundidad de 2 m y casi 3 km de largo; en sus extremos norte y sur se colocaron dos escolleras de roca con una separación, entre ellas, de 200 m. La finalidad de esta construcción fue aumentar el aporte de agua salada a los cuerpos interiores de agua para mejorar las condiciones de acuicultura y la producción de peces y crustáceos en el estero.

Con el transcurrir de los años se ha producido un ensanchamiento del canal debido al sistema de corrientes de marea y a la deriva litoral cuya dirección ha ocasionado una transgresión de más de 1 700 m desde su fecha de construcción hasta el momento actual. Cuando el ciclón Rosa impactó en 1994 en las costas de Nayarit el deterioro en las escolleras se agravó, en la última década del siglo XX el canal alcanzó un máximo de 500 m de ancho y hasta 20 m de profundidad (CENAPRED, 2002).

Otra obra de reciente construcción es la Central Hidroeléctrica Aguamilpa-Solidaridad (1989-1993), que comenzó sus operaciones en 1994 con la finalidad de satisfacer las demandas de energía eléctrica además de tener otros usos secundarios como control de inundaciones, irrigación y pesca (Oliver, 2008). La presa Agua Milpa-Solidaridad tiene una gran importancia regional por la influencia que ejerce en los sistemas hidrológicos y en los ecosistemas costeros, cualquier modificación en la cuenca del río Grande de Santiago repercute en su escurrimiento y en el aporte de sedimentos hacia la costa (Aco, 2003).

A mediados del 2007 y tras más de una década de construcción fue puesta en marcha la Central Hidroeléctrica El Cajón, emplazada 77 km aguas arriba de la presa Aguamilpa, esta es la última de cuatro presas construidas cerca de la planicie deltaica, entre las que se encuentran la presa derivadora Amado Nervo y la Presa San Rafael.

2.6 Población e infraestructura

De acuerdo al Censo de Población del INEGI^c (2010) el estado de Nayarit tiene una población total de 1 084 979 habitantes de los cuales el 13 % corresponde a los dos municipios a los que pertenece, administrativamente, esta línea de costa (Santiago Ixcuintla registra 93 074 habitantes y San Blas 43 120); las localidades cercanas a la línea de costa (≤ 4 km) reúnen una población total de 19 344 de habitantes, es decir, el 14 % de la población total de los municipios mencionados (Tabla 2.2).

La administración gubernamental del estado de Nayarit clasifica a los municipios de Santiago Ixcuintla y San Blas como Región Norte; en el primero las principales actividades económicas son la pesquería, el turismo y la ganadería mientras que en el segundo son la pesquería y el turismo las de mayor aporte a la economía regional.

De las 17 localidades asentadas cerca de la línea de costa, cuatro tienen más de 1 000 habitantes pero San Blas, es la única localidad adyacente a la costa con infraestructura turística y además la única con estructuras de contención de oleaje. Otras playas que también se utilizan con fines recreativos son la Playa Puerta de Palapares, Playa El Colorado, Playa Los Corchos y Playa del Rey aunque con menor afluencia de turismo que en su mayoría es local (Figura 2.5).

Tabla 2.3 Población y localidades cercanas a la línea de costa ($\leq 4km$)

Municipio	Localidad	Habitantes
Santiago Ixcuintla	Palmar de Cuautla	1,359
	El Famoso	33
	Puerta de Palapares	930
	Santa Cruz (Las Haciendas)	1,316
	La Quinta (El Rancho de la Higuera)	21
	Sinaloa	88
	Cañada Grande	152
	San Andrés	884
	Mayorquín	741
	Las Labores	485
	Rancho Nuevo	809
	Boca Camichín	1,254
	Los Corchos	826
	Playa El Sesteo	106
	Rancho El Soyate (La Mirinda)	6
San Blas	Boca del Asadero	147
	San Blas	10,187
Total		19,344

Fuente:INEGI_b (2010) Marco Geoestadístico Nacional y Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos.

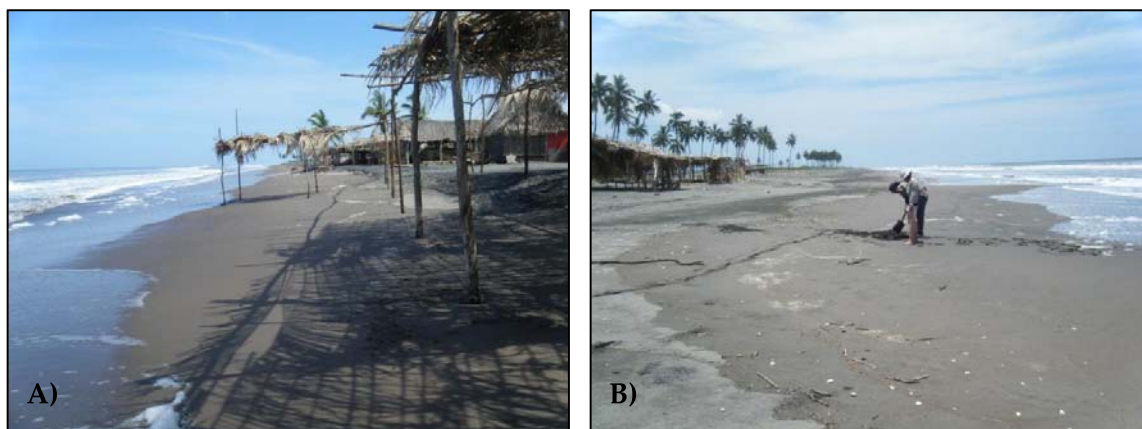


Figura 2.5 Playas atractivas para uso recreativo: Puerta de Palapares y El Colorado. Toda la franja de costa de esta área de estudio tiene playas arenosas que pueden resultar atractivas para uso recreativo, pero solo algunas son dedicadas a estos fines, por lo tanto, es mínimo el valor que representa este uso para la economía local. A) Playa Puerta de Palapares y B) Playa El Colorado.

III. MÉTODOS

Los métodos seleccionados en esta investigación para analizar la evolución de la costa en escalas de tiempo macro y mega responden a criterios como la disponibilidad de recursos materiales y humanos para emprender campañas de observación directamente en campo y a la factibilidad de emplear fuentes de datos que permitan obtener valores cercanos a la realidad en la cuantificación de las variaciones en la posición de la línea de costa.

Para llevar a cabo los objetivos planteados en este estudio se seleccionaron dos métodos de análisis: levantamiento de perfiles transversales de playa para identificar los cambios en los rasgos geomórficos en distintas estaciones del año y cambios en la posición de la línea de costa con un método estadístico que emplea datos cartográficos de un período temporal de cuatro décadas.

3.1 Levantamiento de perfiles transversales de playa

Este procedimiento es en esencia un método topográfico para obtener la altimetría entre dos puntos conocidos sobre una línea recta entre el mar y el continente. Existen varias técnicas para obtener la topografía de un perfil de playa, las más simples requieren solamente de equipo topográfico sencillo para medir ángulos y distancias (por ejemplo, brújula y cinta métrica), mientras que otros más complejos emplean instrumentos electrónicos como el teodolito o estación total (Delgado y Lloyd, 2004). Los sistemas de percepción remota como LIDAR y las técnicas de monitoreo por video como Argus Stations son tecnologías más avanzadas que tienen gran potencial de uso en un futuro, pero indistintamente del equipo que sea utilizado, cualquiera de ellos brinda la información esencial para la descripción y análisis del perfil de playa aunque con distinto grado de precisión.

El levantamiento de uno o varios perfiles de playa en una fecha y lugar específicos solo aporta información descriptiva de forma instantánea, se trata solamente de un registro “fotográfico” en distintos momentos, pero para lograr resultados con más probabilidad de conducir a explicaciones sobre procesos y mecanismos en el sistema costero, se necesita llevar a cabo un programa de levantamiento de perfiles de acuerdo ciertos objetivos previamente definidos. Emplear algunos criterios como periodicidad, métodos, procesamiento y análisis de la información de los perfiles de playa de forma sistemática es lo que podría considerarse como *monitoreo* de la línea de costa.

En el estudio de Cooper *et al.* (2000) destacan algunos puntos importantes a tomar en cuenta durante el primer levantamiento de los perfiles de playa para que tengan utilidad comparativa en posteriores mediciones, al respecto mencionan que: a) se deben colocar marcas permanentes e inequívocas en cada una de las estaciones, b) las mediciones posteriores deben seguir la misma dirección de la línea del perfil original y c) todos los promontorios y rasgos sobresalientes a lo largo de la línea del perfil de playa (rasgos geomórficos) deben ser registrados.

3.2.1 Levantamiento de perfiles en campo

El levantamiento de perfiles topográficos realizado para este estudio se efectuó durante las estaciones de verano e invierno que corresponden, respectivamente, a los períodos de lluvias y secas en la región. En verano, se llevaron a cabo durante el mes de julio, y en invierno, durante el mes de febrero. La Tabla 3.1 enlista los sectores de costa en los que fue dividida el área de estudio, los perfiles correspondientes y el cronograma de los levantamientos topográficos realizados.

Tabla 3.1 Registro cronológico del levantamiento de perfiles topográficos de playa.

No.	Sector	Perfil topográfico	Fecha y hora	
			Verano	Invierno
1		Puerta de Palapares	31/07/2010 15:00	09/02/2011 06:57
2	A. Canal de Cuautla-Boca Ensenada	Santa Cruz	31/07/2010 12:56	09/02/2011 08:20
3		San Andrés	31/07/2010 11:20	09/02/2011 09:34
4		Boca Ensenada	30/07/2010 18:20	08/02/2011 15:35
5	B. Boca Ensenada-Boca Camichín	Barra Camichín 1	30/07/2010 17:04	08/02/2011 17:09
6		Barra Camichín 2	30/07/2010 14:39	09/02/2011 13:09
7	C. Boca Camichín-Boca Asadero	El Sesteo	30/07/2010 11:53	08/02/2011 12:25
8		Playa Los Corchos	30/07/2010 10:15	08/02/2011 10:15
9		Boca Asadero	28/07/2010 14:31	07/02/2011 18:02
10	D. Boca Asadero-Boca Cegada	Playa Coyotes 1	28/07/2010 09:14	07/02/2011 13:19
11		Playa Coyotes 2	28/07/2010 11:43	07/02/2011 14:13
12		Playa Coyotes 3	29/07/2010 13:20	07/02/2011 11:08
13	E. Boca Cegada-Boca El Vigía	Playa del Rey 1	29/07/2010 09:39	06/02/2011 14:15
14		Playa del Rey 2	29/07/2010 11:17	06/02/2011 12:56
15		Playa del Rey 3	27/07/2010 13:08	05/02/2011 14:26
16		Playa del Rey 4	27/07/2010 09:05	05/02/2011 16:06
17	F. Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	Playa El Borrego	26/07/2010 10:00	09/02/2011 17:52

Como se ha mencionado antes, la costa objeto de esta investigación está interrumpida por varias bocas de marea que actúan como fronteras naturales para la continuidad de los procesos de transporte de sedimentos en ambas direcciones respecto a la orientación de la costa, tanto longitudinal como transversalmente. Esta condición morfológica es la que ha inducido la división de la costa en seis sectores, en concordancia con las seis entrantes de marea (Anexo I Mapa: Regionalización de la línea de costa considerando criterios geomórficos).

La localización de los perfiles topográficos de playa responde a varias causas, en primer lugar, los perfiles se localizan en zonas adyacentes a las bocas por considerar que dichas zonas reflejan con mayor confiabilidad los cambios que ocurren en las distintas estaciones del año; y en segundo lugar, cuando los sectores costeros tienen una gran extensión como el caso del primero (A. Canal de Cuautla – Boca Ensenada) se ha intentado dar cuenta de los cambios considerando solo puntos representativos del sector en cuestión en función de la morfografía de la línea de costa y de la presencia de entradas y salidas de mareas y sedimentos. (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Localización de los perfiles topográficos de playa.

Número	Sector	Perfil topográfico	Coordenadas UTM	
			x	y
1		Puerta de Palapares	433,043	2,444,498
2	A. Canal de Cuautla-Boca Ensenada	Santa Cruz	433,803	2,431,447
3		San Andrés	440,092	2,419,675
4		Boca Ensenada	446,661	2,412,299
5	B. Boca Ensenada-Boca Camichín	Barra Camichín 1	445,194	2,411,271
6		Barra Camichín 2	448,618	2,403,905
7	C. Boca Camichín-Boca Asadero	El Sesteo	449,319	2,402,440
8		Playa Los Corchos	451,874	2,396,761
9		Boca Asadero	453,780	2,392,555
10	D. Boca Asadero-Boca Cegada	Playa Coyotes 1	454,735	2,390,948
11		Playa Coyotes 2	455,238	2,390,511
12		Playa Coyotes 3	458,106	2,388,292
13	E. Boca La Cegada-Boca El Vigía	Playa del Rey 1	458,740	2,387,920
14		Playa del Rey 2	459,148	2,387,655
15		Playa del Rey 3	467,463	2,382,679
16		Playa del Rey 4	469,039	2,381,247
17	F. Boca El Vigía-Boca El Borrego	Playa El Borrego	471,410	2,380,080

Otra causa que influyó en la localización de los perfiles, fue la dificultad de acceder por tierra a algunos sitios previamente planeados debido a circunstancias como la obstrucción del paso por vegetación, falta de caminos adecuados, y configuración local de los humedales, por mencionar algunas.

En todo caso, al seleccionar sitios de levantamiento de perfiles en playas es recomendable una visita previa al área de estudio para identificar lugares representativos con base en evidencias morfológicas de variaciones durante la escala temporal que se haya seleccionado. Otra forma de reconocer esos lugares es realizar entrevistas informales con los habitantes de las poblaciones asentadas en las playas (cuando es posible), teniendo en mente que los pobladores pueden conocer mejor que nadie el comportamiento del sistema costero en el que han habitado por años.

El material y equipo utilizado para el levantamiento de perfiles por nivelación consistió en un nivel automático marca Sokkia, estatal de 4 m de altura graduado en centímetros, cinta métrica y GPS con precisión de ± 3 m. El nivel automático permite obtener diferencias de altura entre puntos mediante mediciones directas de distancia con referencia a un plano horizontal.

Siguiendo la metodología para levantamiento de perfiles de playa de Emery (1961) citada en el *Manual del Voluntario para el Monitoreo de Perfiles de Playa en Maine, Estados Unidos (2011)*, la línea de perfil se registró de manera perpendicular al ancho de la playa, en donde se tomó como límite hacia el continente el inicio de la vegetación o de dunas frontales y hacia el mar, la zona de rompiente de oleaje (Figura 3.1)



Figura 3.1 Localización y ajuste del nivel automático en los sitios seleccionados. A) Línea de vegetación en el perfil 17 Playa El Borrego, es el criterio utilizado para todas las estaciones como punto de referencia y de inicio. B) Lectura de un punto en el perfil de playa 15 Playa del Rey, dicho punto corresponde al escalón de berma, un indicador heurístico de la posición de la línea de costa.

En cada estación de registro, durante el primer levantamiento topográfico *de primera vez* se establecieron marcas semipermanentes en el límite de vegetación que indican el punto de partida de la línea que seguirá el perfil hacia el mar, como referencia para posteriores levantamientos. Las marcas semipermanentes consistieron en varillas de hierro de media pulgada de espesor por 2 metros de longitud, fueron sepultadas en la línea de vegetación incipiente con el propósito de evitar su saqueo. Una vez colocadas, se tomó registro de sus coordenadas de localización con el GPS y se anotaron distintos elementos de referencia para su fácil localización (árboles cercanos, dunas semi-móviles, construcciones, entre otros).

El nivel automático fue colocado en una posición intermedia (método de punto medio) entre ambos extremos de la línea de levantamiento, tomando como punto de partida en el continente el límite de vegetación y como punto final en el mar, el inicio de la zona de rompiente (Figura 1.4). Se adoptó ese método de nivelación considerando la distancia máxima de enfoque que permitió el aumento (24x) del nivel automático.

Cuando se seleccionó la posición de la estación, el nivel automático fue ajustado con los tornillos nivelantes para obtener un plano visual horizontal, apoyándose con un instrumento denominado nivel esférico, localizado en la base nivelante. La orientación de la línea de levantamiento topográfico se definió con un rumbo que también fue registrado en el formato correspondiente para posteriores levantamientos (Tabla 3.3). Concluido el proceso de calibración del equipo se empleó el GPS para registrar la localización del nivel.

Cada lectura registrada durante ambas campañas correspondió a la posición de algunos indicadores *heurísticos* presentes en la morfología de la playa a lo largo de la línea de perfil desde la zona de posplaya hasta la anteplaya; especialmente, las lecturas fueron tomadas en los rasgos geomórficos como la pendiente, el pie y la cresta de duna, el escalón de berma, el escarpe de erosión y la berma. Además, también se tomó registro de cada zona del perfil de playa en la columna correspondiente (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Formato de registro de información durante el levantamiento de un perfil de playa.

Perfil 17. Playa El Borrego (Sector F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal)				
Punto	Distancia horizontal (m)	Distancia vertical (m)	Zona del perfil	Rasgos geomórficos
1	0	0		
2	5.42	-0.32		
3	6.89	-0.045	Posplaya	
4	12.52	0.105		Cresta de duna
5	15.49	-0.585		Escarpe de erosión
6	39.39	-0.425	Interplaya	Escalón de berma
7	39.72	-0.75		Pendiente
8	45.22	-1.39	Anteplaya	Ruptura de pendiente
9	63.19	-2.395		Escalón de playa

Finalmente, el registro fotográfico de los sitios de levantamiento también se incluye como parte de la descripción de campo por considerarse como una evidencia documental adicional de los cambios de la forma del perfil y de la presencia de elementos morfológicos originados por procesos erosivos o depositacionales.

3.2.2 Análisis de perfiles de playa con BPAT

La necesidad de llevar a cabo el monitoreo de playas con distintos objetivos ha conducido al desarrollo de programas de cómputo que facilitan el almacenamiento, procesamiento y actualización de grandes volúmenes de datos obtenidos, independientemente de la técnica usada en el levantamiento en campo de los perfiles de playa.

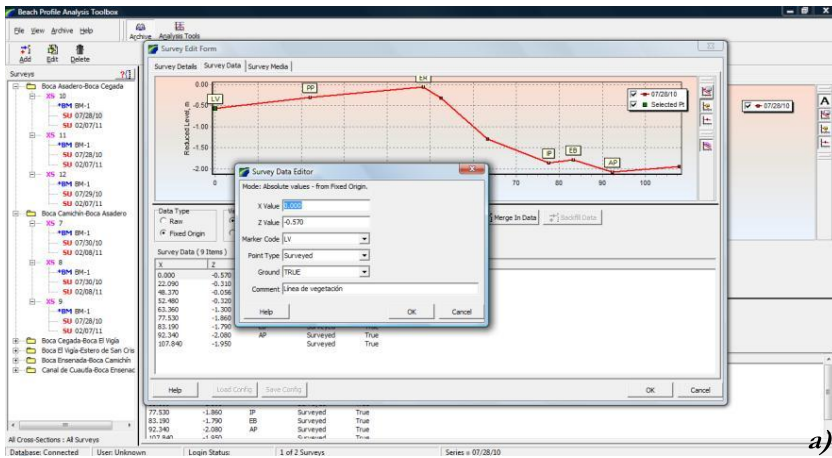
El programa Beach Profile Analysis Toolbox fue seleccionado por su presentación amigable y porque responde a las necesidades de análisis requeridas para esta investigación. BPAT es un software desarrollado por NIWA y Katoa Software Ltd (2009) para almacenar, representar y actualizar series de datos de perfiles además de que también permite calcular otros parámetros de análisis a partir de las mismas como volúmenes de sedimentos, pendientes, *cut/fill*¹ y representaciones gráficas del perfil así como histogramas. BPAT está organizado en dos módulos principales para el almacenamiento y análisis de datos: *Archive* y *Analysis Tools*.

¹ Método para el cálculo de cambio en el volumen de sedimentos en el área de diferencia del trazado de dos perfiles, se calcula la cantidad de sedimentos “ganada” o “perdida” entre dos perfiles del mismo lugar y fecha en función del área formada por los polígonos que dibujan los dos perímetros sobrepuestos de los

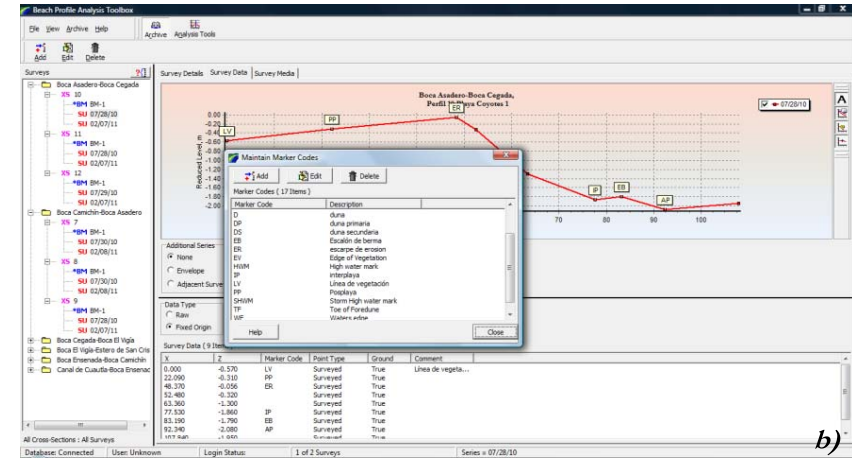
Se utilizó el módulo *Archive* para capturar los datos recabados en los formatos elaborados para trabajo en campo. Este módulo permite registrar información básica como el método de levantamiento, el rumbo, los datos del banco de nivel (Benchmark) y las condiciones atmosféricas, entre otros datos.

En el mismo módulo fueron capturados los datos correspondientes a cada uno de los perfiles en ambas estaciones del año, incluyendo los valores de distancia horizontal (X) y distancia vertical (Z) así como las claves de los rasgos geomórficos y de las zonas del perfil de playa (Marker Code) (Figura 3.3).

perfiles, *cut* representa el área “perdida” de sedimentos mientras que *fill* el área “ganada”. En ambos casos se obtiene el volumen considerando 1m de extensión en el eje Z para obtener las tres dimensiones.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.3 Representación y análisis de los perfiles de playa con BPAT. a) La información recopilada en los formatos de trabajo en campo fue capturada en este software con la opción “Survey Data Editor”; b) Pantalla para capturar los códigos de los rasgos geomórficos u otros indicadores de la posición de la línea de costa registrados durante la salida a campo; c) Se utilizó el módulo Analysis Tools para comparar el cambio en la posición de los diferentes indicadores, además esta herramienta permite apreciar cualitativamente las variaciones en la morfología del perfil en función de varios criterios como la zona del perfil de playa; d) Representación gráfica de los valores de la tasa de sedimentación expresada en m^3/m de acuerdo al análisis por segmentos en dirección horizontal del perfil de playa.

El gráfico del perfil fue trazado con el submódulo *Plot Profiles* del módulo *Analysis Tools* que permite ajustar la escala horizontal y vertical del perfil respecto a un nivel de referencia; el módulo *Analysis Tools* incluye una función de representación gráfica del perfil que permite mostrar u ocultar los códigos de los rasgos geomórficos y de las zonas de playa, lo último resulta sumamente útil en el momento de comparar los perfiles para dar cuenta de los cambios en la morfometría de los mismos.

El cambio en el volumen de sedimentos en cada perfil de una estación con respecto a otra fue calculado con los submódulos *Beach Volume –Vertical Segment Analysis* y *Beach Volume –Horizontal Segment Analysis* también de *Analysis Tools*; ambas son herramientas que permiten obtener otros parámetros como volumen acumulativo de sedimentos, pendiente y *cut/fill* de acuerdo al número y distancia entre segmentos deseados. Todos los parámetros mencionados pueden ser representados en forma gráfica (Figura 3.3).

3.2 Medición de cambios en la posición de la línea de costa

Para determinar el rango de los movimientos de la línea de costa durante las últimas cuatro décadas se seleccionó un procedimiento que, a grandes rasgos, consistió en tres etapas: a) la compilación de datos, b) la identificación y detección de la posición de la línea de costa y c) el cálculo de las tasas de cambio mediante el método de medición de tasa de punto final con la extensión Digital Shoreline Analysis System que desarrollaron Thieler *et al.* (2009) y que es compatible con ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Este método presenta algunas ventajas concernientes con el manejo de la información, en primer lugar, permite almacenar de manera sistemática los datos para futuras actualizaciones y, en segundo lugar, se convierte en potencial fuente de datos básicos para otras investigaciones relacionadas con este tema de estudio.

3.2.1 Compilación de datos

Las fuentes de datos utilizadas para la digitalización de la línea de costa corresponden a los años 1970, 1999 y 2011. Para la primer fecha se seleccionaron las cartas de uso de suelo de INEGI por su disponibilidad en el cubrimiento de toda la línea de costa, se escanearon a una resolución de 600 (dpi) que corresponde a 1.08 m en el terreno por cada pixel según la escala 1:50 000 (Fallas, 2004) para su posterior georreferenciación.

Para la fecha 1999 se utilizaron las cartas topográficas de INEGI en formato vectorial por lo que se adquirieron ya digitalizadas y georreferenciadas. En la Tabla 3.4 se concentra la información cartográfica más importante de las cartas mencionadas, la información generada en escala 1:50 000 corresponde a un nivel de información micro-regional-local, por lo tanto, es válida para el propósito de esta investigación (INEGI, 2005).

Tabla 3.4 Parámetros de la proyección cartográfica de las cartas de INEGI.

Cartas de uso del suelo; Serie I Versión 1; escala 1:50,000; INEGI.					
<i>Clave</i>	<i>Nombre</i>	<i>Fecha de vuelo</i>	<i>Fecha de edición</i>	<i>Sistema de georreferenciación</i>	<i>Procedimiento de compilación</i>
F13C18	Laguna Grande de Mexcaltitán, Nayarit	Noviembre, 1970	1973	Datum horizontal	
F13A88	Laguna de Agua Brava, Nayarit	Octubre, 1970	1974	NAD27; Esferoide Clarke (1866); Proyección	Fotointerpretación y verificación en campo.
F13C28	Villa Juárez, Nayarit	Noviembre, 1970	1973	Universal Transversa de Mercator.	Fotogramétrico
F13C29	San Blas, Nayarit	Octubre, 1970	1974		
Cartas topográficas; escala 1:50,000; INEGI.					
F13C18	Laguna Grande de Mexcaltitán, Nayarit	Enero, 1999	2002	Datum horizontal ITRF92;	Fotointerpretación
F13A88	Laguna de Agua Brava, Nayarit	Junio, 1999	2002	Elipsoide GRS80; Proyección	y verificación en campo.
F13C28	Villa Juárez, Nayarit	Junio, 1999	2002	Universal Transversa de Mercator.	Fotogramétrico
F13C29	San Blas, Nayarit	Diciembre, 1996	2001		

Tabla 3.5 Información correspondiente a cada imagen de Google Earth¹.

<i>Clave</i>	<i>Fecha y hora de captura</i>	<i>Satélite</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>	<i>Fuente</i>
G31				
G41	07/Febrero/2011			
G61	17:36:57	Spot 5		
G81				
G101	17/Enero/2011 17:40:58	Spot 4	2.5	Spot Image
G121				
G131	15/Noviembre/2010 17:52:42	Spot 5		
G141				

¹Fuentes de datos: Google Earth_{a,b,c,d,e} (2011); Google Earth_{f,g,h} (2010).

Una segunda fuente de datos en la detección de la línea de costa fueron las imágenes satelitales de alta resolución de Google Earth, año 2011, tomadas en distintas fechas de acuerdo a los datos incluidos en cada una de las imágenes procesadas por la agencia de información satelital Spot Image (Tabla 3.5). Las imágenes se recuperaron con una altura de vuelo tal, que se traduce en el terreno a una escala 1:2 700 correspondiente a una resolución por pixel de 0.21 m. De acuerdo a Fallas (2004 y 2009), las imágenes obtenidas presentan una calidad superior suficiente para ser georreferenciadas posteriormente en el sistema de información geográfica y han sido sometidas previamente a un proceso de ortorrectificación, sobre lo anterior señalan que:

“Las imágenes de alta resolución de Google Maps son ortoimágenes y por lo tanto se ha removido de las mismas el efecto de desplazamiento del relieve. Por esta razón se pueden georreferenciar utilizando cualquier método basado en puntos de control.”

Como un primer paso para identificar la posición de la línea de costa en diferentes fechas, es necesario hacer coincidir la información cartográfica en una misma escala de representación y sistema de proyección cartográfica. En este caso, se utilizó la extensión *Georeferencing* del módulo ArcMap que se encuentra en el sistema de información geográfica ArcGIS versión 9.3 (ESRI, 2008), en específico, para georreferenciar y ortorrectificar las cartas de uso de suelo y las imágenes de Google Earth.

Se había mencionado antes que las cartas topográficas de INEGI se obtuvieron ya escaneadas y georreferenciadas, por lo tanto, se utilizaron como mapas base para asignar los puntos de control correspondientes a las otras fuentes de datos. Principalmente, se consideraron algunos elementos antrópicos incluidos en las cartas topográficas como puntos de control, por ejemplo, entronques de caminos y carreteras, la traza de viviendas de los poblados, los linderos de terrenos y canales artificiales en el caso de los cuerpos de agua.

Para cada carta topográfica se utilizaron, en promedio, de 30 a 40 puntos de control y para las imágenes de Google Earth se asignaron de 30 a 35 puntos. El rango de error en la georreferenciación estimado para cada una de las cartas de uso de suelo e imágenes de Google Earth es de 1 a 3 m de acuerdo con valores calculados por el método de raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMS, por sus siglas en inglés) mediante el software ArcGIS.

Es cierto que el desplazamiento vertical debido a la exageración del relieve no puede ser eliminado en su totalidad, pero ha de considerarse que por tratarse de una planicie, este tipo de error no es significativo y permite obtener cierta precisión en la digitalización de la línea de costa (Moore, 2006). Otros autores también coinciden en la ventaja de utilizar estas técnicas cuando el relieve es bajo y relativamente homogéneo, como es el caso de la planicie fluvial del sistema deltaico San Pedro-Santiago, Brocal *et al.* (2005) en un trabajo con objetivos similares en el que emplearon imágenes de satélite y SIG's citando a Pardo y López García, (2008) mencionan al respecto que:

“Para zonas llanas, en las que las distorsiones asociadas a la diferencia de paralaje no llegan a ser significativas, el empleo de técnicas de corrección geométrica mediante ajustes polinomiales de segundo grado basados en la localización de puntos de control en un documento de referencia se ha demostrado útil y con un grado de precisión más que aceptable.”

El paso final en esta primera etapa es crear un índice de imágenes de las tres fuentes de datos espaciales para dar inicio al trazado digital de la posición de la línea de costa en ellas.

3.2.2 Identificación y detección de la posición de la línea de costa

Se asume que las líneas de costa representadas en el mosaico de cartas de uso de suelo correspondientes a 1970 y 1999 de INEGI han sido identificadas con estrategias de interpretación visual, considerando como indicador de la posición de la línea de costa la marca máxima de la línea húmeda/seca que corresponde a la línea de marea alta.

Por lo tanto, el mismo indicador es el que se utilizó para identificar la posición de la línea de costa en las imágenes de Google Earth, el criterio adoptado para interpretar visualmente la línea de marea alta fue el cambio tonal entre la arena húmeda y seca en la playa.

La detección de la línea de costa de las tres fechas se realizó de forma manual con la extensión *Editor* de ArcGIS 9.3; la escala de representación empleada para delinear la posición de la línea de costa fue de 1:10 000 utilizando la proyección Universal Transversa de Mercator Zona 13 Norte en el Datum Norteamericano de 1983 (Figura 3.4).

Como se mencionó antes, la detección de la línea de costa al ser una estrategia subjetiva en la que interviene la percepción de cada usuario, se recomienda que esta acción sea llevada a cabo por una sola persona porque esto puede influir directamente al momento de calcular la incertidumbre relacionada con los errores acumulados en las fases de compilación de datos e identificación y detección de su posición. En el caso particular de este estudio, la detección fue realizada únicamente por la autora de este trabajo.

Al respecto Fletcher *et al.* (2003) definen dos tipos de incertidumbre en la precisión de la posición de las líneas de costa, la primera relacionada con su condición de límite inestable en el espacio y en el tiempo (*positional uncertainty*) y la segunda con la medición de su posición en las fuentes de datos utilizadas y con el procedimiento llevado a cabo por cada usuario en su detección (*measurement uncertainty*).

Considerando ambos tipos de incertidumbre Fletcher *et al.* (2003) proponen estimar los errores de medición y posición a partir de una ecuación simple que considera las fuentes de error de cada fuente de datos empleados en cada estudio específico, para fines de esta investigación ha sido adaptada de la siguiente forma:

$$I_t = \pm\sqrt{Dp^2 + Tp^2 + Gr^2 + Cd^2}$$

En donde:

I_t =Incertidumbre total

Dp^2 =Digitalización en pantalla

Tp^2 =Tamaño de pixel

Gr^2 =Georreferenciación

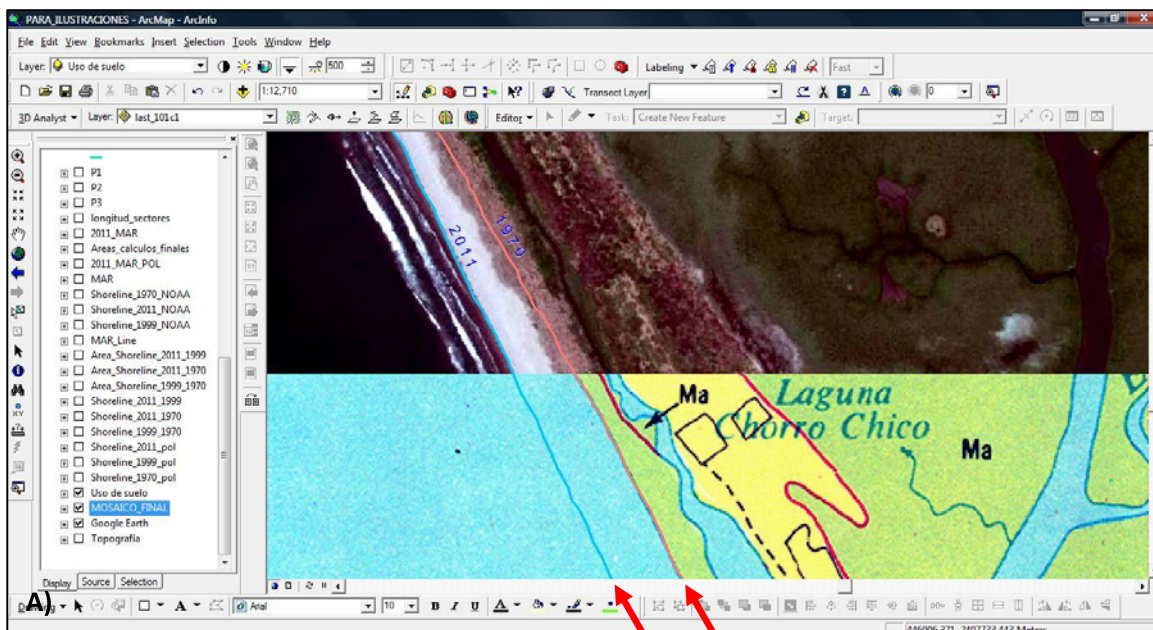
Cd^2 =Compilación de datos

La consideración de los valores de la incertidumbre total (I_t) y por año (I_a) en el cálculo de las tasas de cambio es fundamental para conocer el margen de error al analizar las variaciones en cada lugar de la franja de costa estudiada a fin de tener elementos de referencia para contrastar los valores de tasas de cambio obtenidos en subsecuentes etapas de la metodología (Tabla 3.6).

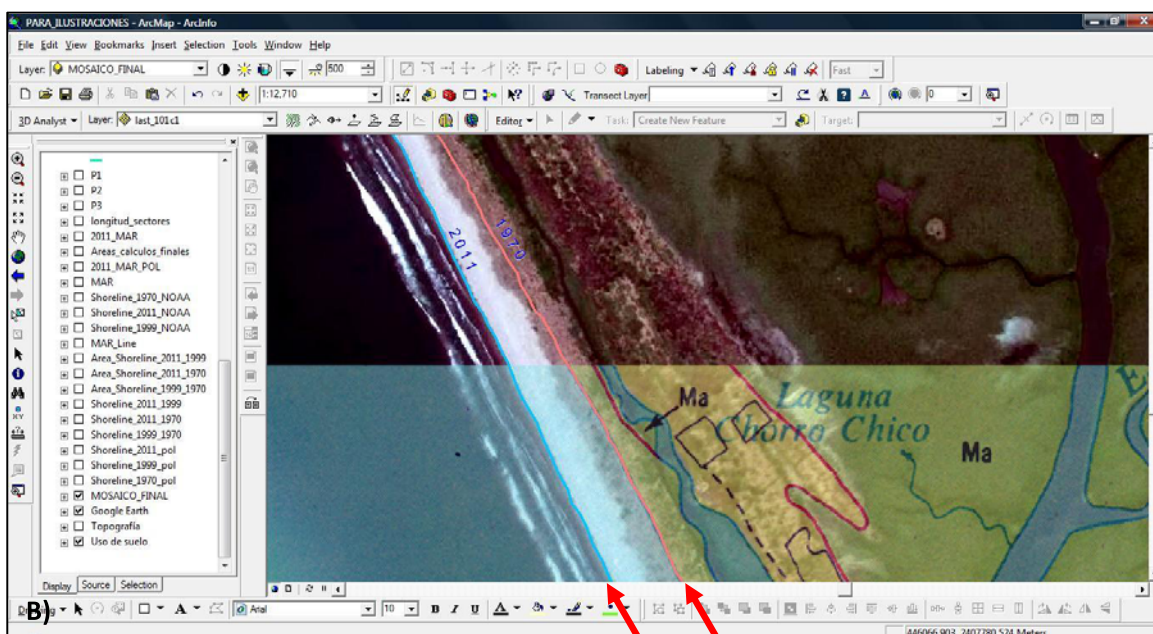
Tabla 3.6 Incertidumbre relacionada con los errores de posición y de medición (m)

Fuente de error	Cartas de uso de suelo, 1970 (m)	Cartas topográficas, 1999 (m)	Imágenes de satélite, 2011 (m)
¹ Digitalización en pantalla (Dp)	±3	±3	±3
Tamaño de pixel (Tp)	±6.90	±9.85	±4.67
² Georreferenciación (Gr)	±3	----	±3
³ Compilación de datos (Cd)	±25.4	±25.4	----
Incertidumbre total (I _t)	±26.66	±27.40	±6.30
⁴ Incertidumbre por año (I _a)	± 0.65	± 0.66	± 0.15

¹Para el caso del elemento Dp en las tres fuentes de datos se consideró el valor obtenido por los mismos autores después de una serie de repeticiones. ²Valor promedio del Error Medio Cuadrático generado por ArcGIS. ³Se consideró un valor similar al establecido en EE.U. (USGS) en el cálculo del error derivados del proceso de compilación de datos en la elaboración de sus cartas (Fallas, 2001). ⁴I_a es el producto de dividir el valor de I_t entre el período de años de los que se dispone información en este caso, 41 años.



Líneas de costa



Líneas de costa

Figura 3.4 Detección de la posición de la línea de costa en la Barra Camichín. a) En algunas de las imágenes de Google Earth es posible observar hasta cuatro diferentes marcas de agua, en este segmento se aprecia con claridad la marca máxima de la línea húmeda/seca; este es el mismo indicador utilizado por el INEGI en sus cartas de uso de suelo al detectar las líneas de costa por fotointerpretación. b) Nótese la coincidencia en ambas imágenes de algunos rasgos del relieve como evidencia de la precisión en la georreferenciación y también el desplazamiento de la línea de costa de una fecha con respecto a otra.

3.2.3 Determinación areal y lineal del desplazamiento de la línea de costa

La medición de los cambios en la posición de la línea de costa se realiza calculando la diferencia en distancia que hay entre las diferentes líneas de costa en sentido perpendicular entre sí mismas. Por esa razón es que se requieren como mínimo dos líneas de costa de distinta fecha para cuantificar las variaciones en su posición.

Independientemente del método estadístico empleado para calcular las tasas de cambio, la primera acción que se debe llevar a cabo es medir la distancia que hay entre las diferentes líneas de costa a partir de formas geométricas simples como una línea o un polígono. En la actualidad, los métodos de polígonos y de transectos son los que se utilizan con mayor frecuencia.

3.2.4 Método de polígonos y de transectos

En el caso del método de polígonos, una vez detectadas las líneas de costa se obtienen los polígonos que representan el área de “pérdida” (retroceso) o “ganancia” (avance) de terreno entre dos líneas de costa; algo similar a la técnica *cut/fill* que ya se ha mencionado antes, solo que en este caso lo que interesa es obtener sólo el área de cada polígono en cualquier unidad (m², hectáreas, km², etc.). Este proceso es relativamente sencillo de ejecutar con ArcGIS 9.3.

Calculada el área de cada polígono de avance o retroceso, su valor se divide entre la distancia longitudinal de la línea de costa que abarca dicho polígono, ese valor será el desplazamiento de la línea de costa en sentido lineal y perpendicular a la orientación de la misma. El nuevo valor calculado se divide ahora entre el período de años (horas, días, meses, etc.), transcurrido entre cada fecha de línea de costa, el producto obtenido representará la tasa de cambio que será expresada de acuerdo a la unidades empleadas.

Este método para obtener distancias de desplazamiento entre líneas de costa solo admite cálculos para dos líneas de costa, por lo tanto, tiene el inconveniente de que el único método de medición de tasas de cambio admitido es el de tasa de punto final; otro inconveniente es que al utilizar polígonos como base para realizar los cálculos, se pierde detalle en la representación de la información a cierta escala espacial, sobre todo al tratarse de extensos segmentos de línea de costa. Recordemos, al respecto, que cada polígono representa áreas de “perdida” o “ganancia” de terreno (Figura 3.5).

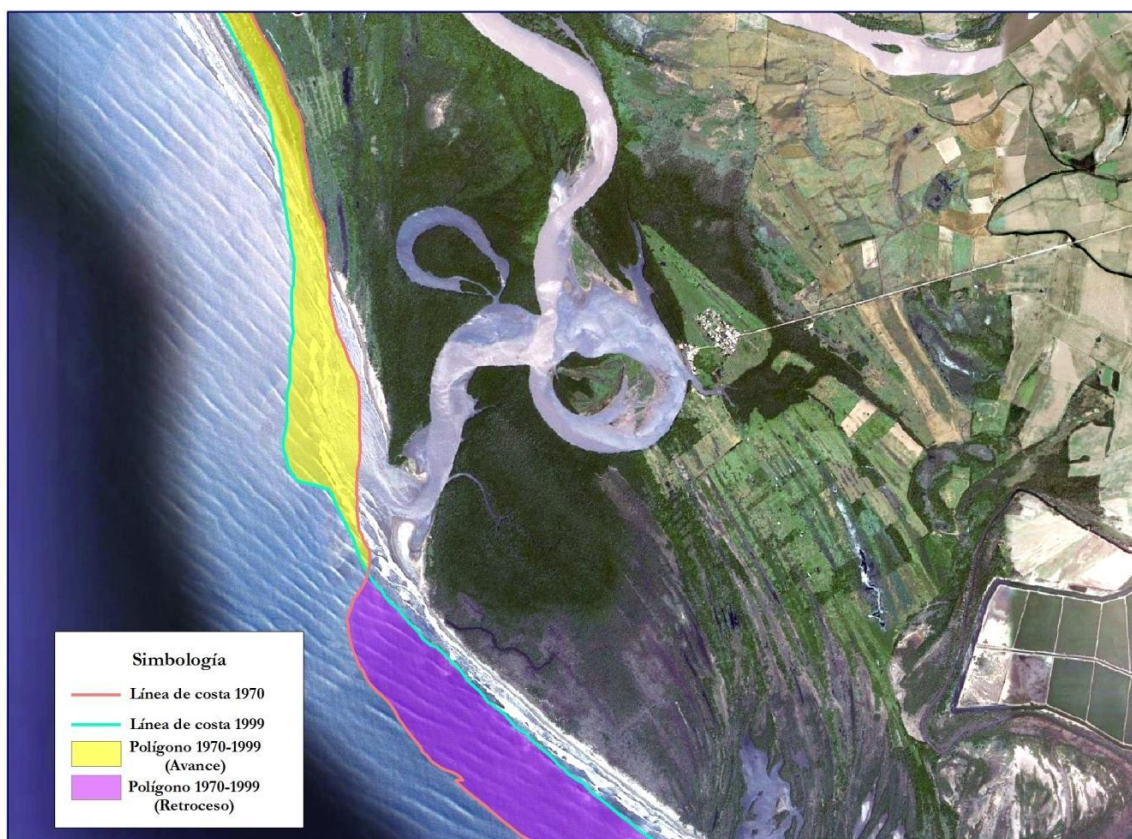


Figura 3.5 Polígonos de avance y retroceso en la desembocadura del río Grande de Santiago (Boca Asadero). La extensión de los procesos no es homogénea a lo largo de la línea de costa, por lo tanto, este método aunque útil, no resulta muy eficiente si se quiere conocer la magnitud de desplazamiento en sitios específicos.

Otro método ampliamente empleado en el cálculo del desplazamiento de la línea de costa es el de *transectos*, ha sido utilizado por lo menos desde hace dos décadas en diversos estudios que implican la obtención de tasas de cambio (Dolan *et al.*, 1991; Smith y Zarillo, 1990). Consiste en trazar transectos perpendiculares a la posición de las diferentes líneas de costa con espacio, entre sí mismos, de acuerdo a las necesidades requeridas por el usuario, con una extensión similar para todos los transectos y de suficiente longitud para intersectar todas las líneas de costa desde el punto de partida que es línea de base.

Una línea de base es una sucesión finita de puntos que funciona como eje de intersección común para todos los transectos. La posición de la línea de base puede ser hacia el mar o hacia el continente respecto a la línea de costa, los criterios para trazarla son muy amplios, algunos pueden ser los rasgos geomórficos presentes en la costa o las estructuras de protección de la costa. La decisión de los criterios adoptados para determinar su posición también depende de los objetivos particulares de cada estudio.

Una línea de base puede estar referida a la línea de vegetación; a la cima de un acantilado; a un valor de isobata, cuando se dispone de la batimetría del lugar con escalas grandes; un datum de marea; o bien, puede ser simplemente una línea paralela a la primer línea de costa hacia el mar o continente y también se puede emplear una de las mismas líneas de costa identificadas.

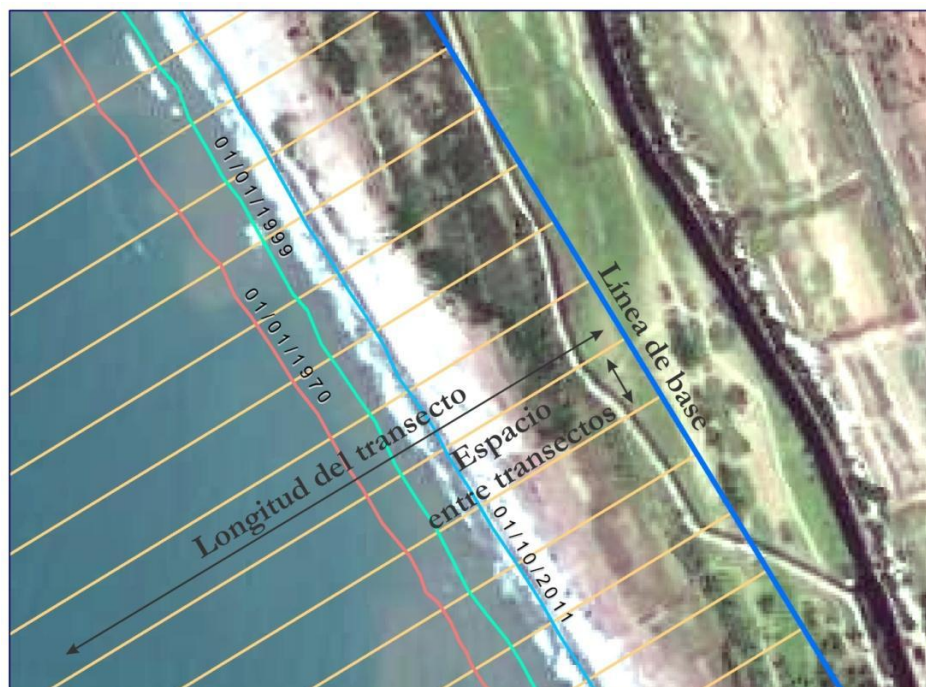


Figura 3.6 Transectos y línea de base correspondientes a la playa El Colorado (Sector A. Canal de Cuautla-Boca Ensenada). La línea de base utilizada en esta investigación no está referida a ningún rasgo geomórfico de la playa, se trazó siguiendo la orientación general de la línea de costa hacia el continente (onshore), tiene un sistema de referencia basado en el ITRF92, Esferoide GRS80. En algunos lugares que cuentan con programas de manejo de costas, como Carolina del Sur (EE.UU.), se han establecido criterios legales para la creación de la línea de base e incluso se llevan a cabo programas de levantamiento de perfiles de playa para monitorear su posición porque también tiene un uso jurídico en el marco de límites estatales de jurisdicción (Harris et al., 2009).

Siempre y cuando la línea de base tenga un sistema de referencia espacial en formato digital o análogo, esta será válida y susceptible de ser utilizada para adicionar o actualizar futuras mediciones; en la mayoría de los casos, esa es la función que cumple una línea de base además de servir como línea sucesiva de intersección para todos los transectos.

La magnitud de desplazamiento que hay entre la intersección de una línea de costa de determinada fecha con otra a lo largo de cada transecto es la distancia que hay de un punto a otro de intersección.

3.2.5 Método de transectos y cálculo de tasas de cambio con DSAS

Conociendo el valor de la distancia que hay entre dos o más líneas de costa se puede calcular la velocidad de desplazamiento cuyo índice de expresión son las tasas de cambio. Para tal fin también se han desarrollado algunos programas de cómputo que facilitan tanto el proceso de medición de distancia como las tasas de cambio.

DSAS es un software libre desarrollado por Thieler *et al.* (2009), funciona como una aplicación compatible con las versiones de ArcGIS 9.2 y posteriores que permite calcular la distancia entre dos líneas de costa y obtener las tasas de cambio mediante cálculos estadísticos para distintas series de tiempo, se basa en datos vectoriales y su uso no solo se limita a líneas de costa; en general, DSAS puede realizar las mismas operaciones para otros límites unidimensionales presentes en la superficie terrestre.

DSAS permite llevar a cabo las mediciones de distancia de desplazamiento con el método de *transectos* y realiza las estadísticas correspondientes para obtener las tasas de cambio utilizando la información espacial y temporal de los puntos de intersección entre las posiciones de las líneas de costa y los transectos trazados.

Para el presente estudio se trazaron 1 931 transectos con una longitud de 1 500 m y una separación entre sí de 50 m. El criterio para establecer la separación entre transectos fue que tuvieran una densidad suficiente que permitiera apreciar las tasas de cambio en sitios “críticos” de avance y retroceso; el valor de la longitud de los transectos debe ser proyectada hasta la posición mas alejada que ha ocupado la línea de costa en ocasiones previas (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Distribución de los transectos a lo largo de la línea de costa, orientación Norte-Sur.

Sector de costa	Longitud (km)	Transectos	
		Número ¹	Total ²
A. Canal de Cuautla-Boca Ensenada	52.62	1-1 044	1 044
B. Boca Ensenada-Boca Camichín	9.12	1 045-1 245	201
C. Boca Camichín-Boca Asadero	11.96	1 246-1 476	231
D. Boca Asadero-Boca Cegada	4.53	1 477-1 595	119
E. Boca Cegada-Boca El Vigía	15.35	1 596-1 875	280
F. Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	2.66	1 876-1 928	53

¹La columna Número se refiere al número de identificación asignado a cada transecto trazado en orden consecutivo siguiendo una orientación Norte-Sur. ²La columna Total indica la suma de transectos que abarcó cada uno de los sectores costeros. Fue necesario trazar un transecto cada 50m en función de la extensión del sector F, solamente 2.6 km, en contraste con los 52.62 km del sector A.

En este punto de la metodología uno se puede enfrentar a ciertas cuestiones de entre las que se mencionan algunas. Esta línea de costa está interrumpida por cinco bocas de marea de distintas anchuras, por lo tanto, en las tres fuentes de datos había sido digitalizada considerando dichos elementos. Sin embargo, al momento de trazar los transectos, DSAS sólo los dibuja en donde detecta la presencia de todas las líneas de costa a ser intersectadas; por lo tanto, en donde hubo migración de bocas la interrupción de la continuidad de las líneas impidió el trazo de los transectos.

Una recomendación ante esta situación es digitalizar las líneas de costa de forma continua para que los transectos sean trazados también de manera ininterrumpida, al momento de calcular las tasas de cambio se puede proceder de manera específica con la información de los transectos correspondiente a las bocas, este tema será contemplado más adelante.

Otra cuestión es, que de acuerdo a la orientación general de la línea de costa en estudio la línea de base seguirá una orientación paralela o semi-paralela, entonces, como los transectos deben ser perpendiculares a la línea de costa en los sitios con demasiada angulosidad los transectos pueden llegar a intersectarse entre sí en algún punto formando un vértice. Si dicha intersección no interfiere con la posición de las líneas de costa no representará mayor problema para los cálculos, caso contrario, la extensión permite editar las rectas de los transectos para cambiar su orientación así que el problema también podrá ser resuelto (Figura 3.7).

El comando *Calculate Statistics* de la misma extensión permitió calcular tanto las distancias de desplazamiento como las tasas de cambio entre las líneas de costa. Seleccionando las opciones "Shoreline Change Envelope (SCE)" y "Net Shoreline Movement (NSM)" fue posible obtener el valor del desplazamiento de las líneas de costa en cada transecto; la primera opción no considera las fechas a las que corresponden las líneas, sólo arroja los valores de la mayor distancia entre las diferentes líneas mientras que la segunda opción considera las distancias en función de la fecha más antigua y la más reciente. Estos cálculos son relevantes para fines de representación de información y para conocer con detalle los valores de desplazamiento en algún punto específico (Figura 3.8).

Finalmente, con la opción "End Point Rate (EPR)" se calculó la tasa de punto de final para las líneas de costa 1970-1999, 1999-2011 y 1970-2011, se procedió de esta manera porque este método sólo permite hacer los cálculos para dos líneas de costa. Aunque DSAS permite calcular las tasas de cambio con otros métodos de medición, no hay que olvidar que se debe tener la información suficiente así como conocer los criterios necesarios para elegir el método que se considere más adecuado.

DSAS arroja los valores correspondientes a las tasas de cambio por cada transecto en una tabla de información de formato compatible con Excel y Grapher (Golden Software, 2009), entre otros programas de cómputo, para poder llevar a cabo tanto el análisis como la representación gráfica de la información (Figura 3.9).

En este caso, los datos obtenidos fueron procesados con el software Grapher para su representación gráfica, es en esta parte de la metodología donde es posible tomar decisiones con respecto a los valores correspondientes a las bocas de marea y a otros elementos naturales o artificiales presentes en la línea de costa; en nuestro estudio esa información si fue tomada en cuenta para su posterior análisis por las causas que se mencionarán en posteriores secciones.

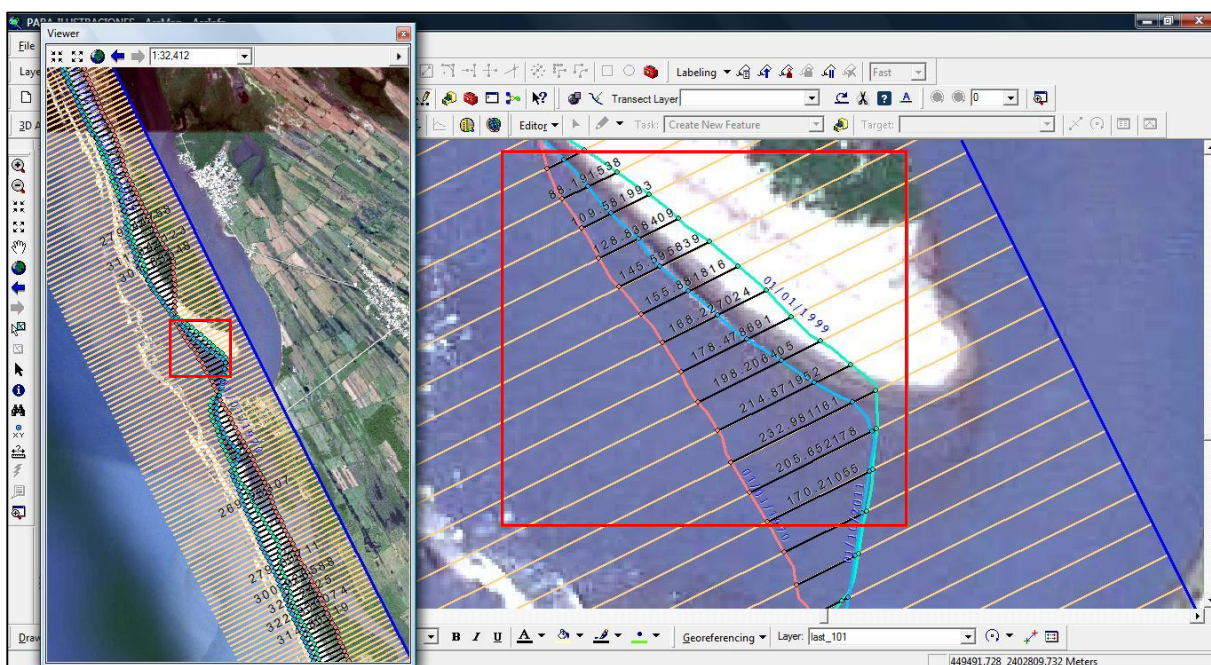


Figura 3.7 Intersecciones entre los transectos y las líneas de costa de 1970, 1999 y 2011 en la desembocadura del río San Pedro (Boca Camichín). La distancia de desplazamiento se mide entre las intersecciones de una línea de costa con respecto a otra en cada transecto, no desde la línea de base. El cálculo de la tasa de cambio de las líneas 1970-2011 se realiza dividiendo la distancia de desplazamiento (resaltada en color negro en la imagen) entre el tiempo transcurrido, en este caso 41 años; este es el mismo procedimiento utilizado para los dos periodos restantes (1970-1999 y 1999-2011).

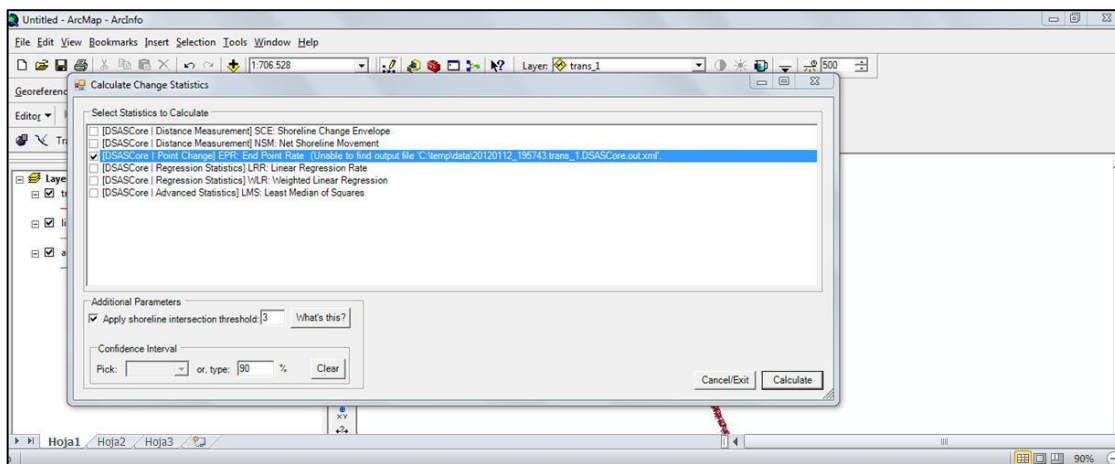


Figura 3.8 Cálculo de tasas de cambio con la opción Calculate Change Statistics. Los métodos de medición que incluye DSAS, además de la tasa de punto final, son: regresión lineal, regresión lineal ponderada y mínimos cuadrados promedio.

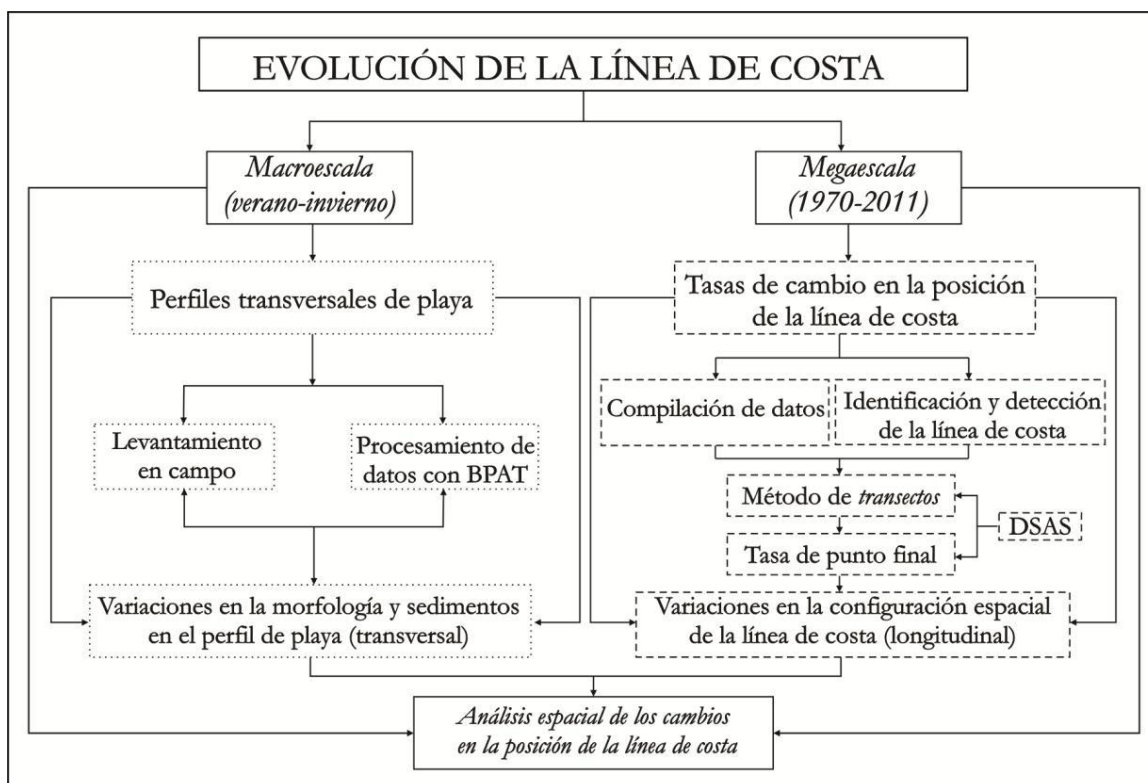


Figura 3.9 Métodos utilizados en este estudio para el análisis de la evolución de la línea de costa en dos escalas de tiempo. Elaboración propia.

IV.RESULTADOS Y OBSERVACIONES

En primer lugar se presentan los resultados de las tasas de cambio obtenidas para cada uno de los seis sectores en que fue dividida el área de estudio; los mapas y gráficos generados ilustran el comportamiento tanto de la posición de la línea de costa como de las bocas de marea para los tres diferentes períodos de estudio: inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).

En una segunda parte se describen los resultados del análisis de perfiles de playa, llevados a cabo durante julio de 2010 y febrero de 2011, que se realizó en función de la comparación de los cambios registrados en la morfología y tasa de sedimentos de las diferentes zonas del perfil de playa correspondientes a cada uno de los sectores en ambas fechas.

4.1 Evolución de la línea de costa durante las últimas cuatro décadas

Para dar una panorama general de las características de los cambios en la línea de costa las tasas de cambio fueron agrupadas de acuerdo a tres tipos de comportamiento de la costa: avance, retroceso o estable. Aunque la cuantificación de dicho comportamiento es algo subjetivo, en un intento por tratar de homologar criterios en el establecimiento de los rangos de cambio se adoptó la clasificación que utilizaron Absalonsen y Dean (2010; 2011) para caracterizar los cambios en las playas arenosas del estado de Florida en EE.UU, dichos rangos de velocidad de cambio quedaron establecidos de la siguiente manera:

Avance: $> +0.15$ (metros/año)

Retroceso: < -0.15 (metros/año)

Estable: $<-0.15 \rightarrow +0.15$ (metros/año)

Es decir, los transectos de la línea de costa con tasas de más de $+0.15$ m/a se consideraron en avance, con valores inferiores a -0.15 m/a fueron colocadas en el rango retroceso y los transectos con tasas de entre -0.15 y $+0.15$ m/a se consideraron estables. Se realizó un total de 5 782 cálculos de tasas para cubrir los tres períodos y los 1 931 transectos.

El orden de presentación de los resultados en cada uno de los sectores es como sigue: en primer lugar se mencionan los promedios de las tasas de cambio y la cantidad de metros lineales del ancho de playa que se hayan ganado o perdido. En segundo lugar, se hace referencia al predominio de los procesos de avance, retroceso o estabilidad según el porcentaje de transectos con valores dentro de la clasificación mencionada. En tercer lugar, se describe el cambio de la posición de la línea de costa en función de las observaciones realizadas en las fuentes de datos utilizadas, de la línea dibujada en el gráfico de tasas de cambio y de las líneas de costa representadas en el mapa. Lo anterior siguiendo una secuencia cronológica de acuerdo a los períodos estudiados.

Los resultados encontrados se sintetizan en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3. En secciones posteriores se describen los cambios en la posición de la línea de costa para cada uno de los sectores, el orden de presentación es de latitud norte a sur.

4.1.1 Sector A: Canal de Cuautla – Boca Ensenada

Su aspecto fisiográfico es de una playa continua con un cordón frontal de dunas pioneras adyacente a la planicie fluvio-deltaica de los ríos San Pedro-Mezquitla, Bejuco y Rosamorada, comienza en la margen norte de la boca artificial Canal de Cuautla y finaliza en la Boca Ensenada, esta última es la desembocadura del cauce del Estero el Grande en el Océano Pacífico, ambos también construidos de manera artificial en la década de 1970. Tiene una longitud promedio de 52.62 km.

De configuración espacial en forma arqueada simula el frente de un delta cusgado, en realidad, su fisiografía es el resultado de la orientación que los más de 200 cordones litorales han ido adquiriendo en su desarrollo durante los últimos 18 000 años AP (Curry *et al.*, 1969); como resultado, la orientación general de la línea de costa sigue dos rumbos distintos a partir de un punto máximo de inflexión en el ángulo del arco deltaico que está cercano al poblado de Santa Cruz, de manera que el flanco norte sigue un rumbo NE-SW mientras que el flanco sur continua en dirección NW-SE.

Además de ser el sector con la mayor cantidad de cordones de toda la región Marismas Nacionales, entre esteros, lagunas y marismas, aquí se concentra la mayor cantidad de cuerpos de agua de toda el área de estudio. Las lagunas Agua Brava y Laguna Grande de Mexcaltitlán forman el límite de la margen de costa interna hacia el continente, pero entre dichos cuerpos y la línea de costa se encuentran más de veinte lagunas de menor extensión; la mayoría interconectadas entre sí por medio de un numeroso grupo de caños y algunos esteros como El Colorado.

Siguiendo la clasificación de cuencas de México elaborada por INEGI (2012) comparte dos subcuencas hidrográficas: al norte la subcuenca RH11Bf El Palote-Higueras y al sur la subcuenca RH11Aa Río San Pedro. Cuya interpretación de claves quedaría de la siguiente manera:

RH11: Región hidrográfica Presidio-San Pedro, cuenca hidrográfica B: Río Acaponeta, subcuenca hidrográfica f: El Palote-Higueras y

RH11: Región hidrográfica Presidio-San Pedro, cuenca hidrográfica A: Río San Pedro, subcuenca hidrográfica a: Río San Pedro.

De acuerdo a la regionalización mareográfica de Fernández-Eguiarte *et al.* (1990) este y los demás sectores pertenecen a la región Bajo Golfo de California. La orientación de los vientos dominantes es del noroeste en invierno y oeste-suroeste en verano de acuerdo con lo reportado por Curry *et al.* (1969) y Montaña y Peraza (1984), estos últimos autores mencionan una velocidad promedio del viento de 2.6 a 3.5 m/s. La falta de sistemas de monitoreo mareográfico en el área de estudio no permite tener datos detallados de la dirección del oleaje, por lo tanto, se considera la misma información para toda el área de estudio mencionada en el subcapítulo 2.4 del capítulo 2.

Dentro de este sector se encuentran 11 de las localidades más cercanas a la línea de costa que en conjunto suman 6 818 habitantes; sin embargo, el uso recreativo de la costa es menor pues sólo las playas El Colorado y Puerta de Palapares son utilizadas con dichos fines y eso ocurre de manera estacional. Las únicas estructuras de contención de oleaje que se han construido en este sector son las escolleras en cada una de las márgenes del Canal de Cuautla terminadas en 1976, pero han sido superadas por el retroceso costero y en la actualidad se encuentran sepultadas.

Entre 1970 y 1999 el promedio general de la tasa de cambio fue de -1.3 m/a lo que significó una pérdida de -37 m del ancho de playa. Al agrupar los transectos según los rangos de cambio mencionados, el retroceso resultó ser el proceso dominante con un 59 %, mientras que el 35 % de los transectos presentaron un movimiento positivo y un 5 % de la costa se mantuvo estable (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

La configuración espacial de la línea de costa en el mapa y la gráfica de tasas de cambio de la figura 4.2 muestran que durante este período hubo pérdida del ancho de playa al norte del Canal de Cuautla, sin embargo, las mayores magnitudes se presentaron a lo largo de la Playa El Colorado en donde se registró una velocidad de hasta -8.4 m/a en la proximidad del transecto 1 000 que coincide con el cambio de orientación de los cordones litorales y con la desembocadura intermitente del Estero El Colorado.

En la misma figura se puede apreciar que, en contraste, en ese mismo período hubo ganancia en el ancho de playa al sur del Canal de Cuautla y en general en el resto del flanco norte. Las extensiones de costa en avance y de costa en retroceso, parecerían quedar separadas por una transición representada por una “franja de estabilidad” de la línea de costa (2.8 km de longitud aproximadamente), que coincide con el punto de inflexión del sector (transectos 500 a 600).

Durante el período reciente (1999-2011) el promedio de la tasa de cambio aumentó en sentido negativo a -4.15 m/a, es decir, se perdieron casi -50 m de ancho de playa. El valor del dominio del retroceso incrementó a 63 %, sólo el 34 % de los transectos estuvo avanzando mientras que la estabilidad de la línea de costa disminuyó a 2 % (Tabla 4.1).

De igual manera que en el período inicial, al norte del Canal de Cuautla es donde se concentró el retroceso pero durante el período reciente incrementó su magnitud y contrario a los resultados del período inicial, los 3 km de costa más cercanos al sur del Canal de Cuautla también comenzaron a retroceder. Otra diferencia con respecto al período inicial es que no todo el flanco sur estuvo en retroceso, este proceso se presentó sólo a partir del poblado de Santa Cruz y hasta la desembocadura intermitente del Estero el Colorado.

En cuanto a la franja de costa en avance, durante este período disminuyó en el flanco norte pues solo 18 km de los 52.62 km de extensión total estuvieron en avance y de ese valor, 12 km correspondieron al flanco norte y 6 km aproximadamente correspondieron al extremo inferior del sector, es decir, desde el sur de la desembocadura intermitente del Estero el Colorado y hasta la Boca Ensenada.

La “franja de estabilidad” redujo en más de la mitad su extensión estos últimos 12 años a sólo 1.2 km de longitud aproximadamente, pero se mantuvo en la misma ubicación que en el período inicial (Figura 4.2).

El período general (1970-2011) reflejó un promedio de la tasa de cambio de -2.1 m/a con una pérdida del ancho de franja costera de casi -87m. El proceso dominante fue el retroceso con un 60 % de transectos en esa categoría, un 35 % en avance y un 4 % de los transectos calificaron como estables (Figura 4.1).

En la línea de la gráfica de las tasas de cambio se puede ver que la pérdida del ancho de playa fue de mayor magnitud al norte del Canal de Cuautla mientras que en todo el flanco sur también hubo pérdida de terreno que se fue acentuando a medida que disminuía la distancia a la Boca Ensenada.

En el flanco norte sólo hubo ganancia de playas a partir del sur del Canal de Cuautla hasta la llamada “franja de estabilidad”, esto significó que 18.5 km de la extensión total del sector estuvo avanzando. En el período de 41 años la extensión de línea de costa caracterizada como estable tuvo 2.20 km de longitud y mantuvo su misma posición en todos los períodos.

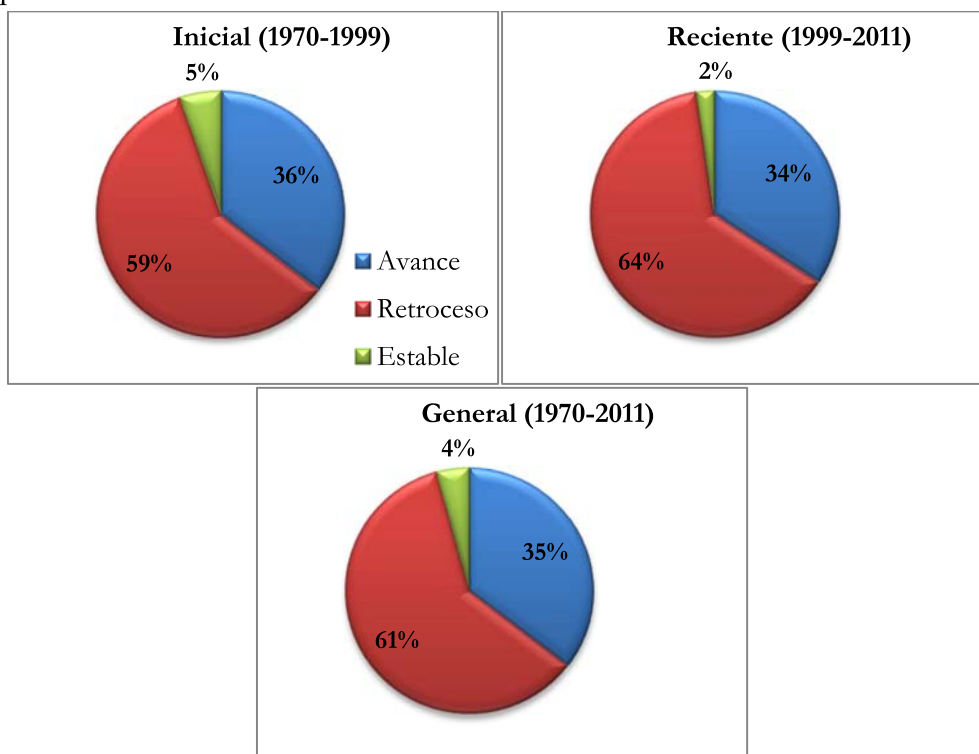


Figura 4.1 Sector A. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.

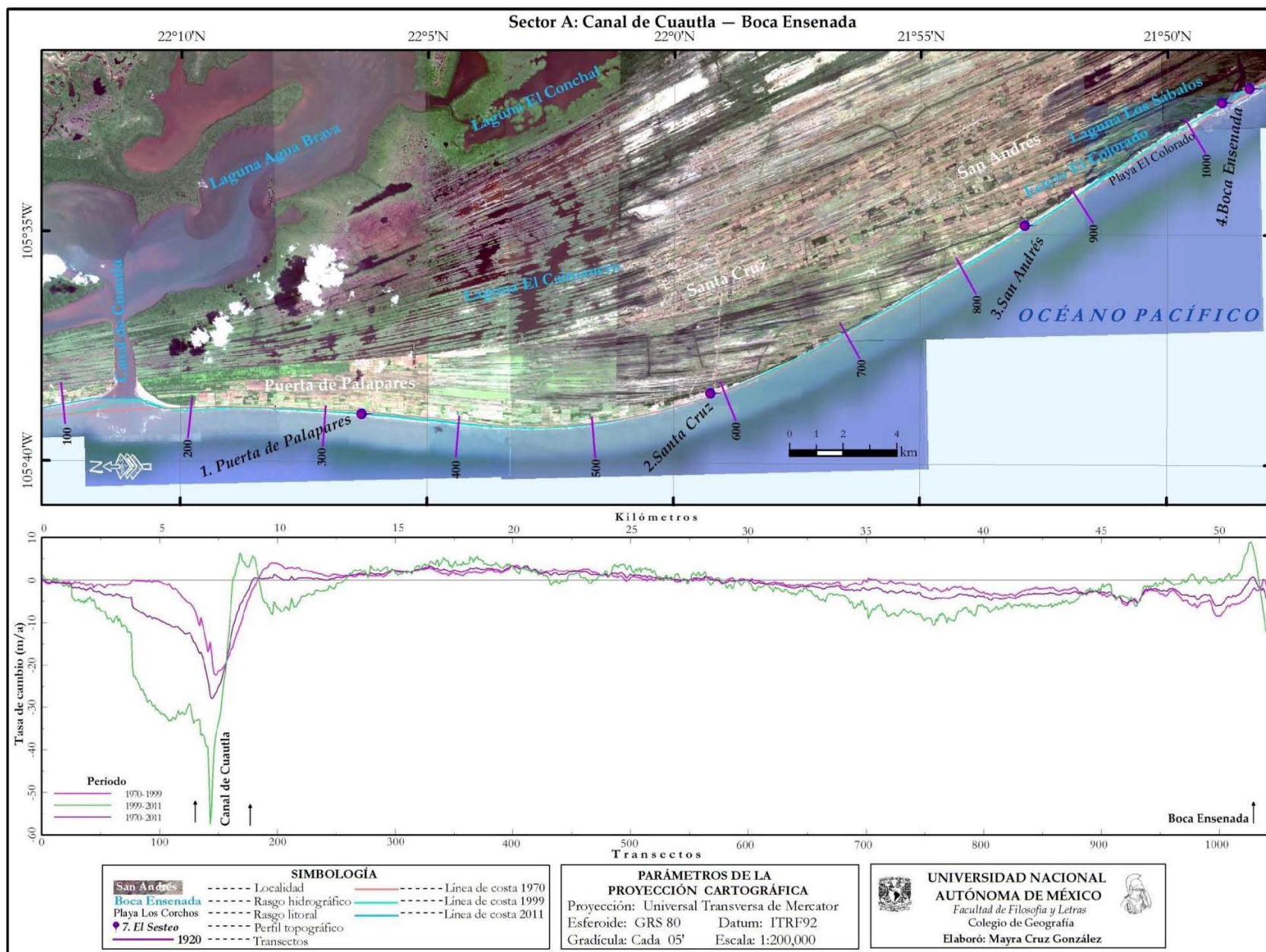


Figura 4.2 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector A, calculadas para los periodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011). En el mapa se representa el número de transectos coincidente con la longitud del sector en km, también se indica la posición de las bocas que delimitan al sector.

4.1.2 Sector B: Boca Ensenada — Boca Camichín

Los 10.20 km de extensión de línea de costa que abarca este sector corresponden al borde perimetral externo de la Barra Camichín que sigue una orientación sureste, se encuentra parcialmente anclada a la planicie fluvio-deltaica de los ríos San Pedro y Grande de Santiago. Barra Camichín está secundada por un sistema lagunar-estuarino que conecta la desembocadura continental del río San Pedro en la Laguna Grande de Mexcaltitán hacia el Océano Pacífico a través del cauce del Estero Grande.

Otros esteros y lagunas que caracterizan la planicie adyacente a la barra son el Estero Saltierrita y el Estero Los Troncones; también las lagunas Pozo Sordo, La Palmita, El Pozo Chino, Charco Grande y Charco Chico. INEGI (2012) clasifica esta cuenca hidrográfica con la clave RH11Aa, que se interpreta de la siguiente manera:

RH11 Región hidrográfica Presidio-San Pedro

A .Cuenca hidrográfica R. San Pedro

a.Subcuenca hidrográfica Río San Pedro

Las playas de la Barra Camichín tienen un cordón frontal de dunas pioneras seguido de un cordón de dunas secundarias estabilizadas por vegetación. La morfografía de la Barra Camichín es uno de los elementos del relieve que permite inferir la dirección de la deriva litoral de la región en sentido noroeste y además, es una de las formas del relieve costero con mayor dinamismo durante los últimos 40 años.

En el período inicial (1970-1999) el promedio de la tasa de cambio de 4.0 m/a lo que representó una ganancia de 117 m del ancho de playa. Del total de transectos un 86 % se mantuvo en avance versus sólo un 13 % de transectos con movimiento negativo, mientras que la estabilidad del sector no llegó a 1 %, cifra que puede ser prácticamente despreciable (Figura 4.4).

Durante este período los cambios en la línea de costa estuvieron relacionados con el crecimiento en ambos sentidos de la Barra Camichín: longitudinal y transversal. El crecimiento en sentido longitudinal originó la migración hacia el sur de la Boca Camichín y también la acumulación de sedimentos en la antigua posición de la costa que incrementaron su anchura, la línea de la gráfica de tasa de cambio hace evidente tal observación (Figura 4.5); por otra parte, el retroceso sólo se presentó en el último kilómetro del extremo meridional de la barra.

Entre 1999 y 2011 el promedio de la tasa de cambio continuo presentando un valor positivo pero la velocidad de ganancia del ancho de playa disminuyó a sólo 1.54 m/a, es decir, durante 12 años el continente ganó 18.55 m de terreno frente al mar. El porcentaje de transectos en avance fue de 77 % pero incrementó el retroceso respecto al período anterior a 22 %; el valor de la extensión de línea de costa estable también fue mínimo (Figura 4.4).

Durante este período el avance se concentró entre los transectos 1 070 al 1 190 que corresponden a la porción más antigua de la barrera y a la configuración de la línea de costa casi recta. La extensión de la línea de costa en donde hubo pérdida de playa se localizó entre los transectos 1 190 a 1 210 que coinciden con un cambio en la orientación de los cordones litorales adyacentes (Figura 4.5).

Los valores del período general (1970-2011) indican un tasa de cambio promedio para el sector de 3.30 m/a, es decir, hubo una ganancia de anchura de la playa de 135.52 m. Sin embargo, según la gráfica de procesos dominantes la extensión de línea de costa con diferentes movimientos es similar al período inicial (Figura 4.4).

La expresión espacial del comportamiento de la línea de costa es parecida a la del período inicial porque los cambios en la morfografía de la Barra Camichín en los últimos 12 años no han sido tan significativos como lo fueron durante los primeros 29 años del período inicial (Figuras 4.3 y 4.5).

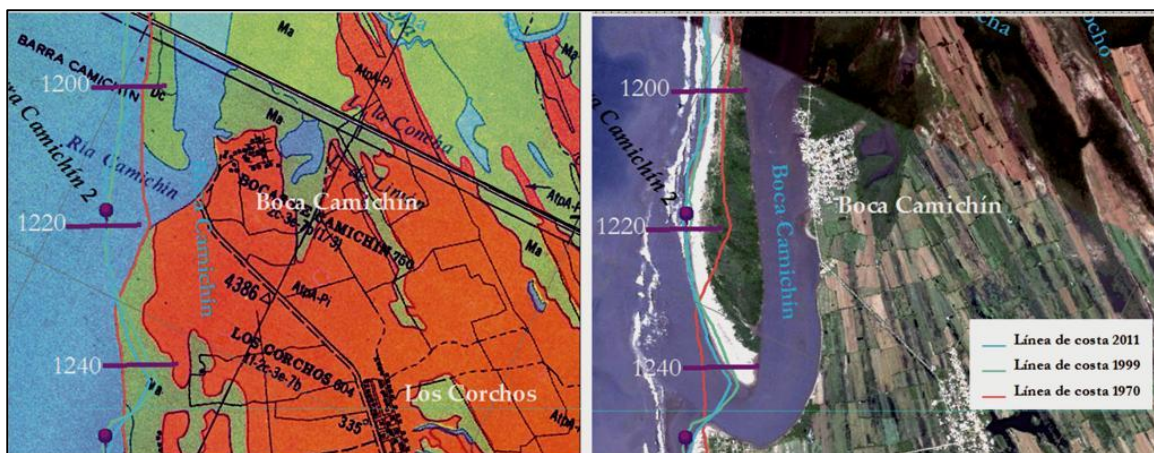


Figura 4.3 Migración de la Boca Camichín entre 1970 y 2011. Entre el transecto 1220 y 1240 se encuentra el punto de inflexión en las tasas de cambio hecho que coincide con la antigua posición de la Boca que en 1970 se encontraba cerrada en ese mismo segmento de costa. La Boca Camichín migró aproximadamente 1.7 km en sentido longitudinal y en dirección NW-SE, en el período de 1970 a 2011, de acuerdo a ese comportamiento registrado, se infiere que la barra continuará migrando en la misma dirección pues la orientación de los cordones litorales que forman un sistema de interconexión entre los esteros alledaños como el Estero Los Corchos y el Estero Toro Mocho, favorecerían esta condición.

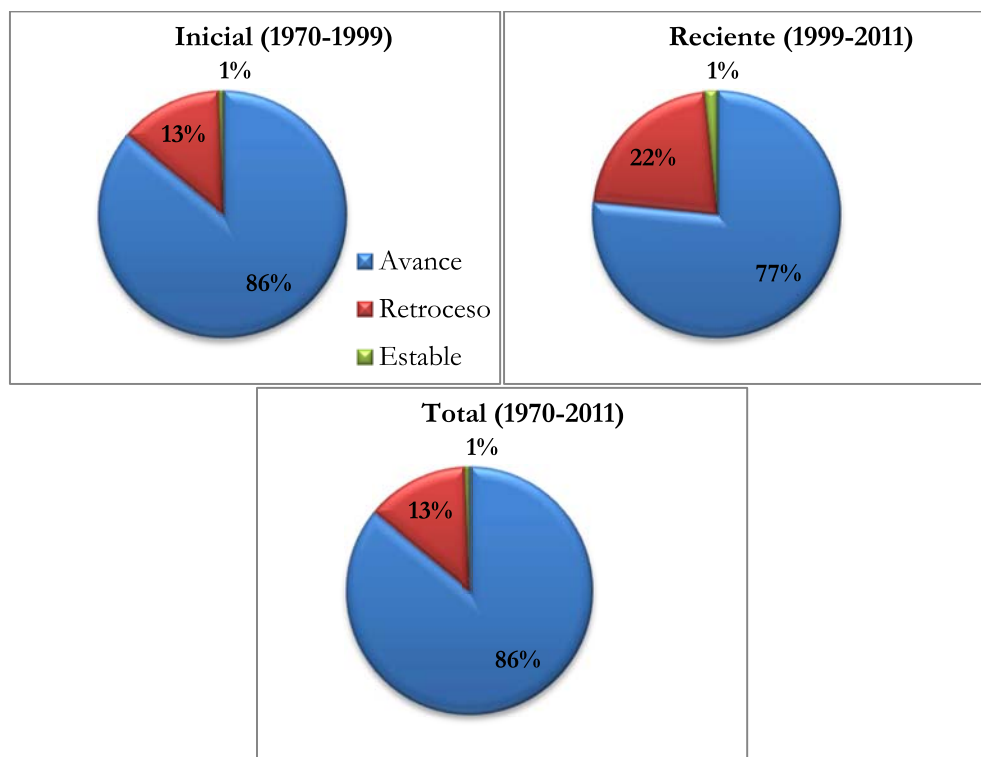


Figura 4.4 Sector B. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los periodos de medición.

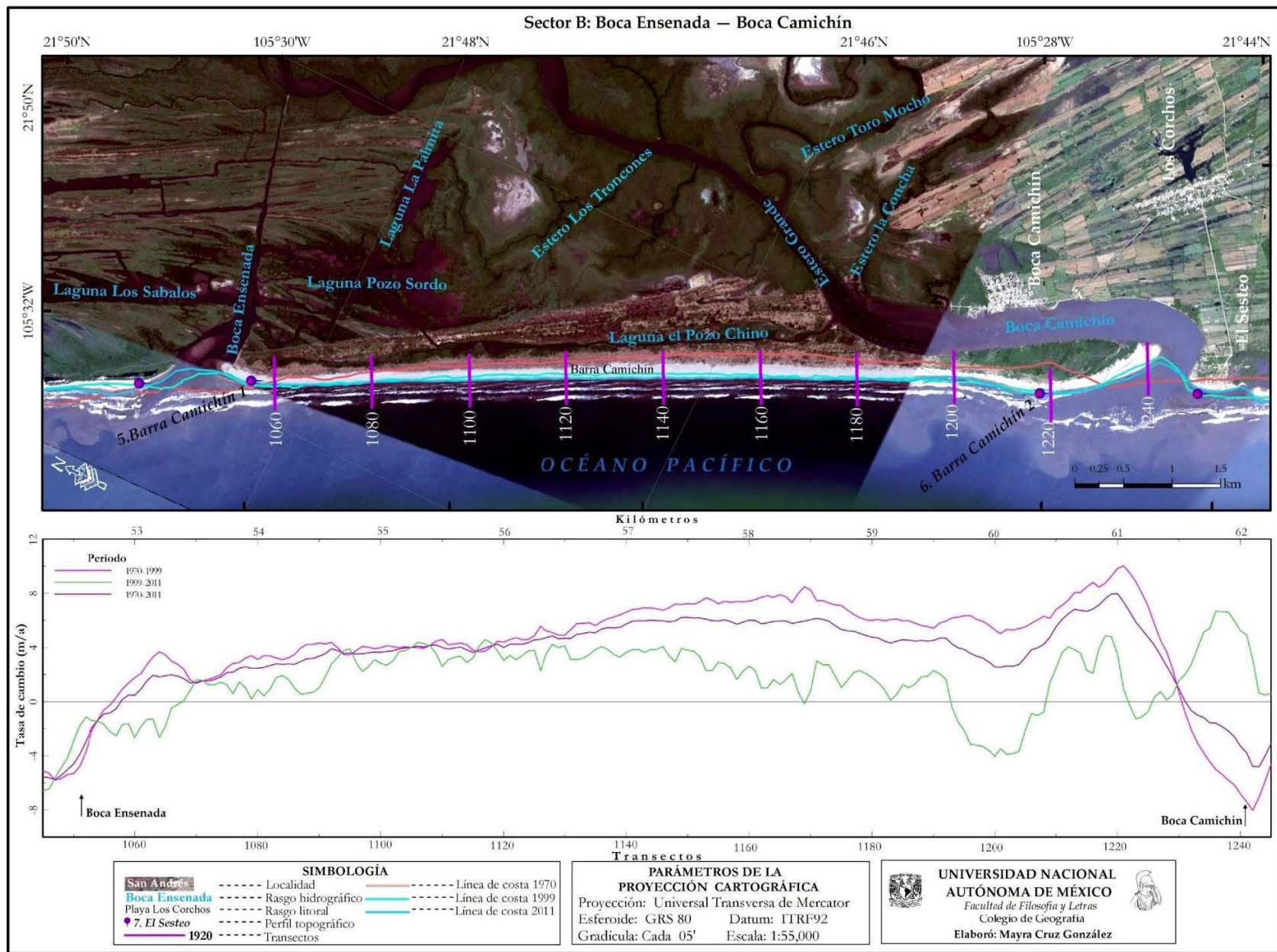


Figura 4.5 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector B, calculadas para los periodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011). En el mapa se representa el número de transectos coincidente con la longitud del sector en km, también se indica la posición de las bocas que delimitan al sector.

4.1.3 Sector C: Boca Camichín—Boca Asadero

Es parte del frente deltaico del río Grande de Santiago en su flanco norte, continua a partir de la Boca Camichín hasta la Boca Asadero, la línea de costa tiene una orientación general hacia el sureste y una longitud promedio de 12 km. En la planicie fluvio-deltaica adyacente se encuentra un grupo de cordones litorales de aproximadamente 1.5 km de anchura cuya posición general es paralela a la línea de costa hasta el transecto 1 420, a partir de esta referencia el grupo de cordones cambia su orientación hasta quedar en una posición subperpendicular en el extremo sur, es decir, al norte de la Boca Asadero (Figura 4.7).

Además del mencionado grupo de cordones, al interior del continente, coexisten en la planicie otros paquetes de cordones que alternan con antiguos cauces de los ríos San Pedro y Grande de Santiago y también con algunas marismas y esteros; de estos últimos destaca el Estero Los Corchos que desemboca de manera intermitente en la boca Los Corchos situada 1 km al sur de la Boca Camichín.

En la planicie fluvio-deltaica destaca el abanico de meandros abandonados del río Grande de Santiago que, de acuerdo a Ortiz (1978) y Ortiz y Romo (1994) son resultado de las modificaciones en la trayectoria fluvial del río según un análisis comparativo de imágenes del período 1940 a 1993. Los mismos autores en el último estudio propusieron la construcción de las presas Aguamilpa y San Rafael como una causal de dichas modificaciones durante los últimos años del período de análisis.

En el sistema de clasificación de cuencas del INEGI (2012) este sector queda comprendido dentro de dos regiones hidrográficas, al norte: RH11Aa y al sur: RH12Fb, de la primera ya se mencionó la interpretación de claves en el subcapítulo 1.1, de la segunda sería:

RH12 Región hidrográfica Lerma-Santiago

F. Cuenca hidrográfica río Santiago-Aguamilpa

b. Subcuenca hidrográfica Huaynamota-Océano

Las playas El Sesteo al norte y Los Corchos al sur, ocupan toda la extensión, podría considerarse como dos de las cuatro playas más visitadas por turistas dentro del área de estudio, las otras serían playa Palmar de Cuautla y playa El Borrego en los sectores A y F, respectivamente. Estas playas sólo tienen un cordón de dunas pioneras que son la transición hacia la vegetación de manglar y los terrenos de pastoreo en el continente.

Durante el período inicial (1970-1999) el promedio de la tasa de cambio fue de 8.02 m/a lo que significó una ganancia del ancho de playa de 232.69 m. El proceso dominante fue el avance con 98.71 % de los transectos frente a sólo un 0.86 % de retroceso y un 0.43 % de estabilidad en la costa, estos valores lo convierten en el sector con mayores magnitudes positivas durante este período (Figura 4.6).

En términos generales se podría decir que toda la franja litoral se mantuvo en avance de forma casi homogénea, excepto en la porción meridional, a partir del transecto 1 420 que, como ya se mencionó, corresponde con el cambio de orientación de los cordones litorales (Figura 4.7).

Sin embargo, entre 1999 y 2011 el promedio de la tasa de cambio revirtió su comportamiento respecto al período inicial al pasar a -0.94 m/a lo que significó una pérdida de -11.28 m de franja de costa. Aunque el dominio de procesos reveló un mayor porcentaje de transectos en avance (71 %), frente a un 29 % de transectos en retroceso y un porcentaje despreciable de estabilidad, en general, la velocidad del retroceso supero a la de avance durante el período (Tabla 4.2).

Espacialmente, resulta más sencillo explicar que aunque hubo una mayor extensión de la línea de costa que estuvo registrando movimiento positivo (8 km aproximadamente), los valores de la velocidad de avance fueron mucho menores que los valores de los transectos en retroceso (alrededor de 3 km). En la figura 4.7 es posible apreciar como la pérdida del ancho de playa se concentra en ambos extremos del sector, en la margen sur y norte de las bocas, pero es más acentuado al norte de la Boca Asadero.

En el caso de la pérdida del ancho de playa en el extremo norte es muy probable que se deba a la intermitencia de la boca Los Corchos pues hasta 1999 había estado avanzando esta porción de línea de costa, al observar la figura 4.7 se puede apreciar que es durante los últimos 12 años cuando se perdió esa franja de costa que corresponde a la boca Los Corchos.

Respecto a la pérdida de la franja costera en el extremo sur, una posible causa es la orientación subperpendicular de los cordones litorales que influyen en la evolución de la línea de costa al presentar poca resistencia ante los procesos erosivos de mareas, vientos y oleajes; sin embargo, otra causa que ha mencionado Ortiz (1978;1979) y Ortiz y Romo (1994) es que la disminución en el aporte de sedimentos a causa de su retención en las presas San Rafael, Aguamilpa y El Cajón puede estar incrementando la velocidad de retroceso en las cercanías de las bocas.

Por otra parte, durante el período general (1970-2011) el promedio de la tasa de cambio fue positiva con 5.40 m/a de avance, es decir, hubo una ganancia de 221.41 m de franja costera durante los últimos 41 años. El porcentaje de transectos con valores positivos fue de 84 % mientras que un 15 % se mantuvo en retroceso.

A diferencia del período 1999-2011 en donde desde el transecto 1 420 iniciaba el retroceso con una velocidad de hasta -60 m/a (transecto 1 468), la línea de la gráfica en la Figura 4.7 muestra que entre 1970 y 2011 este proceso inició hasta el transecto 1 440 con una velocidad mucho menor, sólo -5.7 m/a. Esta relación muestra claramente dos etapas en los cambios de esta porción meridional del sector: de 1970 a 1999 la línea de costa estuvo en franco avance, de 1999 a 2011 retrocedió súbitamente y, finalmente, el período general muestra que hubo pérdida de la franja costera durante los últimos 41 años.

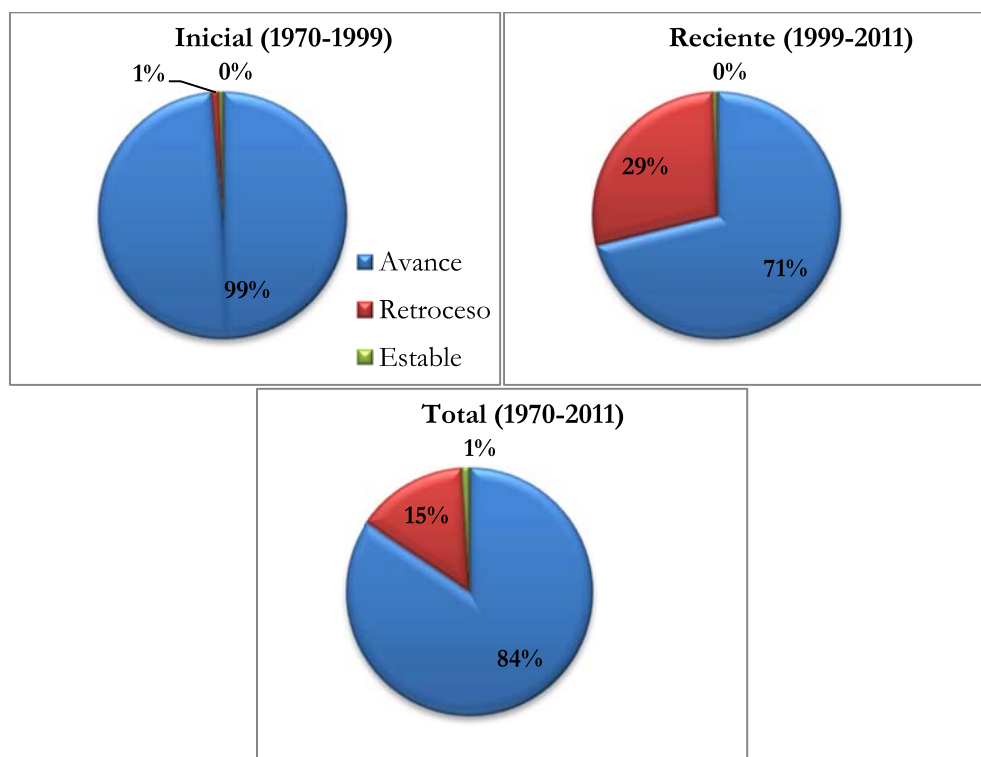


Figura 4.6 Sector C. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.

4.1.4 Sector D: Boca Asadero —Boca Cegada

Esta franja de costa es parte del flanco sur del frente deltaico del río Grande de Santiago y abarca desde la Boca Asadero hasta encontrar su límite en la Boca Cegada, su longitud es de 4.5 km en promedio y la orientación general que sigue es hacia el sureste; la estrecha playa Coyotes ocupa su extensión total.

En su porción norte, la playa Coyotes está secundada por una planicie de inundación poblada por vegetación de manglar con algunos esteros de cauce de menor extensión mientras que al sur, más o menos a partir del transecto 1 530, está interrumpida por los caños de un grupo de cordones litorales que se extienden desde un meandro del flanco sur del río Grande de Santiago siguiendo una dirección subperpendicular a la línea de costa hasta llegar a la línea de costa donde adquieren una disposición perpendicular.

En el extremo meridional del sector, la Boca Cegada es la desembocadura al océano Pacífico del estero el Varadero que durante varios años fue uno de los cauces aledaños utilizados como aportes de agua salada hacia las granjas camaronícolas de la empresa Aquanova, situadas a no más de 3 km de dicha boca hacia el continente. Las granjas camaronícolas estuvieron en funcionamiento desde 1994 hasta el año 2006 y en su momento llegaron a ocupar una superficie aproximada de 1 200 hectáreas (comunicación personal Mtro. Julio Gómez).

Esta porción de la planicie fluvio-deltaica además de recibir aportes hídricos del sistema lagunar—estuarino presente en la región (en otra época conectado al río Grande de Santiago por medio de una red de antiguos cauces y venas actualmente abandonados), también es alimentada por importantes aportes subterráneos de agua continental provenientes del cercano Cinturon Volcánico Transmexicano (Blanco y Correa, 2009).

De acuerdo a INEGI (2012) comparte dos cuencas hidrográficas, al norte: RH12Fb y al sur RH13Bc. La clave de la cuenca del norte ya fue interpretada en el subcapítulo 1.3, la cuenca RH13Bc se interpretaría como sigue:

RH13 Región hidrográfica Huicicila

B.Cuenca hidrográfica Huicicila-San Blas

c.Subcuenca hidrográfica R. San Blas

Las mediciones de las variaciones en la posición de la línea de costa indican que entre 1970 y 1999 el promedio de la tasa de cambio fue de -13 m/a, es decir, se perdieron -375 m de franja costera. Un 96 % de los transectos estuvieron retrocediendo *versus* solo un 3 % de transectos en avance, el porcentaje de estabilidad fue prácticamente despreciable (Tabla 4.1 y Figura 4.9).

Especialmente, durante este período el retroceso se concentró al norte de la playa Coyotes, en la región adyacente a la planicie de inundación, la inspección visual de los sectores hace posible identificar que entre los transectos 1 490 al 1 530 es donde hubo una mayor pérdida de la franja costera. De hecho, en el transecto 1 500 se registró un desplazamiento de hasta -572 m en la línea de costa (el valor máximo durante los 29 años del período), esto significó una velocidad de pérdida de playas de -19.7 m/a. Estos datos pudieron ser validados en campo al momento de levantar los perfiles topográficos (Figura 4.8).



Figura 4.8 Mangle relicto a lo largo de Playa Coyotes. Las características morfológicas de playa Coyotes, los relictos de manglar destruido por fenómenos hidrometeorológicos y las dificultades de acceso por vía marítima o terrestre son algunas de las causas que limitan las actividades antrópicas en este lugar, sin embargo, durante las observaciones realizadas en campo se pudo apreciar que los troncos del mangle destruido son extraídos como recurso maderable además de que se practica la pesca de forma artesanal.

En el extremo norte hubo un avance mínimo que no llegó a los 200 m de extensión de la línea de costa, esa ganancia de franja costera estuvo relacionada con el desarrollo de una flecha arenosa (*spit*) en la cercanía de la desembocadura del río Grande de Santiago.

En el período reciente (1999–2011) el promedio de la tasa de cambio incrementó a -13.5 m/a respecto al período inicial, lo que significó una pérdida de franja costera de -162 m en sólo 12 años. El porcentaje de transectos en retroceso también incrementó a 98 % mientras que los valores de estabilidad y avance no llegaron a 1 % (Figura 4.9).

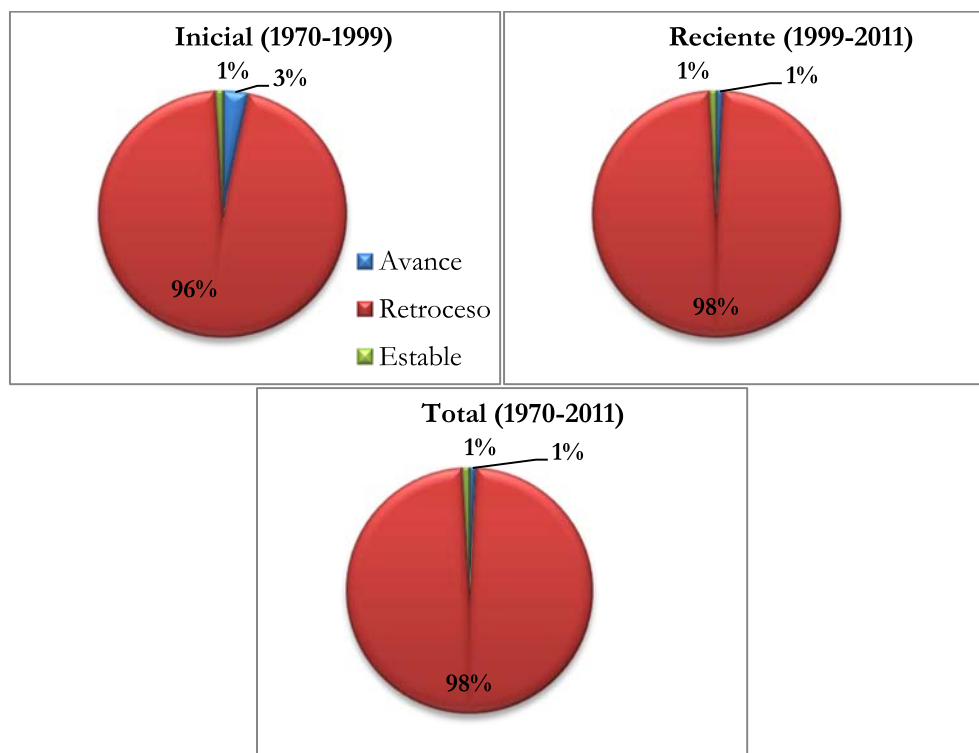
Sin duda, las mediciones revelan que, de toda el área de estudio, este es el sector con los valores más críticos de retroceso. La apreciación visual de las líneas de costa y de la línea de tasa de cambio en la Figura 4.11 permiten observar que, a diferencia del período inicial, en los últimos 12 años hubo un desplazamiento negativo con una distribución más homogénea a lo largo de su extensión.

El retroceso solo se acentuó ligeramente al frente de la Laguna Coyotes, entre los transectos 1 540 al 1 570, una región de interrupción de los cordones litorales cuya orientación subperpendicular a la línea de costa puede haber favorecido esta condición, sin embargo, aún falta ver en el futuro cual será la expresión espacial en esta región de los cambios en la línea de costa.

Durante el período general (1970-2011) el promedio de la tasa de cambio fue de -13.09 m/a, lo que significó una pérdida de -537 m del ancho de playa. El dominio de procesos en el comportamiento de la línea de costa se mantuvo en cifras similares a las del período reciente.

En los últimos 41 años, los mayores valores de cambio en la línea de costa se han concentrado en los mismos transectos que durante 1970-1999, la diferencia es que el valor máximo de desplazamiento negativo ha incrementado (-708.2 m) a una velocidad de -17.2 m/a en el mismo transecto, 1 500. (Figura 4.11).

Otros cambios que ha experimentado este sector entre 1970 y 2011 tienen que ver con la migración de la posición de la Boca Cegada. Hasta 1970 dicha boca era la salida al mar del estero el Varadero y de la laguna Coyotes, además se ubicaba 1 km al norte de su actual posición; para 1999 la boca, los esteros y lagunas estaban separados de la línea de costa por una franja de planicie de inundación, sin embargo, en 41 años la línea de costa se desplazó tanto hacia el continente, que actualmente la línea de costa tiene varias entrantes resultado de la interrupción de los mencionados cuerpos hídricos (Figura 4.10).



4.9 Sector D. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.

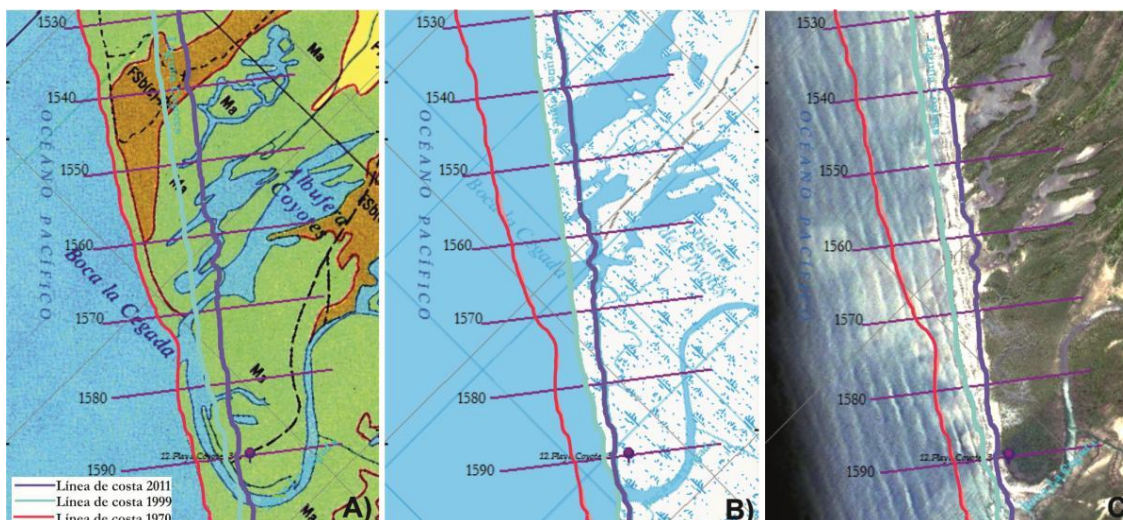


Figura 4.10 Migración de la Boca Cegada durante los últimos 41 años. A) En la imagen de 1970 la Boca Cegada era la desembocadura hacia el Océano Pacífico de dos cuerpos de agua: la laguna Coyotes y el Estero el Varadero; aparece a la altura del transecto 1 575. B) Para 1999 la vena que comunicaba a la laguna Coyotes con la Boca Cegada ya está azolvada y con la pérdida de franja de costa durante esos 29 años, también cambió de rumbo el cauce del Estero el Varadero y, por lo tanto, su posición migró 1 km aproximadamente al sureste (transecto 1 595). C) En la imagen de Google Earth (2011) se identifica la formación de otra laguna más situada al norte de Laguna Coyotes en la región que hasta 1970 ocupaban unas venas (transecto 1540), mientras que la Boca Cegada permanece en la misma posición que hace 12 años.

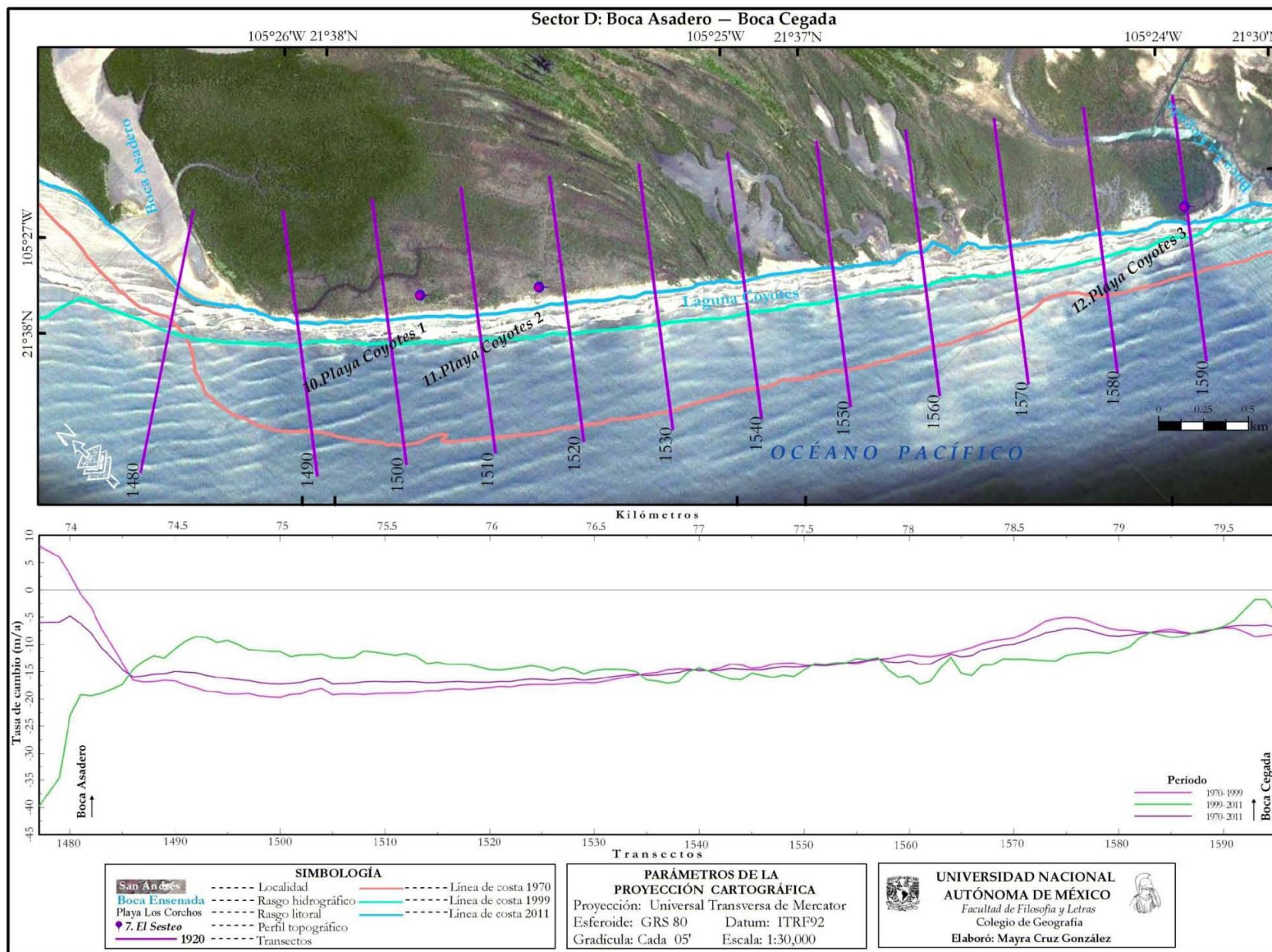


Figura 4.11 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector D, calculadas para los periodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011). En el mapa se representa el número de transectos coincidente con la longitud del sector en km, también se indica la posición de las bocas que delimitan al sector.

4.1.5 Sector E: Boca Cegada—Boca El Vigía

En su extensión total (15.35 km en promedio) se ha desarrollado una playa que se caracteriza por la presencia de un cordón de dunas pioneras secundado por un cordón de dunas semi-móviles contiguo a la línea de vegetación (cultivos de palma al sur y manglar al norte). La orientación general de la línea de costa es NW-SE.

También forma parte del flanco sur del frente deltaico del río Grande de Santiago, por lo tanto, la franja costera es adyacente a la planicie fluvio-deltaica de este río en la que destacan dos grupos de cordones litorales de orientación subparalela a la línea de costa bordeados por un sistema lacustre-estuarino. Los dos grupos de cordones están separados por el Estero del Rey cuyo cauce es paralelo a la costa y tiene comunicación al mar a través de un brazo que lo conecta al Estero el Pozo (El Vigía) que, a su vez, desemboca en la Boca El Vigía (Boca de San Blas).

Dos kilómetros al sur de la Boca Cegada se localiza otra boca artificial de 50 m de ancho aproximadamente que en la actualidad está azolvada. Fue construida a principios de 1990 como parte de las obras para conducir agua salada a las granjas camaronícolas de Aquanova, ésta boca conducía el agua del Pacífico a las granjas a través de un sistema de canales artificiales que también recibían aporte del desvío de cauces de otros esteros aledaños.

De acuerdo a INEGI (2012) La clave de región hidrográfica de este sector es RH13Bc, (la interpretación ya fue señalada en el subcapítulo 1.4).

Entre 1970 y 1999 el promedio de la tasa de cambio fue de 1.8 m/a, es decir, hubo una ganancia de 52 m del ancho de playa durante ese período. El proceso con mayor dominio fue el avance con un 61 % del total de los transectos *versus* un 36 % de retroceso y un 3 % de la línea de costa en estabilidad (Tabla 4.1 y Figura 4.12).

La inspección visual del comportamiento de la franja costera durante ese período indica que el retroceso estuvo concentrado en la cercanía de la Boca La Cegada hasta el transecto 1 720 (6 km al sur de La Cegada aproximadamente), a partir de dicho transecto hubo una estrecha “franja de estabilidad” (0.5 km) que hasta la fecha actúa como transición hacia el segmento de línea de costa que ha estado avanzando (Figura 4.14).

El gráfico de las tasas de cambio en la Figura 4.13 indica que durante este período la mayor magnitud de ganancia en el ancho de playa se concentró al norte de la Boca El Vigía, sin embargo, probablemente esa ganancia haya ocurrido solo durante los últimos 9 años del período porque fue hasta 1990 cuando se cerró de forma artificial la boca del Estero el Rey (Berlanga, 2006).

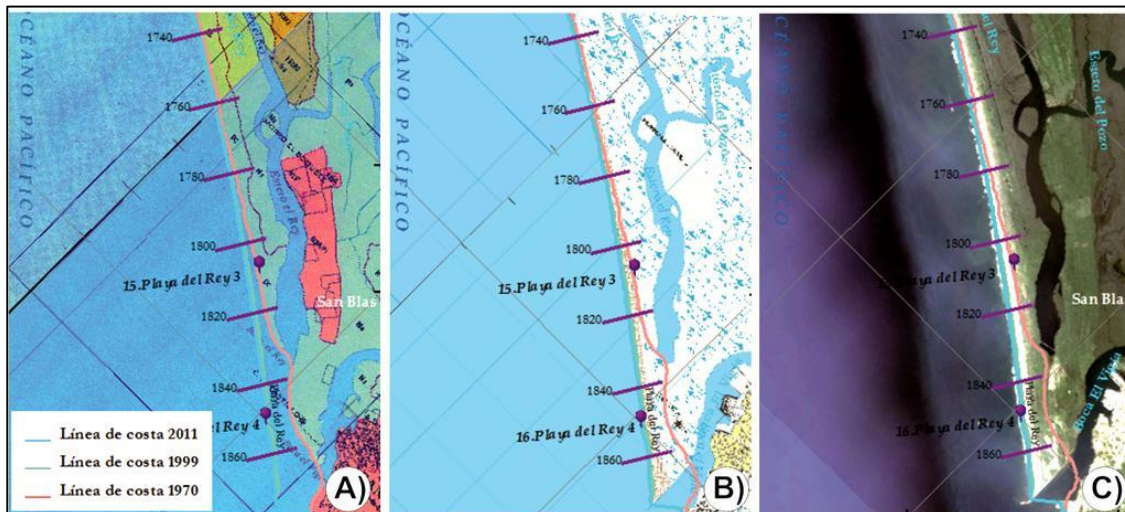


Figura 4.12 Cambios en las bocas al sur de la actual Playa el Rey entre 1970 y 2011. A) En la imagen de 1970 aparecen dos bocas cercanas: la Boca el Rey y 2km al sur, Boca el Vigía. Boca el Rey aparece aún sin modificaciones, por lo tanto, la parte sur del sector semeja una barra con crecimiento longitudinal hacia el sureste. B) De acuerdo a lo reportado por Berlanga y Ruiz (2006) la salida al mar del Estero el Rey fue bloqueada en 1990, a partir de esta fecha es cuando incrementó la velocidad de avance hasta alcanzar un valor máximo de 21 m/a cerca del transecto 1866 entre 1970 y 1999, en esta imagen de 1999 ya aparece cerrado el Estero el Rey. C) En los últimos 12 años la línea de costa se ha seguido desplazando hacia el mar, prueba de esto es que el transecto 1843 de la imagen de 2011 registró un movimiento positivo de 46.37m.

Durante el período reciente (1999-2011) este sector revirtió su comportamiento a una velocidad de -0.3 m/a en promedio de pérdida del ancho de playa, lo que significó un desplazamiento hacia el continente de -4.28 m en 12 años. El porcentaje de transectos en avance disminuyó a 42 % frente al 52 % de transectos en retroceso y se registró un 6 % de estabilidad.

En la línea de las tasas de cambio de la Figura 4.14 se muestra claramente el relativo “equilibrio” de ambos procesos durante estos últimos doce años, además, este es el período en el cual la “franja de estabilidad” ocupó una máxima extensión al llegar a casi 1 km de longitud. En ambos extremos del sector disminuyeron las velocidades de retroceso y avance, el primero con dominio hacia la margen sur de la Boca La Cegada y el segundo con influencia cerca de la margen norte de la Boca El Vigía.

El comportamiento en este segmento de línea de costa resulta muy interesante pues habría que cuestionarse si la disminución en el aporte de sedimentos del río Grande de Santiago está teniendo los efectos pronosticados por algunos autores como Ortiz (1978;1979) y Ortiz y Romo (1994) quienes mencionaban que la retención de sedimentos cuenca arriba en las presas, San Rafael, Aguamilpa y El Cajón modificaría el balance de sedimentos, y por lo tanto, aceleraría el retroceso en algunas extensiones de la franja costera.

Por otra parte, durante el período de 1970 a 2011 el promedio de la tasa de cambio fue de 1 m/a lo que significa que hubo una ganancia de franja costera de 48 m. Las cifras de dominio de procesos señalan que hubo un mayor porcentaje de avance (56 %) frente a un 42 % de retroceso y un 2 % de transectos con relativa estabilidad (Figura 4.13).

El comportamiento de la gráfica de tasas de cambio a lo largo de la franja costera es muy similar al período inicial (Figura 4.14), solo que los valores tanto de avance como de retroceso son menores y la extensión de la franja de transectos en transición (“franja estable”) presenta la menor extensión de los tres períodos (menos de 500 m).

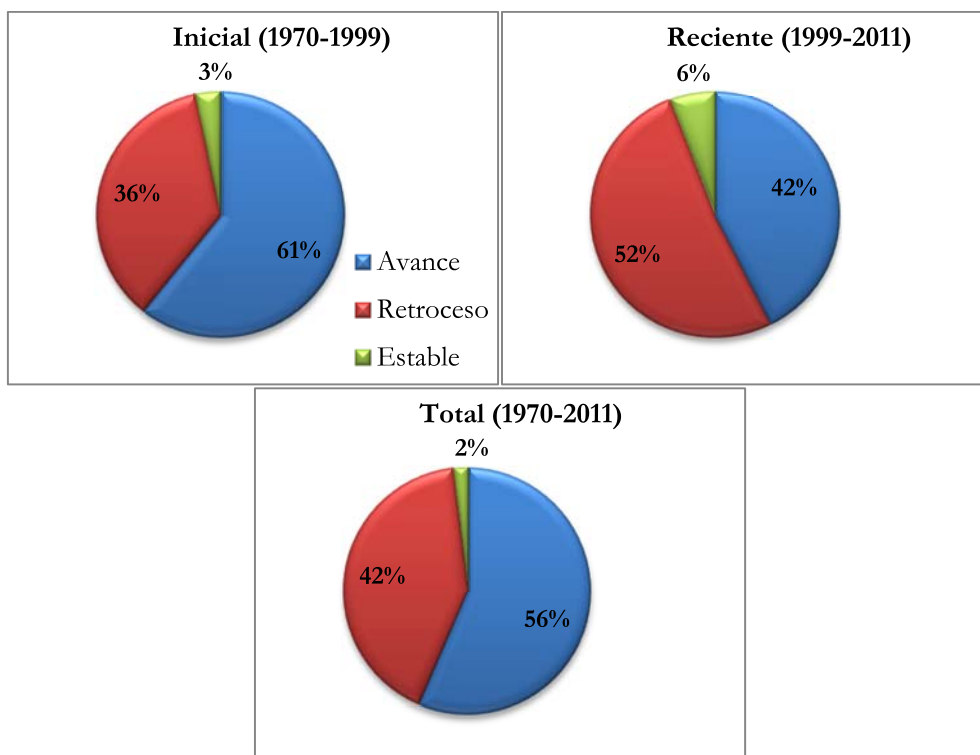


Figura 4.13 Sector E. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.

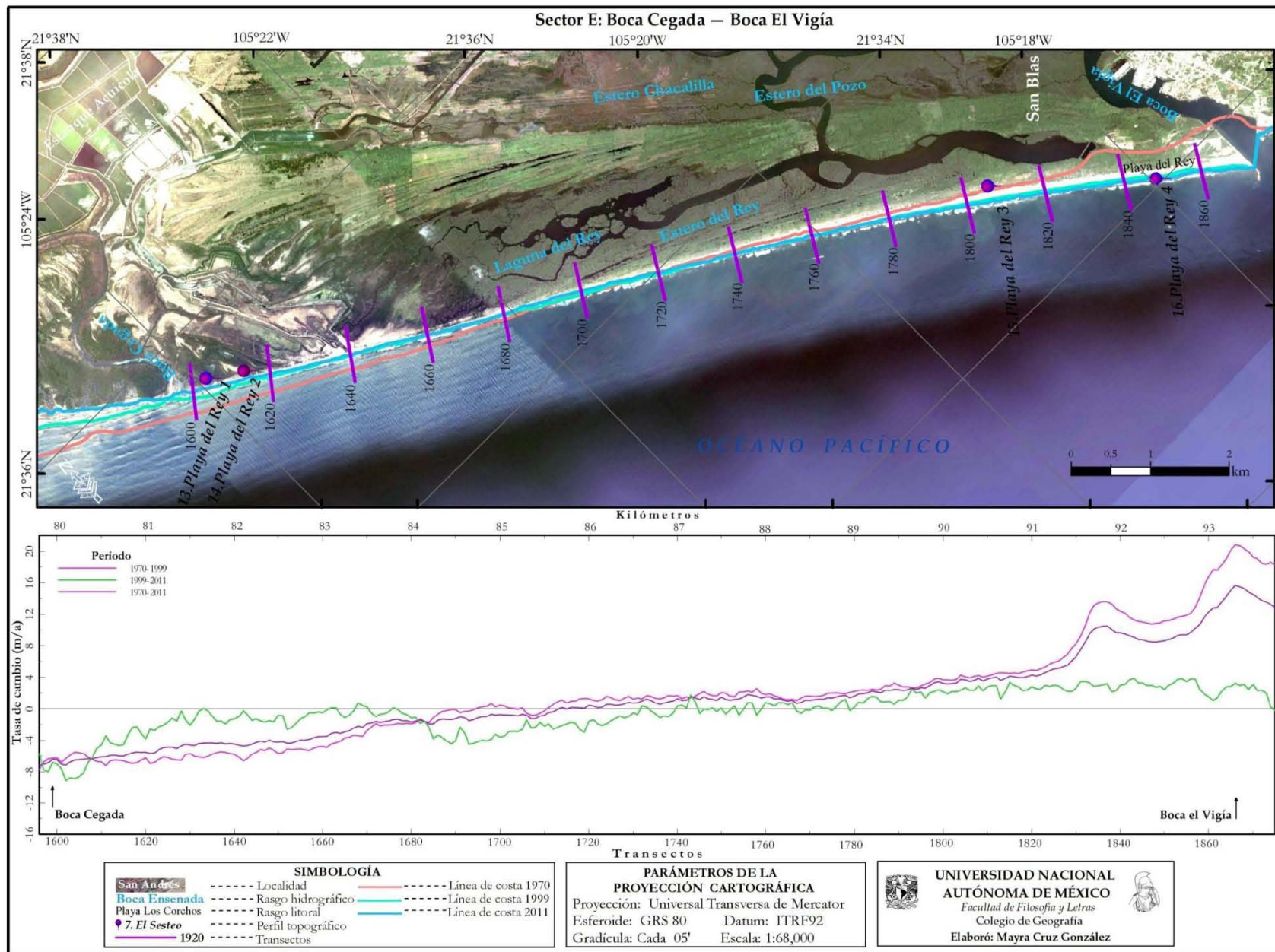


Figura 4.14 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector E, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011). En el mapa se representa el número de transectos coincidente con la longitud del sector en km, también se indica la posición de las bocas que delimitan al sector.

4.1.6 Sector F: Boca El Vigía—Boca El Borrego

Es el extremo sur del frente deltaico del río Grande de Santiago y de la misma forma que los sectores D y E esta playa sigue una orientación general NW-SE, su longitud promedio es de 2.8 km. La Playa el Borrego se caracteriza por tener un cordón de dunas, que es la transición hacia la planicie fluvio-deltaica, estabilizado por vegetación de hidrófitas y matorral espinoso.

De toda el área de estudio, esta es la franja costera con mayor intervención antrópica pues la playa El Borrego es uno de los principales atractivos turísticos del municipio de San Blas, de hecho, al norte hay varias construcciones adyacentes a la playa y a lo largo de la misma hay un camino de terracería que sigue un curso paralelo a la línea de costa.

Está delimitado al norte por la Boca El Vigía, que es la desembocadura del estero El Pozo y al sur por la boca El Borrego que es la salida al mar del Estero de San Cristóbal, en la última boca se encuentra la isla El Plumero cuya superficie no sobrepasa una hectárea. Probablemente sea la franja costera que recibe los mayores aportes de agua subterránea continental al estar en contacto con el Cinturón Volcánico Transmexicano.

De acuerdo a la clasificación de INEGI (2012), pertenece a la cuenca hidrográfica RH13Bc, cuya interpretación de claves es:

RH13: Región hidrográfica Huicicila

B: Cuenca hidrográfica Huicicila-San Blas y

c. Subcuenca hidrográfica San Blas

La depositación de sedimentos en la margen norte de las escolleras que se encuentran en ambos extremos del sector es uno de los elementos que permiten inferir la dirección de la deriva litoral hacia el NW, esta afirmación es reforzada por los datos de oleaje que reportan Montañó (1983) y Montañó y Peraza (1984); y de viento reportados por Curray *et al.*, (1969) en cuyo estudio señalan una dirección NW en invierno y W-SW en verano.

Entre 1970 y 1999 presentó un promedio de la tasa de cambio negativa (-0.5 m/a), en total se perdieron -13.94 m de franja de costa. El proceso dominante fue el retroceso (83 %) mientras que solo un 15 % de los transectos estuvo avanzando, el valor de estabilidad fue prácticamente despreciable.

En la actualidad, en toda el área de estudio es el único sector situado entre dos escolleras así que es interesante observar los cambios que ha experimentado la línea de costa en las inmediaciones de dichas estructuras de contención de oleaje. En primer lugar, en la escollera sur de la Boca el Vigía se aprecia un avance máximo de hasta 95 m de desplazamiento en el transecto 1 877 mientras que en la escollera de la Boca el Borrego el valor de desplazamiento hacia el mar ha sido similar: un máximo de 92.4 m en el transecto 1 928 (Figura 4.17).

La depositación de sedimentos en la escollera de la margen sur de Boca el Vigía del sector puede ser ocasionada por el transporte litoral hacia esa dirección de los sedimentos provenientes de los esteros el Vigía y San Cristóbal; otra causa no sólo del avance en esos sitios, sino de la concentración del retroceso hacia el centro, puede ser que ambas escolleras favorezcan la refracción del oleaje cuya energía quedaría concentrada justamente al centro de ahí que en ese sitio se hayan calculado transectos con una velocidad máxima de hasta -1.46 m/a de tasa de cambio (transecto 1909).

Durante el período reciente (1999-2011) el promedio de la tasa de cambio indica que incrementó la velocidad del retroceso a -1.5 m/a, lo que implicó la pérdida de -17.45 m de franja costera. El porcentaje de transectos en retroceso aumentó a 88 % mientras que el avance fue de 8 % (Tabla 4.2 y Figura 4.15).

La heterogeneidad de la línea en la gráfica de tasas de cambio corresponde a playas con asentamientos humanos cercanos, esta observación se deriva del estudio realizado por Absalonsen y Dean (2010) quienes también realizaron mediciones en playas con influencia antrópica directa en donde se puede apreciar la similitud en el comportamiento de las tasas de cambio con la gráfica de Playa el Borrego (Figura 4.17).

En el período general (1970-2011), la cifra del promedio de la tasa de cambio indica que la playa ha estado retrocediendo a -0.7 m/a de velocidad, es decir, se perdieron -29 m del ancho de playa en total. Durante estos 41 años el dominio del retroceso fue de 87 % frente a un 11 % de avance.

En la expresión espacial de los cambios de la línea de costa durante este período el comportamiento es muy similar al período inicial, sin embargo, el cambio que más destaca es que la longitud de la playa ha disminuido 150 m aproximadamente, en 1970 la longitud del sector fue de 2.81 km mientras que la medición de 2011 es 2.62 km (Figura 4.16).

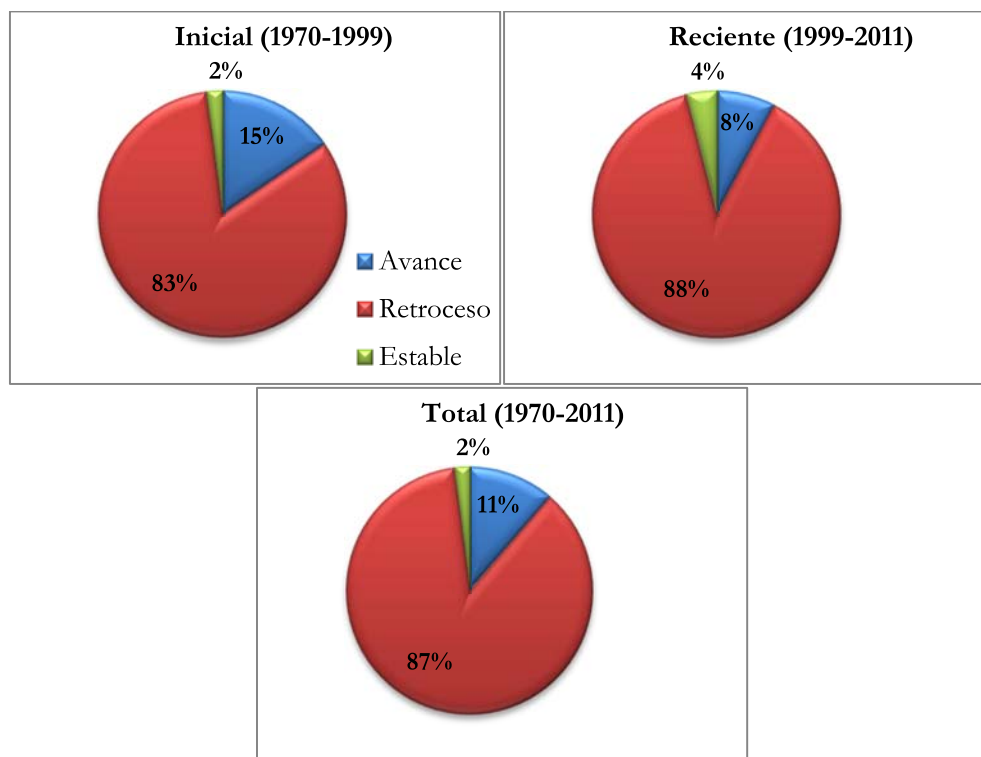


Figura 4.15 Sector F. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los periodos de medición.

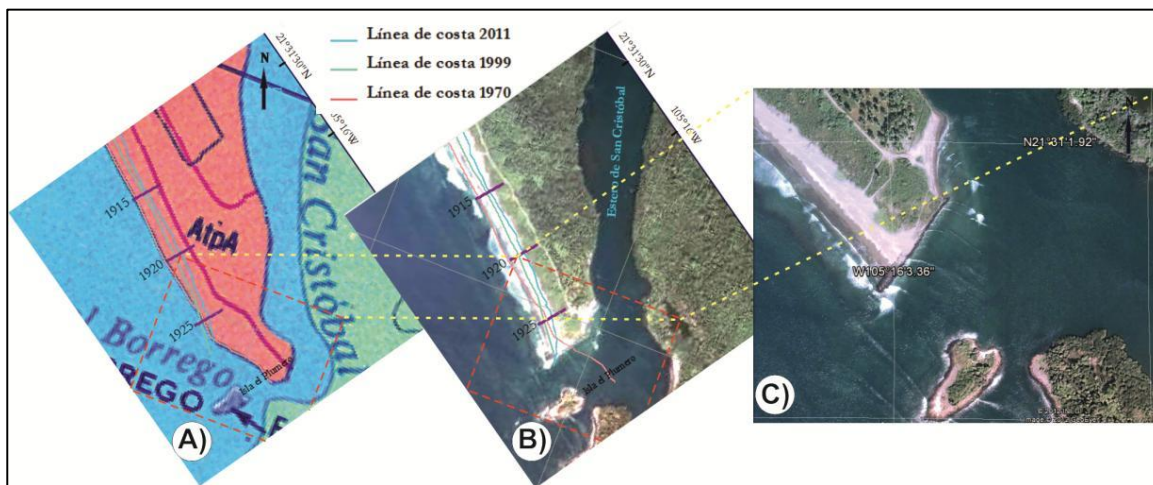


Figura 4.16 Disminución en la longitud de la línea de costa de la Playa el Borrego. A) En la carta de uso de suelo de 1970 la Playa el Borrego continuaba hasta quedar al frente a la Isla el Plumero con una terminación en forma de flecha arenosa (spit) B) En la imagen satelital de 2011 el spit ya no aparece y la línea de costa ha migrado disminuido su longitud por lo menos 100m. C) El detalle del extremo sur de la Playa el Borrego permite apreciar la escollera de la Boca el Borrego de 70m aproximadamente de ancho, en la actualidad casi ha sido rebasada por la línea de costa.

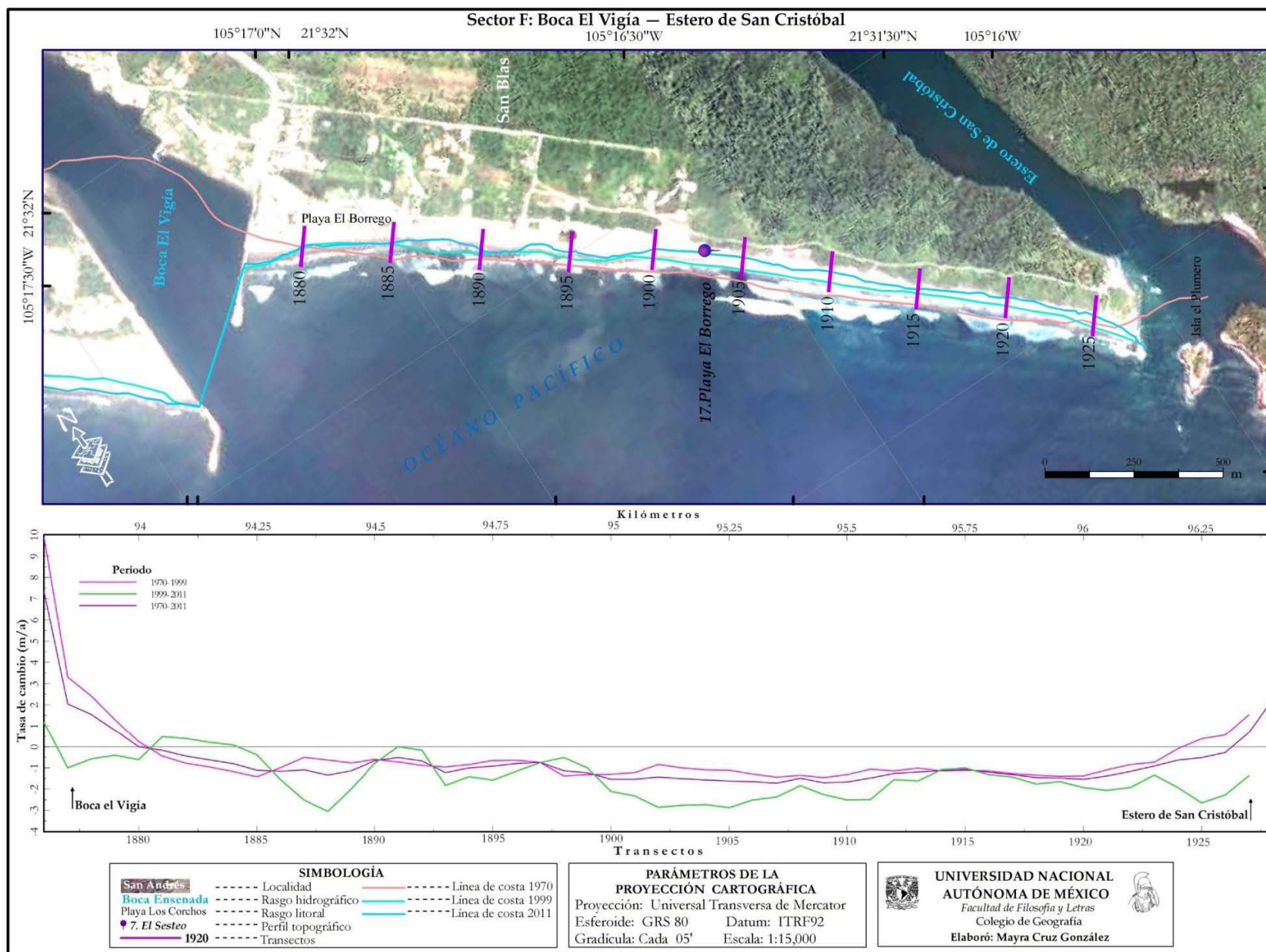


Figura 4.17 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector F, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011). En el mapa se representa el número de transectos coincidente con la longitud del sector en km, también se indica la posición de las bocas que delimitan al sector.

Resumiendo, entre 1970 y 1999 la tasa de cambio neta para todo el área de estudio fue positiva (+0.14 m/a), la ganancia del ancho de playa fue de +4.14 m. En cuanto al comportamiento de la línea de costa, de acuerdo al número de transectos correspondiente a cada proceso durante este período dominó el avance frente al retroceso con 49.58 % y 47.04 %, respectivamente. De toda la extensión de la línea de costa un 3.38 % se mantuvo estable.

Espacialmente, los sectores con retroceso se concentraron al norte del Canal de Cuautla, en el flanco sur del sector A (Playa El Colorado), en todo el sector D (Playa Coyotes), en el extremo sur del sector E (Playa el Rey) y en todo el sector F (Playa el Borrego).

Los sectores en avance se concentraron en el flanco norte del sector A (Playa Puerta de Palapares), en toda la extensión del sector B (Barra de Camichín), en todo el sector C (Playa Los Corchos) y en la porción sur de Playa del Rey.

Durante este período solo hubo dos “zonas de estabilidad”, la primera y de mayor extensión localizada en el flanco central del sector A cerca del poblado de Santa Cruz que abarcó 5 km aproximadamente; y la segunda en la porción central del sector E (Playa del Rey) que registró 2 km como máximo (Anexo I).

En los últimos 12 años (1999-2011) la tasa de cambio neta ha revertido en sentido negativo, la línea de costa ha estado desplazándose hacia el continente a una velocidad de -3.12 m/a, por lo tanto, se han perdido -37.55 m del ancho de playa en toda el área de estudio. El dominio de procesos durante este período ha sido de 56.16 % mientras que el 41.51 % de los transectos se ha mantenido en avance. La estabilidad en el área de estudio ha disminuido respecto al período anterior (2.34 %).

En la inspección visual de los transectos durante el período reciente, se puede apreciar que el retroceso de la línea de costa persiste al norte del Canal de Cuautla pero ahora comienza a retroceder la línea de costa también al sur del Canal, hecho que no ocurría en el período inicial. El retroceso también está presente en el flanco sur del Sector A. (Playa el Colorado) y de ahí hasta el sector D (Playa Coyotes) en donde abarca la totalidad del sector pero disminuye en magnitud frente al período anterior. La porción septentrional del sector E (Playa del Rey) continúa en retroceso.

A diferencia del período inicial, la longitud del flanco norte del sector A con desplazamiento positivo de la playa ha disminuido a tan sólo 10 km, pero esto se ve compensado porque en la porción cercana a la Boca Ensenada el movimiento negativo del período inicial revierte a una ganancia de playa; el centro de la Barra de Camichín (sector B) continúa incrementando su anchura y el sector C también presenta una longitud considerable de playas en avance. La última extensión del área de estudio con valores positivos es la porción meridional del sector E (Playa del Rey).

Las zonas del área de estudio con relativa estabilidad son las mismas con respecto al período anterior pero disminuyen en longitud; en el caso del flanco central del sector A sólo 3 km aproximadamente se conservan en esta categoría mientras que en el sector E (Playa del Rey) tan sólo 1.5 km aproximadamente se conservan estables.

En general (1970-2011), los valores indican que esta línea de costa ha estado retrocediendo a una velocidad de -0.81 m/a, es decir, durante los últimos 41 años se han perdido -33.34 m de franja costera, considerando todos los sectores. Prácticamente la mitad del área de estudio está en retroceso pues el 50.52 % de los transectos cae en esta categoría mientras que el 46.73 % de los transectos registró movimiento positivo, sólo un 2.75 % presentó condiciones de estabilidad.

Entre 1970 y 2011 la gráfica de la figura 4.17 permite apreciar que tanto al norte del Canal de Cuautla como en todo el flanco sur del sector A es donde se perdió terreno frente al mar; también el sector D (Playa Coyotes) registró movimiento negativo. A diferencia del período 1999-2011, en general aumentó significativamente la magnitud de retroceso en el norte del sector E (Playa del Rey).

En cuanto a la distribución espacial del avance, durante estos años los resultados permiten identificar a todo el flanco norte del sector A en esta categoría, así como también los sectores B (Barra Camichín), C (Playa Los Corchos) y el sur del sector E (Playa del Rey). La estabilidad de la línea de costa se concentró en el punto de inflexión del sector A (Santa Cruz) a lo largo de 2 km aproximadamente y ocupó sólo algunos metros de la porción central del sector E (Playa del Rey).

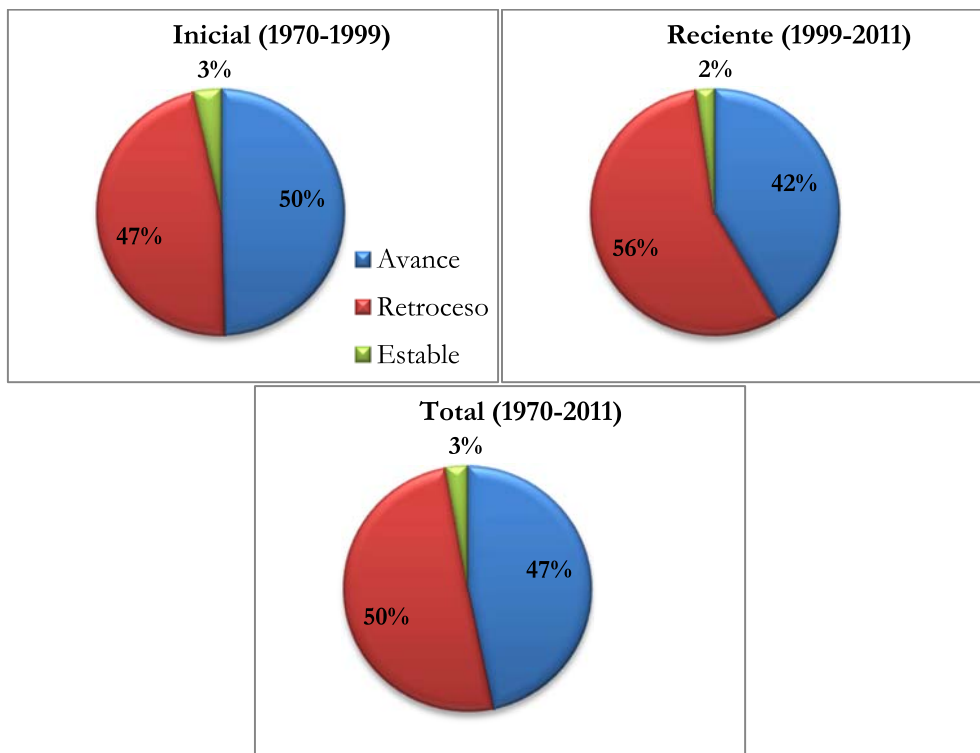


Figura 4.18 Área de estudio. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.

Tabla 4.1 Resultados de los cambios de la línea de costa durante el período inicial (1970-1999)

PERÍODO INICIAL (1970-1999)

Tasa de cambio de la línea de costa para el área de estudio y cada uno de los sectores en que fue dividida.

Sectores regionales de la línea de costa	Avance (> +0.15 m/a)		Retroceso (< -0.15 m/a)		Estable (< +0.15 — > -0.15 m/a)		Suma de transectos por sector	Promedio de la tasa de cambio (m/a) por sector
	Transectos	Tasa de cambio (m/a)	Transectos	Tasa de cambio (m/a)	Transectos	Tasa de cambio (m/a)		
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	369	1.73	617	-3.19	55	-0.01	1041	-1.27
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	174	5.36	27	-4.51	1	0.00	202	4.03
C.Boca Camichín-Boca Asadero	229	8.12	2	-2.60	1	0.00	232	8.02
D.Boca Asadero-Boca Cegada	4	5.98	115	-13.59	1	0.00	120	-12.93
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	170	5.68	101	-4.57	9	0.01	280	1.80
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	8	2.45	43	-1.03	1	-0.09	52	-0.48
Suma transectos por proceso	954		905		68			
Promedio de la tasa de cambio (m/a) por proceso		4.65		-4.60		-0.01		
Tasa de cambio neta (m/a) del área de estudio	0.14							

Sectores regionales de la línea de costa	Dominio de procesos en el comportamiento de la línea de costa durante el período (%)			Desplazamiento de la línea de costa durante el período (m)
	Avance	Retroceso	Estable	
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	35.45	59.27	5.28	-36.95
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	86.14	13.37	0.50	116.98
C.Boca Camichín-Boca Asadero	98.71	0.86	0.43	232.69
D.Boca Asadero-Boca Cegada	3.33	95.83	0.83	-374.95
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	60.71	36.07	3.21	52.28
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	15.38	82.69	1.92	-13.94
Dominio de procesos en el área de estudio	49.58	47.04	3.38	
Promedio del desplazamiento de la línea de costa				4.14

Tabla 4.2 Resultados de los cambios de la línea de costa durante el período reciente (1999-2011)

PERÍODO RECIENTE (1999-2011)

Tasa de cambio de la línea de costa para el área de estudio y cada uno de los sectores en que fue dividida.

Sectores regionales de la línea de costa	Avance (> +0.15 m/a)		Retroceso (< -0.15 m/a)		Estable (< +0.15 — > -0.15 m/a)		Suma de transectos por sector	Promedio de la tasa de cambio (m/a) por sector
	Transectos	Tasa de cambio (m/a)	Transectos	Tasa de cambio (m/a)	Transectos	Tasa de cambio (m/a)		
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	357	2.44	661	-7.87	24	0.03	1042	-4.15
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	154	2.68	44	-2.34	3	0.10	201	1.54
C.Boca Camichín-Boca Asadero	165	8.40	66	-24.29	1	0.00	232	-0.94
D.Boca Asadero-Boca Cegada	1	0.00	119	-13.48	1	0.00	121	-13.48
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	119	2.05	145	-2.37	16	0.01	280	-0.36
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	4	0.56	46	-1.69	2	0.04	52	-1.45
Suma transectos por proceso	800		1081		68			
Promedio de la tasa de cambio (m/a) por proceso		3.65		-8.27		0.03		
Tasa de cambio neta (m/a) del área de estudio		-3.12						

Sectores regionales de la línea de costa	Dominio de procesos en el comportamiento de la línea de costa durante el período (%)			Promedio del desplazamiento de la línea de costa durante el período (m)
	Avance	Retroceso	Estable	
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	34.26	63.44	2.30	-49.90
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	76.62	21.89	1.49	18.55
C.Boca Camichín-Boca Asadero	71.12	28.45	0.43	-11.28
D.Boca Asadero-Boca Cegada	0.83	98.35	0.83	-162.05
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	42.50	51.79	5.71	-4.28
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	7.69	88.46	3.85	-17.45
Dominio de procesos en el área de estudio	41.51	56.16	2.34	
Promedio del desplazamiento de la línea de costa				-37.55

Tabla 4.3 Resultados de los cambios de la línea de costa durante el período general (1970-2011)

PERÍODO GENERAL (1970-2011)

Tasa de cambio de la línea de costa para el área de estudio y cada uno de los sectores en que fue dividida.

Sectores de la línea de costa	Avance (> +0.15 m/a)		Retroceso (< -0.15 m/a)		Estable (< +0.15 — > -0.15 m/a)		Suma de transectos por sector	Promedio de la tasa de cambio (m/a)
	Transectos	Tasa de cambio (m/a)	Transectos	Tasa de cambio (m/a)	Transectos	Tasa de cambio (m/a)		
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	369	1.51	630	-4.39	44	0.03	1043	-2.12
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	172	4.33	27	-2.99	1	0.02	200	3.30
C.Boca Camichín-Boca Asadero	195	6.92	34	-3.02	2	-0.04	231	5.40
D.Boca Asadero-Boca Cegada	1	0.00	119	-13.09	1	0.00	121	-13.09
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	158	4.68	117	-3.53	5	0.05	280	1.17
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	6	2.44	46	-1.13	1	0.00	53	-0.71
Suma transectos por proceso	901		973		68			
Promedio de la tasa de cambio (m/a) por proceso		3.78		-5.11		0.02		
Tasa de cambio neta (m/a) del área de estudio		-0.81						

Sectores regionales de la línea de costa	Dominio de procesos en el comportamiento de la línea de costa durante el período (%)			Promedio del desplazamiento de la línea de costa durante el período (m)
	Avance	Retroceso	Estable	
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	35.38	60.40	4.22	-86.84
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	86.00	13.50	0.50	135.52
C.Boca Camichín-Boca Asadero	84.42	14.72	0.87	221.41
D.Boca Asadero-Boca Cegada	0.83	98.35	0.83	-536.99
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	56.43	41.79	1.79	48.01
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	11.32	86.79	1.89	-29.05
Dominio de procesos en el área de estudio	46.73	50.52	2.75	
Promedio del desplazamiento de la línea de costa				-33.34

4.2 Cambios en la posición de la línea de costa en mesoescalas de tiempo (julio, 2010-febrero, 2011)

La identificación de los cambios en la franja costera se realizó mediante la comparación visual de los cambios en la posición tanto de las zonas de playa como de algunos rasgos geomórficos. Además, se tomaron en cuenta también otros elementos de referencia como el cambio en la pendiente y la longitud en el ancho de playa. En las líneas de los perfiles de playa los códigos para identificar dichos cambios corresponden a la siguiente nomenclatura:

AP:	Anteplaya
DP:	Duna primaria
DS:	Duna secundaria
EB:	Escalón de berma
ER:	Escarpe de erosión
IP:	Interplaya
LV:	Línea de vegetación
PP:	Posplaya

La interplaya (IP) es la zona del perfil de playa que se encuentra entre el nivel medio de la pleamar y el de la bajamar, en cuanto a procesos de oleaje corresponde también a la zona de deslizamiento (*swash zone*) de los sedimentos, se distingue porque es una pendiente entre la anteplaya y la posplaya que ha sido modelada justamente por la acción de los procesos de oleaje y mareas.

En el perfil de playa el límite de la interplaya (IP) hacia el continente pudo identificarse en el campo como una marca previa del nivel máximo de la marea alta (Figuras 1.4 y 1.5), por lo tanto, este es el elemento que se consideró como el indicador de la posición de la línea de costa en los perfiles. En cada perfil de playa se midió la distancia de desplazamiento de la IP entre julio de 2010 y febrero de 2011. En las Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 y 4.24 los perfiles de playa están agrupados por sector de línea de costa.

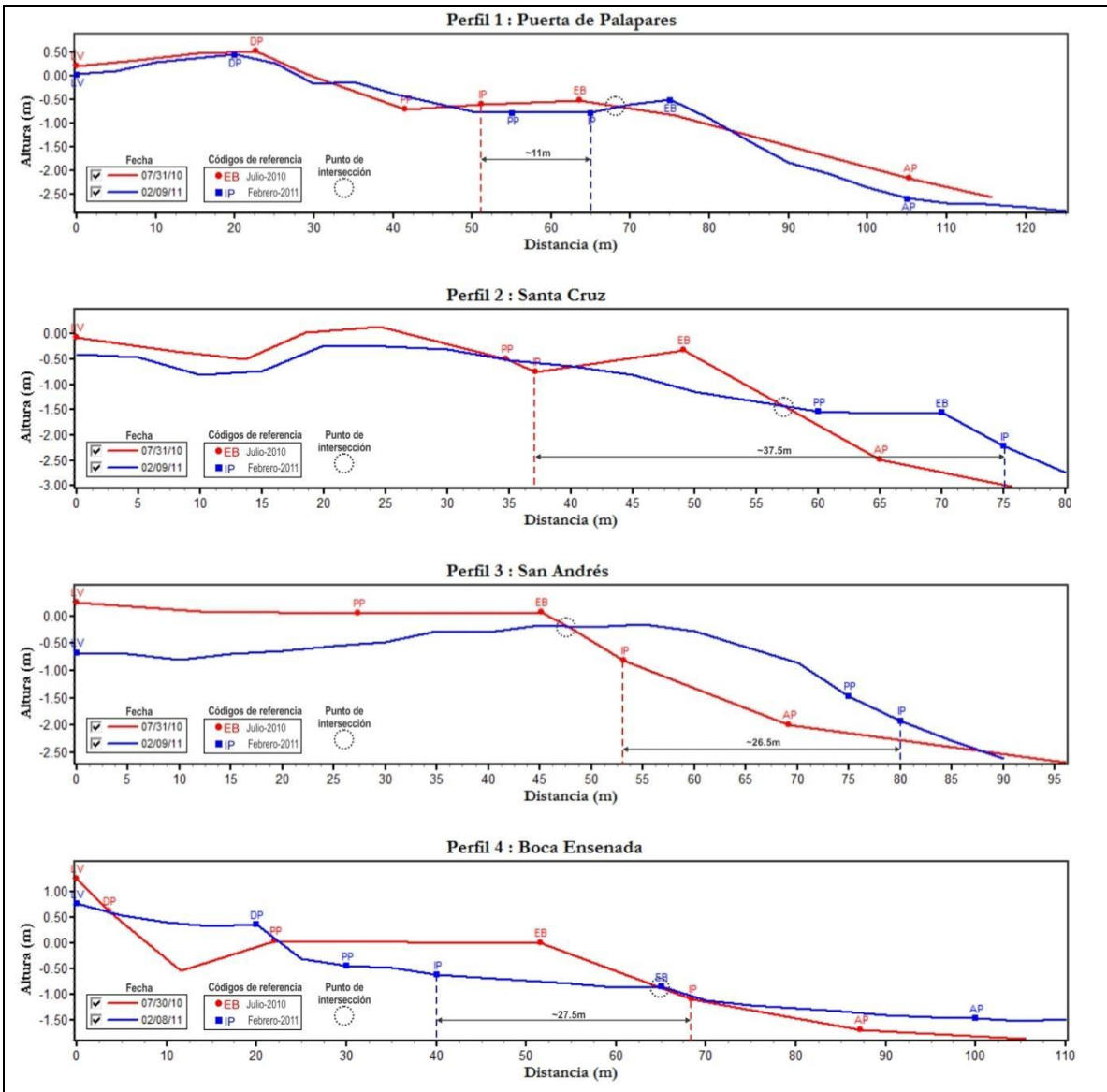


Figura 4.19 Perfiles de playa correspondientes al sector A.

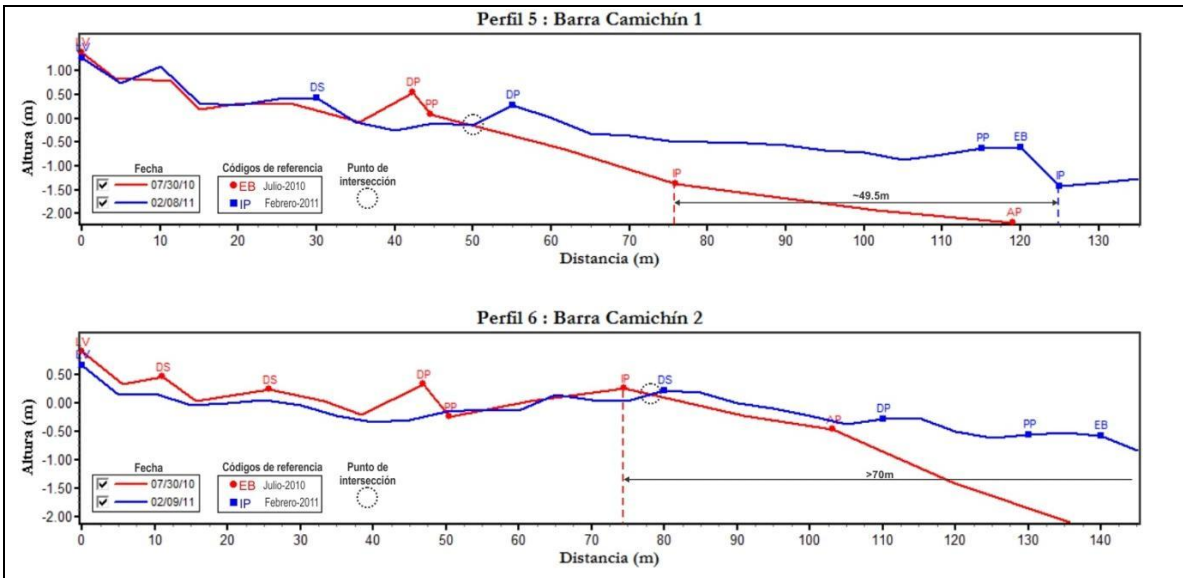


Figura 4.20 Perfiles de playa correspondientes al sector B.

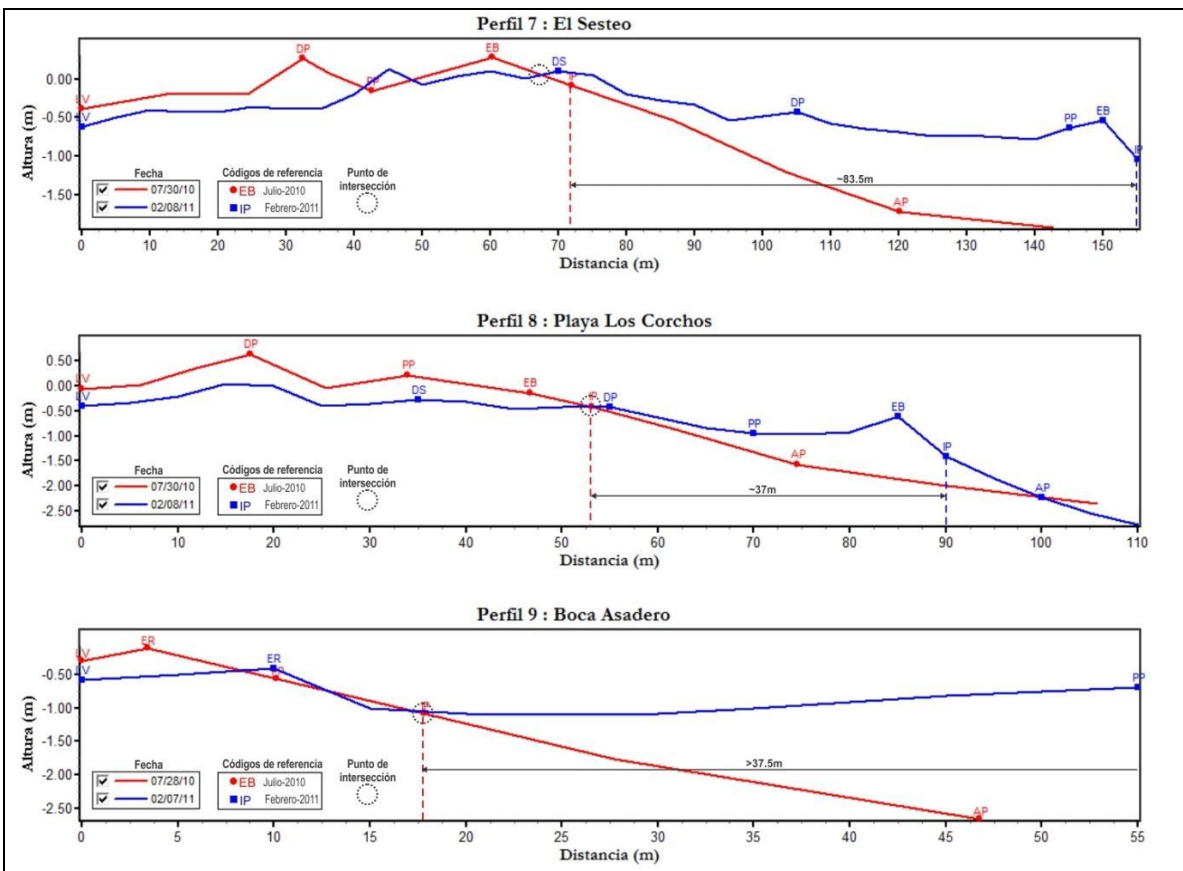


Figura 4.21 Perfiles de playa correspondientes al sector C.

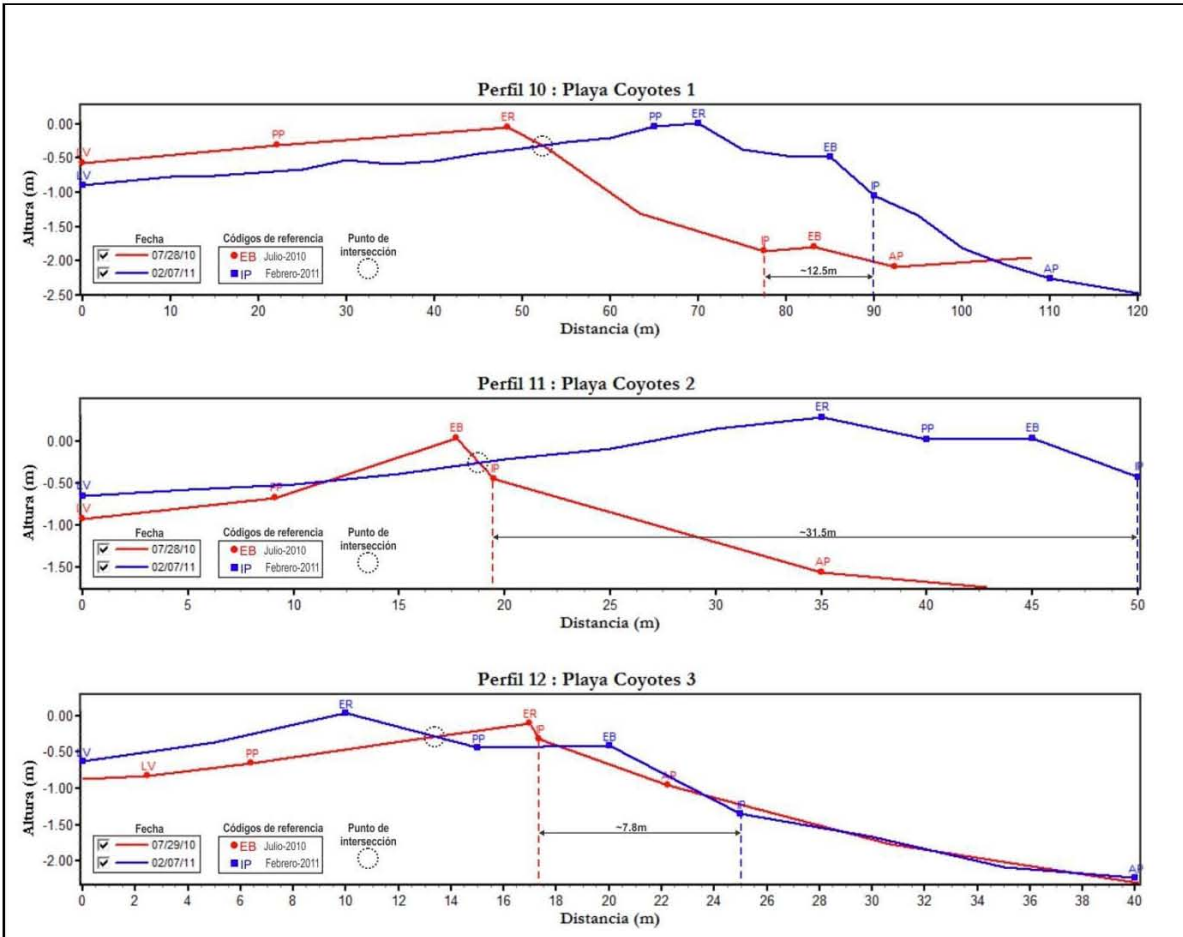


Figura 4.22 Perfiles de playa correspondientes al sector D.

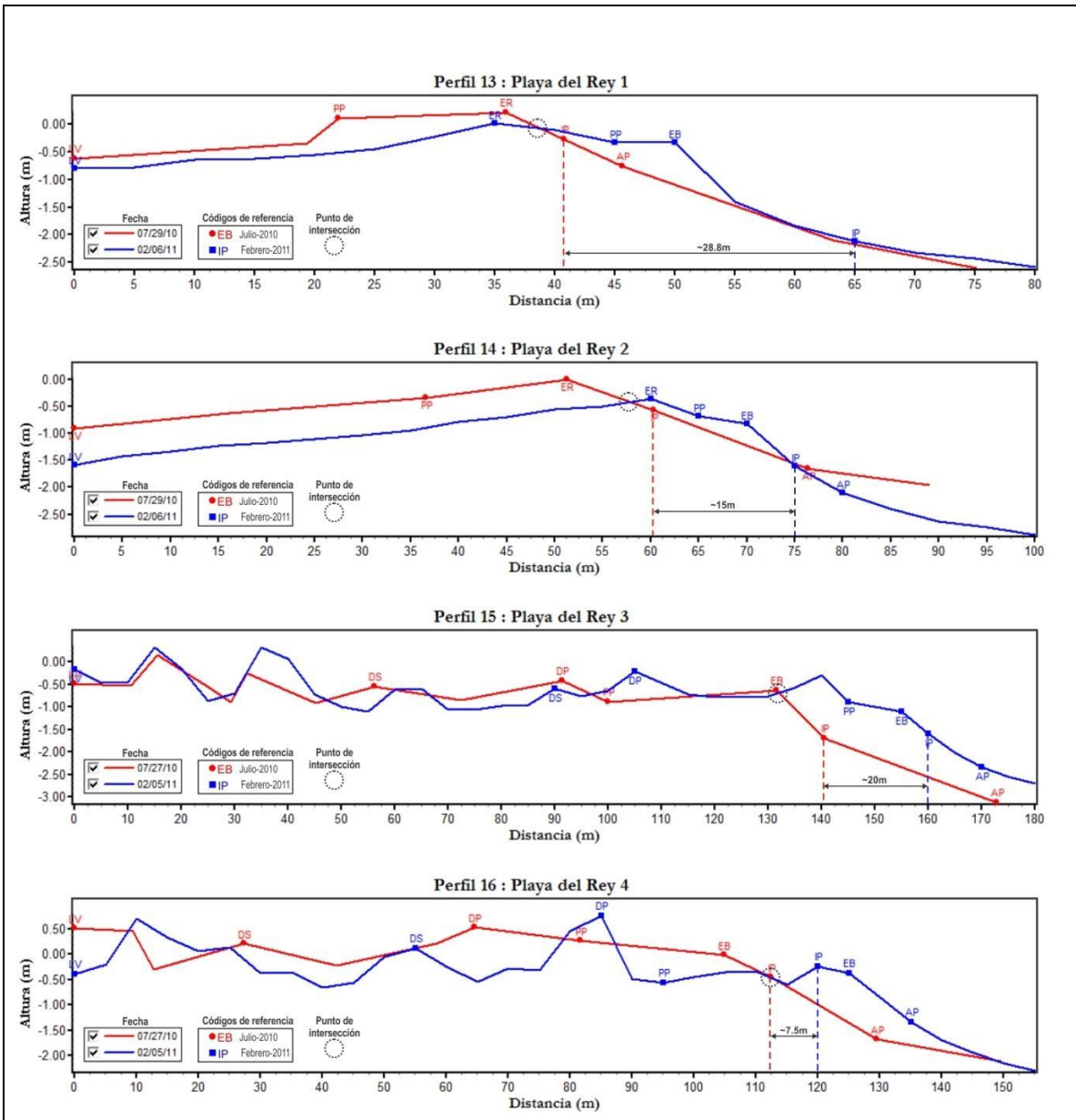


Figura 4.23 Perfiles de playa correspondientes al sector E.

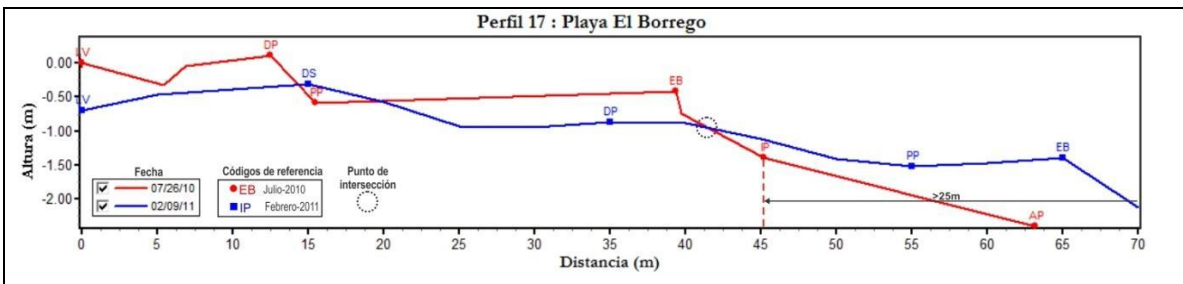


Figura 4.24 Perfiles de playa correspondientes al sector F.

4.2.1 El ancho de playa y el desplazamiento de la interplaya

Al comparar los datos de ancho de playa y desplazamiento de la IP en las Figuras 4.25 y 4.26 se aprecia que no necesariamente hay una relación directa entre ambas variables pues las playas de mayor anchura fueron las que corresponden a los perfiles 15, 7 y 6 con valores de entre 140 y 176 m, mientras que los perfiles 12, 11 y 9 registraron cifras de apenas 40 y 51 m en el ancho de playa. En contraste, los perfiles que presentaron mayor desplazamiento en la IP fueron, en orden de mayor a menor el 7, 6 y 5 con un rango de < 49 a > 100m; mientras que los perfiles 16, 12 y 1 registraron los valores más inferiores de desplazamiento con un rango de apenas <7.5 a >11 m.

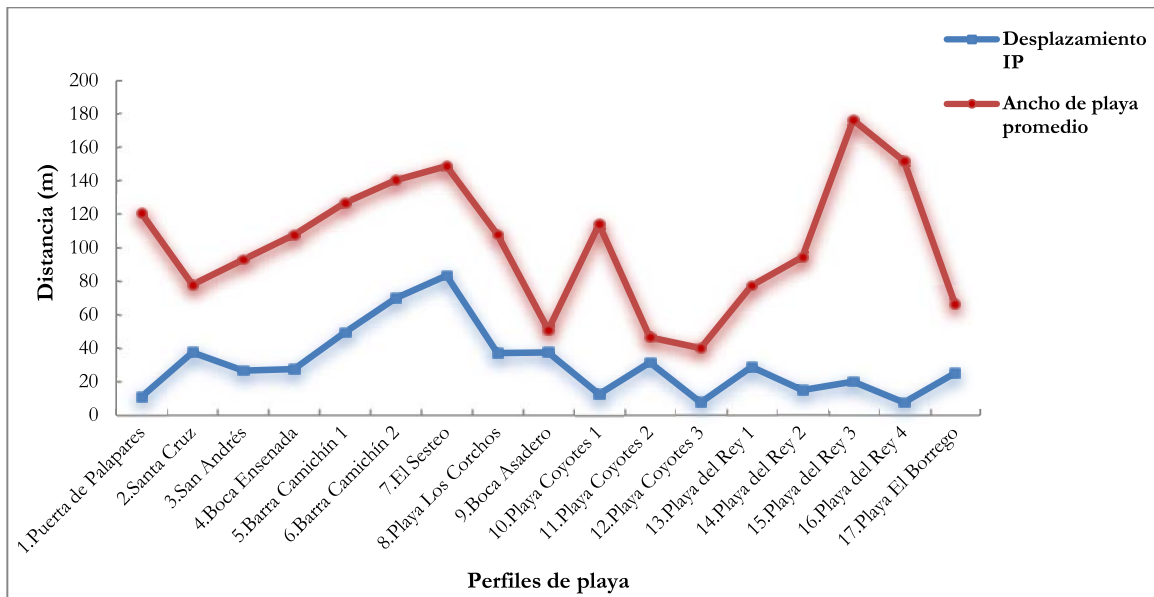


Figura 4.25 Cambios en la morfología y en la posición de la línea de costa entre el verano e invierno.

4.2.2 El ancho de playa y la pendiente

El gráfico de la Figura 4.26 permite apreciar que los perfiles que califican con valores altos en el ancho de playa están en niveles bajos en la pendiente, mientras que los perfiles con valores bajos en su ancho presentan valores altos en la pendiente; esta relación inversa lleva a plantear la posibilidad de que playas con menor pendiente sean susceptibles de ampliar su anchura con mayor facilidad. Los perfiles 11, 12 y 13 son los más representativos de dicha relación.

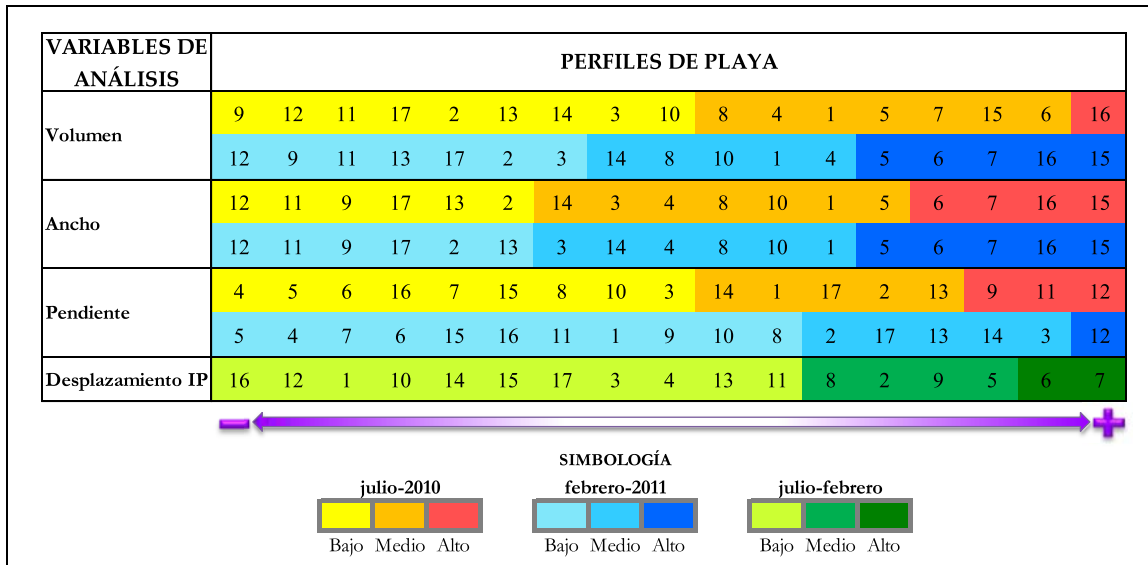


Figura 4.26 Categorías para evaluar la relación entre los atributos de cada perfil de playa. Elaboración propia.

4.2.3 El desplazamiento de la interplaya y la pendiente

Por otra parte, en el análisis de la relación desplazamiento IP *vs* pendiente de playa, los perfiles con las cifras máximas de desplazamiento coinciden con los perfiles que presentan bajas pendientes en ambas fechas de levantamiento; en el caso contrario, los perfiles con valores bajos de desplazamiento coinciden con las cifras máximas en pendiente. Ante estas observaciones es posible inferir que las playas cuya pendiente es baja propicien condiciones favorables para que exista un mayor desplazamiento en la posición de la línea de costa en mesoescalas de tiempo (Tabla 4.4 y Figura 4.26).

Tabla 4.4 Algunas variables para identificar los cambios en la posición de la línea de costa en los perfiles de playa.

Sector	Perfil de playa	Desplazamiento IP (m)	Volumen (m ³ /m)		Pendiente (° ')	
			Julio-2010	Febrero-2011	Julio-2010	Febrero-2011
A.Canal de Cuautla-Boca Ensenada	1.Puerta de Palapares	11	263.7	300.2	1°9'	1°17'
	2.Santa Cruz	37.5	159.9	185.7	2°18'	2°15'
	3.San Andrés	26.5	203.3	214.9	1°26'	2°5'
	4.Boca Ensenada	27.5	249.9	302.3	0°19'	0°22'
B.Boca Ensenada-Boca Camichín	5.Barra Camichín 1	49.5	277.8	390.3	0°23'	0°0'
	6.Barra Camichín 2	>70	367.6	454.6	0°30'	0°4'
C.Boca Camichín-Boca Asadero	7.El Sesteo	83.5	341.9	466.8	0°55'	0°36'
	8.Playa Los Corchos	37	239.8	276.7	1°17'	1°39'
	9.Boca Asadero	>37.5	75.2	140.9	3°31'	1°19'
D.Boca Asadero-Boca Cegada	10.Playa Coyotes 1	12.5	217.7	288.6	1°20'	1°36'
	11.Playa Coyotes 2	31.5	89.6	160.6	3°32'	1°14'
	12.Playa Coyotes 3	7.8	77.6	99.8	4°31'	4°5'
E.Boca Cegada-Boca El Vigía	13.Playa del Rey 1	28.8	162.2	179.3	2°27'	2°25'
	14.Playa del Rey 2	15	201.2	224.3	1°50'	2°33'
	15.Playa del Rey 3	20	348.8	516.6	1°11'	0°54'
	16.Playa del Rey 4	7.5	406.3	470.5	0°36'	0°59'
F.Boca El Vigía-Estero de San Cristóbal	17.Playa El Borrego	>25	135.7	182.9	2°13'	2°17'

4.2.4 Cambios en el volumen de sedimentos

Los cálculos del volumen de sedimentos se realizaron con el software BPAT, que toma en cuenta la altura, distancia y el ancho de 1 m en el perfil de playa para realizar las mediciones. El volumen máximo de sedimentos se registró en febrero de 2011 en el perfil 15 Playa del Rey 3, localizado 2 km al norte de la Boca El Vigía mientras que el mínimo fue para el perfil 9 Boca Asadero levantado en julio de 2010 y emplazado 500 m al norte de dicha boca de marea (Figura 4.27).

En la misma figura se observa que los perfiles con mayores cambios en el volumen de sedimentos entre las dos fechas de levantamiento son el 5, 7 y 15 que superaron los 100 m³/m de diferencia; mientras que los perfiles 3, 12, 13 y 14 apenas perdieron 30 m³/m en su volumen de sedimentos, hay que destacar que los tres últimos perfiles están situados a menos de 2 km de la Boca Cegada.

Sin embargo, con el fin de tomar en cuenta aspectos técnicos en la medición de los volúmenes, en las Figuras 4.22 y 4.23 es posible observar que los perfiles 12 y 13 en febrero solo llegan hasta la zona de interplaya, esto es así porque dada la dificultad para efectuar la medición hasta la zona de anteplaya, en esa fecha se tomó la lectura sólo hasta donde permitieron las condiciones de marea y oleaje.

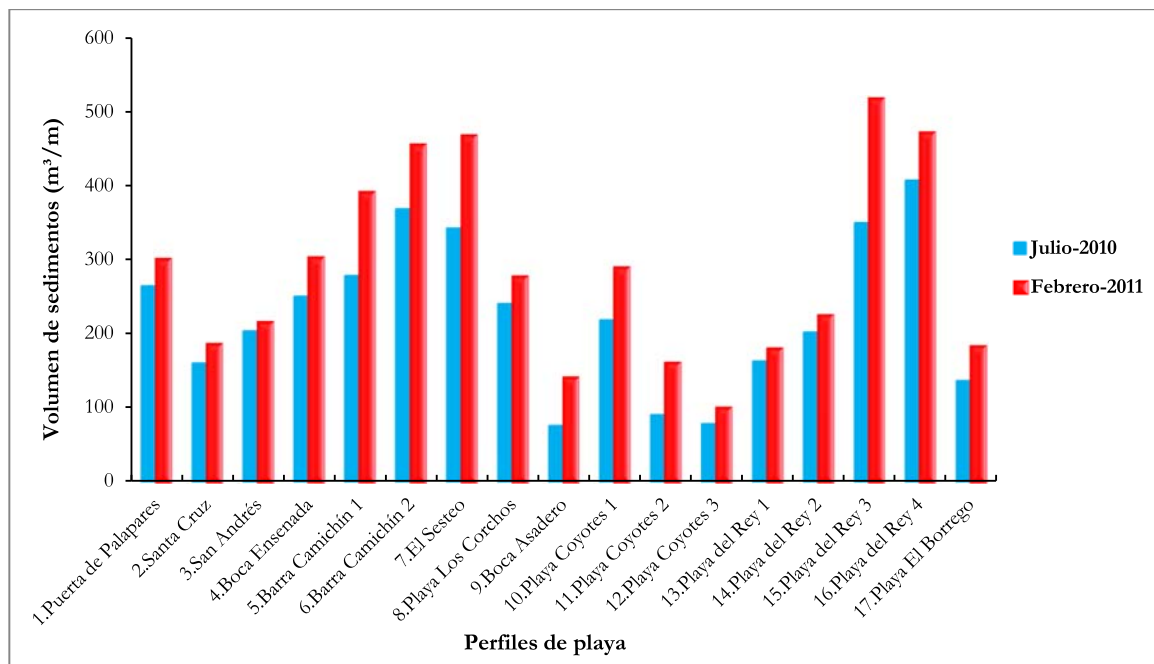


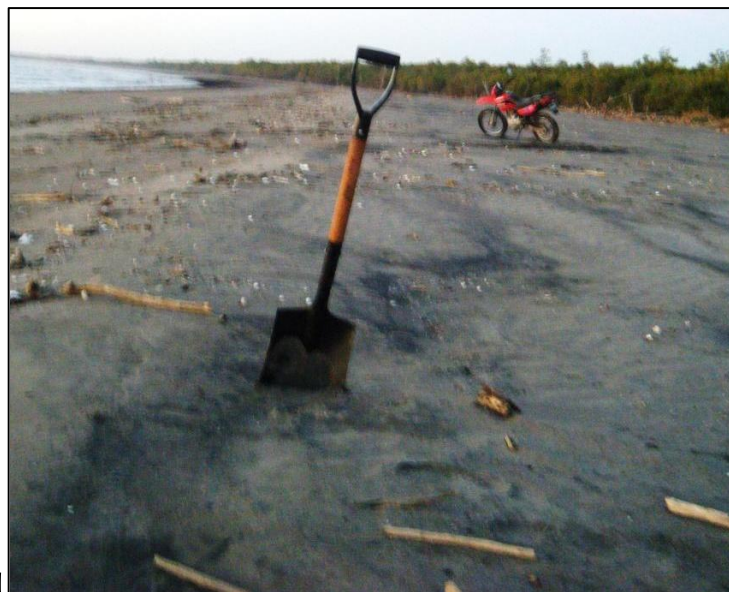
Figura 4.27 Comparación del volumen de sedimentos de los perfiles de playa en el verano e invierno.

4.2.5 Aspectos morfológicos de los perfiles de playa

El perfil que registró el mayor cambio en su morfología es el situado en la margen norte de la desembocadura del río Grande de Santiago, perfil 9 Boca Asadero, en verano su porción de frente de playa estaba ocupada por restos de troncos acumulados (palizada) pero durante el invierno esta porción de la zona sumergida del perfil fue trasformada en zona emergida (Figura 4.28).



A) julio-2010



B) febrero-2011

Figura 4.28 Cambios en la morfología del perfil de playa 9. Boca Asadero. A) julio-2010: la anteplaya e interplaya estaban ocupadas por una gran cantidad de troncos, el escarpe de erosión se situaba a 3m del inicio del perfil. B) febrero-2011: la palizada ya había sido removida y el escarpe de erosión había migrado 7m aproximadamente hacia el mar.

Otro aspecto morfológico es que, en general, los perfiles de playa con dunas presentaron cierta estabilidad en esta zona del perfil, la excepción fue el perfil 17 Playa El Borrego pero no resulta extraño si recordamos que esta situado en el sector con mayor cercanía de actividades humanas.

Exceptuando los perfiles 1 situado 1 km al sur del Canal de Cuautla y 14 emplazado 2 km al sur de Boca Cegada, en el resto de los perfiles levantados en julio se observó una marcada concavidad y pendiente en la línea del perfil donde se situaron las zonas de interplaya y anteplaya. Lo anterior permite inferir que, en concordancia con la zona tropical en que se encuentra el área de estudio, hay condiciones de una dinámica erosiva en la estación de verano y acumulativa en invierno pues en febrero, la mayoría de los perfiles presentaron convexidad en las mismas zonas del perfil.

La distribución del volumen de sedimentos a lo largo de la línea del perfil también cambio entre ambos levantamientos. En febrero la zona de posplaya y las dunas primarias y secundarias perdieron sedimentos mientras que en la interplaya y la anteplaya incrementó el volumen de material. En julio ocurre el proceso opuesto: las dunas y la parte inicial del perfil de playa ganan volumen mientras que en la interplaya y la anteplaya disminuye la cantidad de sedimentos (Figuras 4.19–4.24).

Los cambios en la morfología y en la distribución de sedimentos a lo ancho de la playa entre los meses de julio y febrero podrían explicarse por el hecho de que, en esta región del Pacífico la época de nortes y huracanes justamente ocurre entre mayo y octubre, por lo tanto, el oleaje, viento y mareas incrementan su energía y eso provoca mayor dinamismo en los sistemas hidrodinámico y de balance sedimentario.

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Desde hace décadas la comparación en la forma en que se comporta la línea de costa en décadas y estaciones ha sido uno de los métodos más empleados para intentar explicar cuáles son los factores determinantes en la evolución de un sistema costero, sin embargo, pocos son los países que tienen los recursos técnicos para lograr encontrar los anhelados resultados e incluso, puede ocurrir que aun disponiendo de la suficiente cantidad de datos provenientes de mediciones sistemáticas durante años, no se sepa interpretar la información existente y se tengan que crear métodos para tal fin *a posteriori* (Kench, 2008).

Como se mencionó en el capítulo 1 (pág. 4) las variaciones en el ancho de playa y en la posición de la línea de costa son una de tantas respuestas posibles a los cambios en la estructura de los sistemas costeros, por lo tanto, si se conocen las características de esas respuestas será más fácil identificar la magnitud de las variables que están interviniendo en dichos cambios.

En este trabajo, la medición de las tasas de cambio en la posición de la línea de costa se realizó con fuentes de datos espaciales limitados en su grado de precisión y cantidad, sin embargo, de acuerdo a los valores de incertidumbre calculados para cada fecha, el grado de precisión en las mediciones es aceptable pues dichos valores fueron considerados por DSAS al momento de realizar los cálculos (Tabla 3.6).

5.1 Relación entre las tasas de cambio y los perfiles de playa

En una playa arenosa de una zona tropical con un aparente comportamiento erosivo durante el verano y acumulativo en invierno ¿cuál es la relación entre esas características y los procesos de avance y retroceso que está experimentando la costa en años, décadas o siglos? En términos de expresión geomorfológica en la costa, es difícil apreciar tal relación a falta de escenas que brinden el marco necesario para apreciar toda la película.

Sin embargo, surge la idea de que una línea de costa con un comportamiento erosivo en verano experimente mayores cambios en su morfología en esta estación debido al incremento de la energía implicada en los procesos de oleaje y mareas a consecuencia de la llegada de tormentas, huracanes, mareas de tormenta y otros fenómenos hidrometeorológicos característicos de la estación de lluvias. En segmentos de línea de costa con condiciones de fragilidad ante el retroceso (oblicuidad de los cordones de playa, destrucción de manglar, etc.) ese incremento de energía podría generar distintos patrones de comportamiento en los cambios de la posición de la línea de costa.

Pero algunos investigadores sugieren que las cosas no siempre ocurren de esa manera, incluso, señalan que en las mediciones de tasas de cambio es mejor descartar las líneas de costa con influencia de tormentas porque introducirían “ruido” en los datos (Smith y Zarillo, 1990); otros están de acuerdo en no considerarlas pero por diferentes razones, al señalar que como hay una ciclicidad en la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, la línea de costa recupera su posición original una y otra vez (Genz *et al.* 2007).

El punto es, ¿cómo es que la línea de costa se desplaza más de 50 m hacia el continente en un período interestacional mientras que en 40 años sólo cambia su posición 18 m en la misma dirección? Justo esa es la razón por la cual es importante intentar tener la mayor cantidad de información sobre la evolución de costas, cuando se levanta un perfil de playa se tiene una fotografía fija de las características y atributos del perfil, lo mismo pasa cuando se digitaliza una línea de costa, que generalmente ha sido trazada con base en fotografías e imágenes de satélite. Al respecto, Honeycutt *et al.* (2001) señalan en uno de sus trabajos:

“Claramente las posiciones registradas en la base de datos de la línea de costa utilizada en este estudio refleja solo instantes en el tiempo donde la línea de costa representa los impactos acumulativos de procesos de transporte de sedimentos operando sobre una variedad de escalas de tiempo.”

Entonces, las tasas de cambio sólo miden la velocidad con que una línea de costa registrada en un instante del tiempo, se desplaza hacia una dirección como resultado de una larga lista de procesos acumulados que han sucedido en infinidad de períodos de tiempo menores que el período de medición. Cabe una analogía con el comportamiento fractal que experimentan las líneas de costa, no sólo en un sentido morfométrico sino también estructural en su funcionamiento (Figura 5.1).

Si extrapolamos ese análisis a los métodos que se utilizaron en este estudio podríamos decir que, en una mesoescala espacio-temporal, los perfiles de playa muestran un comportamiento cíclico que conduce a un proceso de avance o retroceso del cual ya no podemos inferir el comportamiento en escalas mayores a falta de más fechas de medición.

Ante la incógnita de la magnitud de los factores determinantes para acelerar o atenuar el desplazamiento de una línea de costa cabe preguntarse ¿qué variables de análisis pueden aportar los perfiles de playa y qué elementos brindarán a la resolución de la pregunta? Cuando se dispone de un monitoreo sistemático de la línea de costa con perfiles de playa hay las condiciones adecuadas para conocer la evolución de su posición con mayor detalle basándose en los indicadores que puedan aportar los perfiles (Harris *et al.*, 2009).

Al respecto, otra variable de análisis en perfiles de playa sugerida en este trabajo es el punto de intersección señalado en los perfiles de las Figuras 4.19 a 4.24, que corresponde al punto en donde los perfiles se intersectan entre cada fecha en las zonas de playa que intercambian su posición con más frecuencia entre las estaciones del año (interplaya y anteplaya), este punto probablemente coincide con la franja de transición de la acción de los agentes que modifican la morfología de la playa (energía del oleaje, regímenes de marea, balance de sedimentos, fenómenos hidrometeorológicos y sus procesos asociados, entre otros).

La interpolación de los puntos de intersección de perfiles a lo largo de la franja costera generaría una línea “límite de acción de los agentes modeladores de la playa”, cuyo monitoreo conduciría a aproximaciones sobre el grado de energía implicado de cada agente modelador en distintos intervalos de tiempo; además también podría servir como indicador ante la incertidumbre de saber si el movimiento de la línea de costa es constante y uniforme a través del tiempo o no.

Con cualquier técnica de levantamiento de perfiles de playa, ya sea manual o automática, en el contexto de la respuesta los perfiles de playa sólo aportarían información de los elementos morfológicos pero faltaría considerar otros indicadores sensibles a los cambios en el funcionamiento del sistema costero como la cobertura vegetal, los sistemas hidrológicos, la dinámica ecosistémica, entre otros.

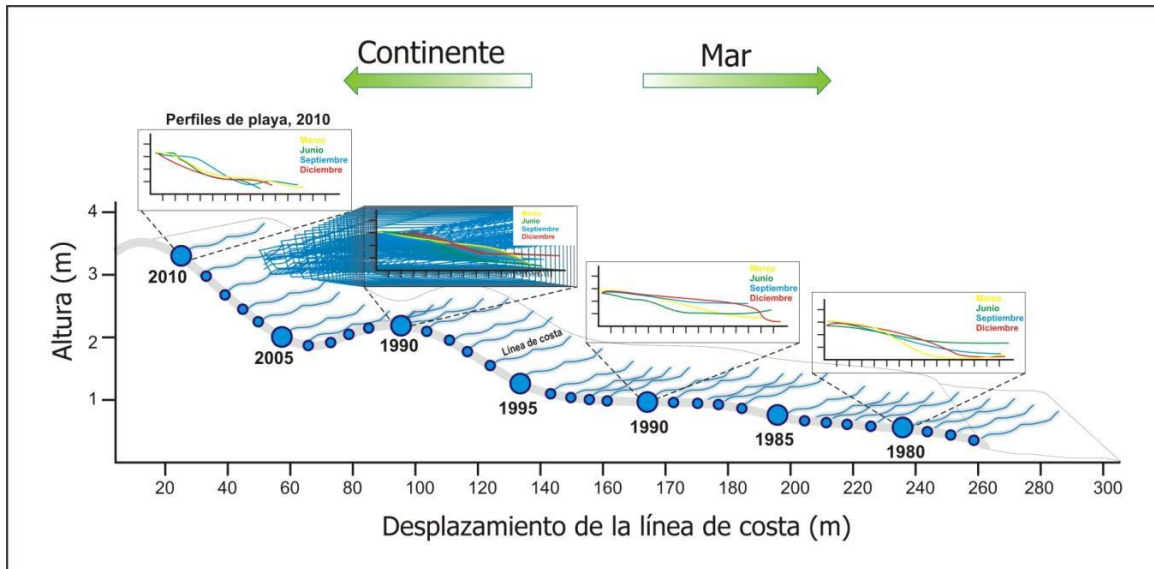


Figura 5.1 Movimiento de la línea de costa hacia el mar y el continente en escalas de décadas, años y estaciones. Esta ilustración refleja un comportamiento lineal en el desplazamiento de la línea de costa, sin embargo, los cambios pueden ser repentinos o abruptos en algunos años, mientras apenas discernibles en décadas, este es un fuerte argumento para monitorear la línea de costa mediante perfiles de playa para conocer la magnitud en el tiempo de los cambios y la forma en la que han ocurrido. Elaboración propia.

5.2 El papel de las bocas en la distribución del tipo de línea de costa

Cuando las bocas de marea coinciden con las bocas de ríos (estuarios) y con esteros como es el caso de la Boca Ensenada, Boca Camichín, Boca Asadero, Boca El Vigía y Boca de San Cristóbal su morfometría y balance de sedimentos depende en gran medida del intercambio entre las aguas marinas y continentales, dicho intercambio también es el resultado de las interacciones entre el rango de marea, la energía del oleaje, el aporte de sedimentos y el influjo de agua dulce, entre otros factores naturales (FitzGerald, 2005; Warren, 1968).

La distancia de las bocas de marea respecto a las playas adyacentes influye de manera acentuada en el comportamiento que registran las mismas, la representación de las tasas de cambio en el Anexo I coincide con lo señalado al respecto por Absalonsen y Dean (2011). Las líneas de tasas de cambio son más variables en los procesos de avance y retroceso en la cercanía de todas las bocas; mientras que a mayor distancia de las bocas la velocidad de cambio en la posición de la línea de costa presenta mayor homogeneidad.

Si el funcionamiento natural del sistema deltaico Santiago-San Pedro es alterado por actividades humanas en alguno de sus subsistemas, los efectos indudablemente se verán reflejados en la materia y energía que interactúa en la morfodinámica de las bocas de marea. En el caso de la Boca Asadero hay una alta probabilidad de que el desplazamiento positivo registrado en la margen norte durante 1970-1999 haya revertido su comportamiento durante los últimos doce años de avance a retroceso debido a la construcción de presas, canales de derivación para riego y desvío de brazos del río Grande de Santiago.

En la Tabla 5.1 se reportan los valores de la tasa de cambio para los perfiles de playa establecidos en las márgenes de cada boca según el transecto al que corresponden, aquí se puede apreciar que el cambio más representativo en el comportamiento corresponde justamente al perfil 9 localizado en la margen norte de la Boca Cegada, que pasó de 14.65 m/a de avance entre 1970 y 1999 a -53.6 m/a de retroceso en los últimos doce años.

Tabla 5.1 Tasa de cambio en las líneas de costa cercanas a las bocas de marea.

Perfil de playa	Transecto	Boca	Localización	Tasa de cambio (m/a)		
				1970-1999	1999-2011	1970-2011
4	1 033	Boca Ensenada	Margen norte	-2.51	-0.75	-1.54
5	1 056		Margen sur	-0.26	-2.26	-0.84
6	1 218	Boca Camichín	Margen norte	8.75	4.8	7.6
7	1 251		Margen sur	5.4	-5.0	2.4
9	1 471	Boca Asadero	Margen norte	14.65	-53.6	-5.34
10	1 504	Boca Asadero	Margen sur	-18.06	-11.81	-16.23
12	1 590	Boca Cegada	Margen norte	-7	-6.74	-7
13	1 605	Boca Cegada	Margen sur	-5.6	-8.58	-6.5
16	1 807	Boca El Vigía	Margen norte	4.12	2.44	3.6

Dolan *et al.* (1979) citados en Smith y Zarillo (1990) consideran que no se deberían tomar en cuenta las líneas de costa adyacentes a las bocas de marea por la alta variabilidad que estas tienen y por la posibilidad de influenciar las medidas de la posición a largo plazo. Sin embargo, una de las cuestiones a resolver en los métodos de este trabajo fue justamente la migración de las bocas en las diferentes fechas de medición.

Al digitalizar las tres líneas de costa de manera discontinua, interrumpiendo su trazado en la posición de las bocas, no se pudieron realizar los cálculos de las tasas de cambios en los transectos correspondientes a dicha posición, como se observa en las Figuras 4.3 y 4.10, las bocas Camichín y Cegada se han desplazado más de 1 km de su posición original en 1970.

Entonces, al no considerar la posición de las bocas quizá se pierde información valiosa, porque también pudieran dejarse de lado otras variables útiles en la interpretación del comportamiento de las costas, como la migración y el crecimiento de algunos otros rasgos geomorfológicos (barras y flechas arenosas, entre otros).

5.3 La naturaleza de las posibles causas en las variaciones de la línea de costa

La fisiografía de cordones litorales juega un papel muy relevante como agente natural en los cambios morfológicos en el área de estudio pues como se mencionó en el capítulo de resultados, la oblicuidad de la sucesión de cordones adyacentes a la costa propicia condiciones de fragilidad ante la falta de una “barrera” que actúe como obstáculo ante los procesos erosivos causados por la energía del oleaje y las mareas.

En algunos segmentos de la línea de costa, esas condiciones más los impactos de fenómenos meteorológicos con potencial destrucción de manglares pueden ser los responsables de que, en la actualidad, se estén perdiendo varios kilómetros cuadrados de franja costera. Particularmente, el sector D está experimentando cifras alarmantes de retroceso desde 1970 a la fecha, en este período de tiempo se han perdido aproximadamente 334 hectáreas de superficie continental.



Figura 5.2 El impacto del huracán Kenna (2002) en la playa Coyotes. Los huracanes como Rosa y Kenna quizá presenten poca expresión en la configuración de la línea de costa en el momento de su impacto pero al destruir la vegetación de manglar, que actúa como defensa natural ante la erosión costera, dejan sin el “efecto barrera” las playas adyacentes lo que se traduce en pérdidas aceleradas de litoral en escalas mayores de tiempo.

Otros fenómenos que explican la pérdida de franja costera son la llegada de huracanes y tormentas tropicales desde julio a octubre en la región, que impactan con distinta magnitud el frente deltaico de Nayarit. Desde que el huracán Adriana impactó las costas de Nayarit en 1960, ningún otro meteoro de tal magnitud había tocado las costas nayaritas hasta el 14 de octubre de 1994, año en que el huracán Rosa de categoría 2 impactó con vientos de hasta 160 km/h (Tovilla y Orihuela, 2004).

Pero el huracán de mayor magnitud que hasta el momento ha dejado mayores huellas de impacto en toda el área de estudio ha sido Kenna de categoría 4, que en 2002 dejó daños calculados en 180 millones de pesos y provocó la evacuación del 60 % de la población de San Blas, además de la destrucción de construcciones en las playas El Colorado, El Sesteo y Los Corchos (Figura 5.1).

En la actualidad, la intervención humana en los elementos de los sistemas costeros es vista con el enfoque de “interferencia”, y no hay acuerdos sobre el grado de impacto que dicha intervención tenga en diferentes escalas espacio-temporales. En este contexto, la construcción de las presas Aguamilpa y El Cajón pudieran ser vistas también como perturbaciones humanas en el flujo de sedimentos provenientes del continente que, como ya se ha visto, probablemente sean responsables del acelerado retroceso en la margen norte de la Boca Asadero.

El punto es, ¿cuál es la magnitud de perturbación en el equilibrio de las costas derivado de la retención de sedimentos cuenca arriba del delta del río Santiago? y ¿cuál será su expresión espacial en unas décadas en el frente deltaico? Considerando la clasificación de Galloway (1975), si este sistema fluvio-deltaico tiene un mayor predominio de la energía del oleaje y el régimen fluvial se esperaría que, en efecto, el frente deltaico tuviera una respuesta ante cualquier alteración en la descarga de los ríos y el flujo de los sedimentos.

Cuantificar el grado de alteración en los sistemas deltaicos a causa de actividades humanas es algo que actualmente resulta complejo, menos del 10 % de los ríos en el mundo han sido monitoreados con fines de medición de variables hídricas, por lo tanto, se han desarrollado modelos de transporte hidrológico que son capaces de predecir el flujo de los sedimentos y la descarga de los ríos, pero lo que se ha podido modelar aún resulta insuficiente para varias interpretaciones (van der Burgh y Brommer, 2006).

Otras formas en las que la población ha intervenido en el área de estudio es mediante la construcción del Canal de Cuautla en 1976, esta obra no sólo ha tenido efectos en el intercambio de materia y energía al interior de los humedales costeros (marismas y lagunas), también es la causa de la pérdida de más de 300 m de franja costera en la margen norte del canal (Figura 4.2).

La construcción de diques y escolleras para la contención del impacto de la energía del oleaje en diferentes localidades del área de estudio también es otra causa del desplazamiento de las playas, la evidencia más contundente de esto podría ser la Playa El Borrego, que actualmente registra un retroceso absoluto en toda su extensión y que es el único segmento de línea de costa limitado por dos escolleras en ambos extremos (Figura 5.3).

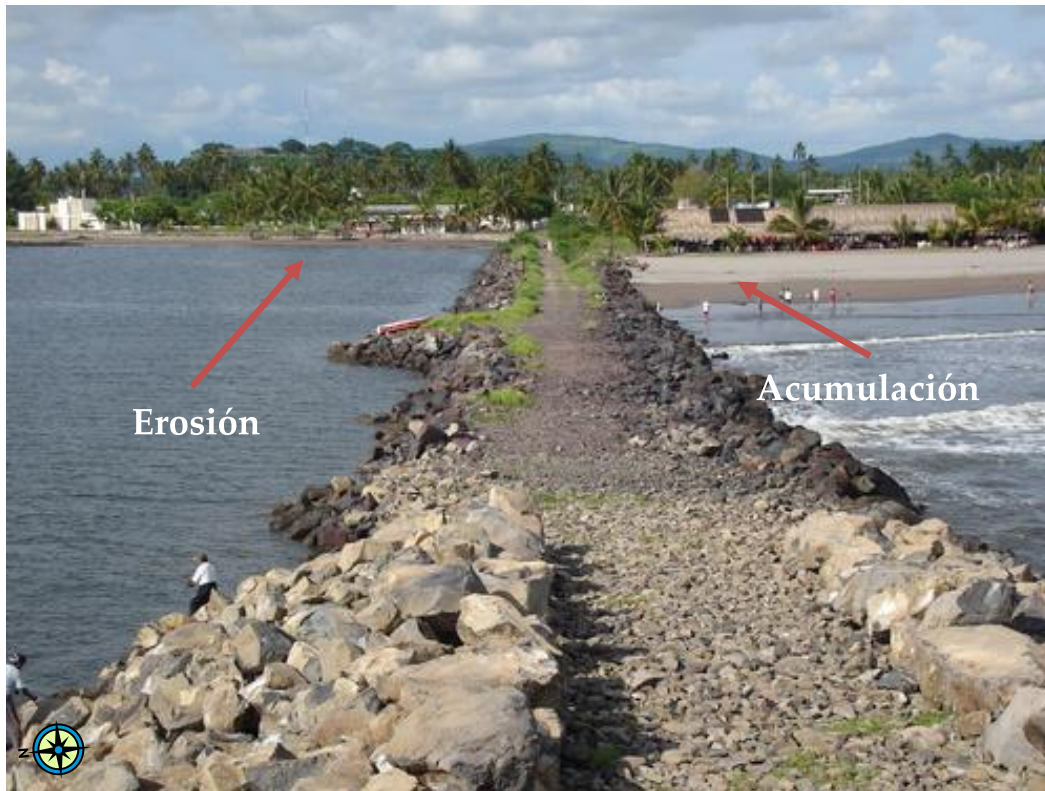


Figura 5.3 Escollera construida en la margen sur de la Boca El Vigía, al norte de la Playa El Borrego. Este un ejemplo del comportamiento general de los sedimentos en una escollera, la dirección de la deriva litoral favorece la acumulación de los sedimentos en el lado sur de la escollera provocando avance en la línea de costa, mientras que al norte las corrientes de entrada y salida de marea de la Boca El Vigía, transportan el material sedimentario mar afuera generando el retroceso del litoral. (Fotografía de Marcos Octaviano Espinoza, Panoramio)

Es complejo intentar determinar el origen y la dimensión de los factores que intervienen en la evolución de los sistemas fluvio-deltaicos, de ahí que se hayan desarrollado muchos modelos desde diversos enfoques para aproximarse a las claves de la respuesta. Por citar un ejemplo, en el ámbito de la ingeniería de costas se han propuesto varios modelos conceptuales, numéricos y experimentales para categorizar las variaciones morfológicas de las playas en función de parámetros hidrodinámicos y geológicos.

Sin embargo, como mencionan Stive *et al.* (2002) al citar como ejemplos de estos modelos la clasificación de “movilidad de la playa” de Dolan *et al.* (1978) y la clasificación del “estado morfodinámico de las playas” de Short y Hesp (1982) del que derivó posteriormente el “estado de playas” de Wright y Short (1984), son modelos limitados en la interpretación de procesos de jerarquía multiescalar porque se realizan en función de dos o más parámetros instantáneos y adimensionales como el tamaño de grano, la altura del oleaje y la pendiente.

En realidad, y como señalan van der Burgh y Brommer (2006) al referirse a los diversos enfoques en el diseño de modelos para predecir procesos en las costas y su evolución, el problema es que no hay un modelo de comportamiento o de predicción suficientemente integral como para tomar en cuenta la mayor parte de los elementos que intervienen en el sistema deltaico.

Ya en el capítulo 1 se hablaba de los intrincados caminos que aún faltan recorrer a la ciencia para conocer el tipo de trayectoria que siguen varios fenómenos de la naturaleza, pues bien, los resultados reportados en esta investigación reflejan que la evolución de la línea de costa es uno de ellos. Los métodos de que se disponen en la actualidad hacen imposible tener todos los elementos de análisis para saber si estamos ante un fenómeno de comportamiento lineal, no lineal, caótico, con tendencias, ciclos, oscilaciones, frecuencias, etcétera, en los sistemas costeros.

5.4 Los segmentos de línea de costa de aparente estabilidad y el significado de “equilibrio”

Retomando los estudios de Curray *et al.* (1969) sobre la forma en que ha evolucionado el área de estudio como un antecedente para explicar lo que se ha encontrado en esta investigación, el retroceso es el proceso dominante que se esperaba encontrar en las últimas décadas, esto ha sido confirmado con los cálculos de las tasas de cambios (-0.81 m/a durante el período 1970-2011), sin embargo, algo que no puede pasar desapercibido son los segmentos de línea de costa con un comportamiento de aparente estabilidad.

Aunque cuantitativamente la cifra de estabilidad no parece ser tan significativa (Tablas 4.1, 4.2 y 4.3), en términos de expresión espacial sí podría serlo. Tener más de dos kilómetros de línea de costa cercana al poblado Santa Cruz con condiciones “estables” suena como tener resuelta la pregunta constante de los manejadores de zonas costeras sobre el lugar adecuado para emplazar infraestructura turística.

Sin embargo, ¿realmente es así? Ante esta cuestión sería mejor conducirse con cuidado porque aunque puede parecer que en las “franjas de estabilidad” *nada sucede*, los mecanismos de respuesta en cortos períodos de tiempo ante el impacto de los huracanes podrían ser los mismos que ocurren en otras playas como en la Playa Coyotes, por citar un ejemplo de los fenómenos que dejan huella en la fisiografía de las costas en cuestión de horas (Figura 5.3).

Más allá de los fines económicos que pudieran tener este tipo de líneas de costa, es apremiante la necesidad de conocer también las posibles causas del “equilibrio” o la estabilidad. No siempre se debe partir de hechos que signifiquen una amenaza para la población para comprender como funcionan ciertos procesos naturales. En otras palabras, también de la estabilidad se puede aprender.

Si lo que pretendemos es *mantener* la posición de la línea de costa “estable”, tendríamos que conocer cuáles son las condiciones ambientales a las que se están ajustando las playas y cuál será el período de tiempo de duración de esa relativa estabilidad.



Figura 5.4 Pozos artesianos en la línea de marea alta de la playa El Colorado, 15 km aproximadamente al sur de Santa Cruz. Los pobladores de San Andrés refieren que los pozos son parte de las construcciones dañadas por la llegada de los huracanes Kenna y Rosa a la región, estos pozos se localizaban medio kilómetro hacia el mar respecto a su posición actual

5.5 Impactos derivados de los variaciones en la línea de costa

Tomando en cuenta que la línea de costa estudiada forma parte de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, los cientos de especies de flora y fauna que habitan en éstas 220 000 hectáreas de valiosos humedales costeros serían las primeras en sufrir las consecuencias de un acelerado retroceso como el que está experimentando la Playa Coyotes.

Cuando el retroceso de las costas se convierte en un problema *crónico* los impactos ambientales, sociales y económicos implican el diseño y puesta en marcha de complejos planes de recuperación del “equilibrio” ambiental. Una de las principales consecuencias del acelerado retroceso de la costa es la hipersalinización de los suelos, y por lo tanto, la pérdida de manglares y de superficie de suelo dedicada a cultivos y ganadería en las costas adyacentes (Ortiz, 1988).

Según los cálculos realizados por el Instituto Scripps de Oceanografía, una hectárea de manglares en la franja costera podría tener un valor económico de 37 500 dólares anuales (Cárdenas, 2011); de acuerdo a esas cifras, si en el área de estudio se han perdido en total más de 687 hectáreas de franjas costera durante estos últimos 41 años, el costo económico sería superior a los 25 millones de dólares por cada año transcurrido. Sin embargo, hay que recordar que los costos ambientales son aún incalculables debido a la complejidad que supone la alteración de un elemento en el resto de la estructura de un sistema fluvio-deltaico.

Aunque en el área de estudio hay relativamente poca población cuyas actividades económicas dependen directamente de las costas (19 344 habitantes), también la población indirectamente relacionada puede verse afectada. Por ejemplo, según la percepción de los pescadores de San Blas, el cierre de la Boca del Rey en 1990 ha tenido un impacto negativo en las actividades pesqueras ribereñas pues es una causa externa de que durante los últimos años hayan disminuido tanto el volumen de captura como la variedad de especies en la región (Sanjurjo y Campos, 2011).

El Canal de Cuautla es el ejemplo más contundente de los efectos de los cambios en la línea de costa por el cierre o apertura artificial de canales pues los cambios en la hidrodinámica y en el flujo de mareas ha producido también hipersalinización y azolvamiento en las marismas y cañadas generando cambios en los ciclos de reproducción de especies comerciales (Cárdenas, 2011).

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo ha brindado algunas pautas para comprender la distribución espacial y la magnitud de los procesos de avance y retroceso entre el Canal de Cuautla y el Estero de San Cristóbal y ha aportado elementos de análisis para continuar indagando en la relación que existe entre la intervención de la actividad humana en el sistema fluvio-deltaico, los fenómenos, procesos naturales y su manifestación en la estructura y el funcionamiento del sistema durante los últimos 41 años.

Los costos ambientales y económicos de la construcción de canales artificiales como el Canal de Cuautla y del cierre de bocas como la Boca del Rey todavía son difíciles de calcular pero al menos ya existe una evidencia documental de sus efectos en la morfología de la costa, que se refuerza con la medición de las tasas de cambio.

Sin el conocimiento de los mecanismos que afectan el sistema costero, es difícil atribuir el origen de las causas que están generando los procesos de escala global, como el cambio climático, y es más complicado aún hacer predicciones sobre su evolución, además, la línea de costa es uno de los indicadores más sensibles al ascenso del nivel del mar, por lo tanto, estas mediciones también constituyen una fuente documental para monitorear las variaciones del nivel del mar.

Aunque este estudio es parte de una línea de investigación de reciente creación en México, revela la importancia de realizar una planificación integral de las zonas costeras en las que actores sociales y gubernamentales deben contar con información suficiente para la toma de decisiones. Ante la pérdida de franjas costeras quienes resultan más afectados son los habitantes de localidades cercanas a la costa, como es el caso de San Blas, y quienes dependen de actividades económicas relacionadas con ambientes costeros.

Si la población cercana a las playas conoce los procesos que están ocurriendo en el medio donde vive, es probable que sean los primeros en reconocer la importancia de evaluar los impactos de cualquier intervención humana en escalas locales o globales en el lugar donde viven y puedan ejercer la suficiente influencia para aprobar o impedir determinadas obras de ingeniería, infraestructura turística o de granjas de cultivo de especies marinas.

No hay duda de que las mediciones de cambio y los perfiles de playa representan un índice que puede servir como herramienta técnica para el manejo integral de las zonas costeras; pero también es cierto que a mayor precisión en los datos mayor es el espectro de uso de la información porque se generan datos en multiescalas de espacio y tiempo que pueden ser útiles para tomar una amplia variedad de decisiones en varios campos del conocimiento.

Por lo tanto, es necesario seguir generando información relacionada con los sistemas costeros para comprender su funcionamiento con estos y otros métodos de medición cuya implementación se lleve a cabo de manera sistemática y con objetivos claros que conduzcan si no a conclusiones definitivas, sí a explicaciones más cercanas a la realidad.

Lista de referencias

- Absalonsen, L. and Dean, R.G. (2010). Characteristics of shoreline change along the sandy beaches of the State of Florida: an atlas. <http://nsgl.gso.uri.edu/flsgp/flsgpm10001.pdf> Fecha de consulta: 24 de enero de 2012.
- Absalonsen, L. and Dean, R.G. (2011). Characteristics of the shoreline change along Florida sandy beaches with an example for Palm Beach County. *Journal of Coastal Research*, **27** (6A): 16-26.
- Aco, A.P. (2003). Fisiografía y evolución de la planicie costera del delta del Río Grande de Santiago, Nayarit, México. *Tesis de Licenciatura*. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Instituto Politécnico Nacional, México, 70 p.
- Ayala-Castañares, A. y Phleger, F.B. (1969). *Memoria del Simposio Internacional sobre Lagunas Costeras*. Instituto de Biología. UNAM-UNESCO. México. 686 p.
- Baptista, P., Cunha, T., Bernardes, C., Gama, C., Ferreira, Ó. y Dias, A. (2011). A precise and efficient methodology to analyze the shoreline displacement rate. *Journal of Coastal Research*, **27**(2):223-232.
- Berlanga Robles, C.A. (2006). Caracterización de los paisajes costeros de Sinaloa y norte de Nayarit, México a través del análisis de los patrones de cobertura del terreno. *Tesis de Doctorado*. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México. 197 p.
- Blanco y Correa, M. (2009). Estudio de caso: Marismas Nacionales, Nayarit-Sinaloa. En el taller: "Definición de prioridades para la restauración y conservación de manglares en la región noroeste". CIBNOR. Instituto Nacional de Ecología. Agenda Ramsar para la Conservación. Baja California Sur, 17-19 de junio de 2009.
- Boak, E. and Turner, I.L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, **21**(4):688-703.
- Brocal, R., López García, M.J., Pardo Pascual, J.E. (2005). Análisis de la evolución de la línea de costa en el litoral valenciano mediante SIG e imágenes de satélite. En: Sanjaume, E. y Mateu J. F. (coordinadores) *Geomorfología Litoral i Cuaternari*. pp. 73-86.
- Burkett, V., Codignotto, J.O., Forbes, D.L., Mimura N, Beamish R.J., Ittekkot, V. (2001). Coastal Zones and Marine Ecosystems en: IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. USA. pp.356-370.
- Byrnes M.R., Crowell M. y Fowler C. (2003). Shoreline mapping and change analysis: technical considerations and management implications-Preface. *Journal of Coastal Research*. Special Issue, **38**:1-4.
- Camfield, F.E. and Morang, A. (1996). Defining and interpreting shoreline change. *Ocean and Coastal Management*, **32**(3):129-151.
- Cárdenas, G.G. (2011). Tesoro ecológico en riesgo. Los manglares de Marismas Nacionales. Red del Agua UNAM. En: <http://www.agua.unam.mx> Fecha de consulta: 05 de junio de 2012.

- Carver, R.E. (1971). *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley. USA. 653p.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres.(2002). Observaciones sobre la erosión playera cerca del poblado Palmar de Cuautla, Nayarit.México. En: <http://www.cenapred.unam.mx> Fecha de consulta: 25 de octubre de 2011.
- Comisión Nacional Forestal. (2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. En: <http://148.223.105.184/infys/> Fecha de consulta: 25 de mayo de 2011.
- Cooper, N. J., Leggett, D.J.and Lowe, J.P. (2000). Beach-profile measurement, theory and analysis: practical guidance and applied case studies. *Water and Environment Journal*, **14**(2):79-88.
- Cotler Ávalos, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Rio Arronte. 231 p.
- Cowell_a, P.J., Stive, M.J.F., Niederroda, A.W., de Vriend, H.J., Swift, D.J.P., Kaminsky, G.M. and Capobianco, M. (2003). The coastal-tract (part 1): a conceptual approach to aggregated modelling of low-order coastal change. *Journal of Coastal Research*, **19**(4):812-827.
- Cowell_b, P.J., Stive, M.J.F., Niederroda, A.W., Swift, D.J.P., de Vriend, H.J., Buijsman, M.C., Nicholls, R.J., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Cleveringa, J., Reed, C.W. and de Boer, P.L. (2003). The coastal-tract (part 2): applications of aggregated modelling of lower-order coastal change. *Journal of Coastal Research*, **19**(4):828-848.
- Crowell M., Leatherman S.P. and Buckley, M.K. (1991). Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, **7** (3): 839-852.
- Curry, J.R. y Moore, D.G. (1963). Sedimentos e historia de la costa de Nayarit, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **26**(2):107-116.
- Curry, J.R., Emmel, F.J. and Crampton,P.J. (1969). Holocene history of strand plain lagoonal coast, Nayarit, México.En: Ayala-Castañares, A. y Phleger, F.B. (editores). *Memoria del Simposio Internacional sobre Lagunas Costeras*. Instituto de Biología. UNAM-UNESCO. México. pp.63-100.
- Davies Jr., R. and FitzGerald, D.M.(2009). *Beaches and Coasts*.Blackwell Publishing,United Kingdom. 432p.
- Del Río, R.L. y Gracia, F.J.P. (2008). Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa. *Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de las zonas costeras: análisis de la evolución de playas y dunas*". Actas de las Jornadas Técnicas, 10 y 11 de julio de 2008. Universidad Politécnica de Valencia, España. pp. 12-17.
- Delgado, I. and Lloyd, G. (2004). A simple low cost method for one person beach profiling. *Journal of Coastal Research*, **20**(4):1246-1252.
- Díaz, M.S. (2005). Evaluación de la aptitud del suelo para el ordenamiento ecológico de la costa norte de Nayarit. *Tesis de Maestría*. Posgrado en Ciencias Biológicas. Instituto de Ecología. UNAM. 176 p.
- Dolan, R., Fenster, M.S. and Holme S.J. (1991). Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, **7** (3):723-744.
- ESRI.(2008). ArcGIS. Versión 9.3. Redlands, California.

- Fallas, J. (2004). Ortorectificación de fotos aéreas con ILWIS.Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre-EDECA. Universidad Nacional.Costa Rica. 65 p.
- Fallas_a, J. (2009). Georeferenciación de imágenes de Google Maps con ArcView GIS y Santitools.Escuela de Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Tierra y Mar. Universidad Nacional. Costa Rica. 27 p.
- Fallas_b, J. (2009). Descarga de imágenes de alta resolución de “Google Maps”: imágenes satelitales de alta resolución a su alcance. Escuela de Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Tierra y Mar. Universidad Nacional. Costa Rica. 29 p.
- Fenster, M.S., Dolan, R., and Elder, J.F.(1993). A new method for predicting shoreline positions from historical data. *Journal of Coastal Research*, **9**(1):147-171.
- Fernández-Eguiarte, A., Gallegos-García, A. y Zavala-Hidalgo, J. (1990). Oceanografía Física 1 (Masas de agua y mareas de los mares mexicanos).Atlas Nacional de México. Hoja IV.9.1.Escala 1: 4 000 000. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- FitzGerald, D.M. (2005). Tidal inlets. En: Schwartz, M.L.(editor) *Encyclopedia of Coastal Science* . pp. 323-327.
- Fletcher, C.H., Rooney, J.J.B., Barbee, M., Lim, S.C. and Richmond, B.M. (2003). Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*. Special Issue **38**:106-124.
- Galgano, F.A., Leatherman, S.P. (2005). Modes and patterns of shoreline change. En: Schwartz, M.L.(editor) *Encyclopedia of Coastal Science* . pp. 651-656.
- Genz, A.S., Fletcher, C.H., Dunn, R.A., Frazer, L.N. and Rooney, J.J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, **23**(1):87-105.
- Golden Software Inc., (2009). Graphing System (Grapher).Versión 8.0.278.Colorado.
- Goodwin, L., Miller, T. and Stein D.(2009). Where is the shoreline? Considerations involved in defining the shoreline. *NOAA Coastal Services Center*. En: <http://geotools.csc.noaa.gov> Fecha de consulta: 16 de septiembre de 2011.
- Google Earth_a (2011). Imagen “G31” Catalog ID: 1010010007B3E901. Fecha de captura: 07 de febrero de 2011. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Google Earth_b (2011). Imagen “G41” Catalog ID: 1010010007B3E901. Fecha de captura: 07 de febrero de 2011. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Google Earth_c (2011). Imagen “G61” Catalog ID:1010010007B3E902. Fecha de captura: 07 de febrero de 2011. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Google Earth_d (2011). Imagen “G81” Catalog ID:1010010007B3E903. Fecha de captura: 07 de febrero de 2011. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Google Earth_e (2011). Imagen “G101” Catalog ID:1010010007C0BD02. Fecha de captura: 17 de enero de 2011. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.

- Google Earth_f (2010). Imagen “G121” Catalog ID:1010010007C0BD03. Fecha de captura: 15 de noviembre de 2010. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Google Earth_g (2010). Imagen “G131” Catalog ID:1010010008EDA501. Fecha de captura: 15 de noviembre de 2010. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Google Earth_h (2010). Imágen “G141” Catalog ID:1010010008EDA501. Fecha de captura: 15 de noviembre de 2010. Fecha de acceso: 08 de agosto de 2011.
- Guillén J. y Díaz J.I. (1990). Elementos morfológicos en la zona litoral: ejemplos en el delta del Ebro. *Scientia Marina*, **54**(4):359-373.
- Hansom, J.D. (2001). Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach. *Catena*, **42**(2-4):291-305.
- Harris M.S., Wright E.E., Fuqua L. and Tinker T.P. (2009). Comparison of shoreline rates derived from multiple data types: data compilation for legislated setback lines in South Carolina (USA). *Journal of Coastal Research*. Special Issue **56**:1224-1228.
- Haslett, S. K. (2000). *Coastal Systems*. Routledge. London, 218p.
- Hernández Santana, J.R., Lugo Hubp, J. y Ortiz Pérez, M.A. (2007). Morfoestructuras regionales. *Nuevo Atlas Nacional de México*. Hoja NA.III. 1. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- Hicks, S.D. (2006). *Understanding tides*. Center for Operational Oceanographic Products and Services. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 56 p.
- Honeycutt, M.G., Crowell, M. and Douglas, B.C. (2001). Shoreline-position forecasting: impact of storms, rate-calculation methodologies, and temporal scales. *Journal of Coastal Research*, **17**(3):721-730.
- INEGI (1996). *Carta topográfica. F13C29. San Blas, Nayarit*. Escala 1:50 000. México.
- INEGI. (1973). *Carta de uso de suelo. F13C18. Laguna Grande de Mexcaltitán, Nayarit*. Escala 1:50 000. Serie I Versión 1. México.
- INEGI. (1973). *Carta de uso de suelo. F13C28. Villa Juárez, Nayarit*. Escala 1:50 000. Serie I Versión 1. México.
- INEGI. (1974). *Carta de uso de suelo. F13A88. Laguna de Agua Brava, Nayarit*. Escala 1:50 000. Serie I Versión 1. México.
- INEGI. (1974). *Carta de uso de suelo. F13C29. San Blas, Nayarit*. Escala 1:50 000. Serie I Versión 1. México.
- INEGI. (1999). *Carta topográfica. F13A88. Laguna de Agua Brava, Nayarit*. Escala 1:50 000. México.
- INEGI. (1999). *Carta topográfica. F13C18. Laguna Grande de Mexcaltitán, Nayarit*. Escala 1:50 000. México.
- INEGI. (1999). *Carta topográfica. F13C28. Villa Juárez, Nayarit*. Escala 1:50 000. México.
- INEGI. (2005). Guía para la interpretación de cartografía. Topografía. México. pp. 1-11.

- INEGI_a. (2010). Inventario Nacional de Viviendas. En: <http://www3.inegi.org.mx> Fecha de consulta: 30 de mayo de 2012.
- INEGI_b. (2010). Marco Geoestadístico Nacional. En: <http://www.inegi.org.mx> Fecha de consulta: 30 de mayo de 2012.
- INEGI_c. (2010). Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos. En: <http://sc.inegi.org.mx> Fecha de consulta: 30 de mayo de 2012.
- INEGI. (2012). Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. En: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/# Fecha de consulta: 30 de mayo de 2012.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. USA. 1032 p.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 103, FAO. Roma. 117p.
- Kench, P. (2008). Beach monitoring in the Auckland region: beach profile analysis. *Auckland Uniservices Limited for Auckland Regional Council*. Regional Council Technical Report. 2008/015, 71 p.
- Lakhan V.C. and Trenhaile A.S. (1989). *Applications in Coastal Modeling*. Elsevier Oceanography Series, 49. Países Bajos. 388 p.
- Lakhan, V.C. and Trenhaile, A.S. (1989). Models and the Coastal System en: Lakhan V.C. y Trenhaile A.S. (editores) *Applications in Coastal Modeling*. pp. 1-16.
- Lecuanda, R.C. y Ramos López, F. (1996). El límite exterior de la plataforma continental: una revisión terminológica y conceptual. *Geografía y Desarrollo*, **13**:57-62.
- Li R., Di K. and Ma R. (2001). A comparative study of shoreline mapping techniques. The 4th International Symposium on Computer Mapping and GIS for Coastal Zone Management, Halifax, Nova Scotia, Canada, June 18-20. s/p. En: <http://shoreline.ceegs.ohio-state.edu> Fecha de consulta: 10 de noviembre de 2011.
- Li, R., Liu, J. and Di, K. (2002). Digital tide-coordinated shoreline. *Marine Geodesy*, **25** (1):27-36.
- Lugo Hubp, J., Aceves-Quesada, J.F. y Fernández de Arteaga, C.C. (1990). Pendientes. *Atlas Nacional de México*. Hoja IV.3.2.C. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- Montaño Ley, Y. (1986). Estudio del transporte litoral de arenas en Isla de la Piedra, Mazatlán, Sin., usando trazadores fluorescentes. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. **12** (1):15-32 UNAM.
- Montaño Ley, Y. y Peraza Vizcarra R. (1986). Aplicación de un modelo de tipo predictivo para cuantificar el transporte litoral de arenas en dos playas de la costa sur de Sinaloa. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. **13** (1):305-314 UNAM.
- Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, **16** (1):111-124.

- Moore, L., Ruggiero P. and List J. (2006). Comparing Mean High Water and High Water Line shorelines: should proxy-datum offsets be incorporated in shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, **22**(4):894-905.
- Morton, R. A., Bernier, J.C., Barras, J. A. and Ferina, N. F. (2005). Rapid subsidence and historical wetland loss in the Mississippi delta plain: likely causes and future implications. *U.S. Geological Survey. Open File Report*, 1216. 116 p.
- Narváez, José María (1824). *Mapa del Estado de Nayarit Levantado por el Teniente de Navio de la Marina Nacional Dn. José María de Narváez*. Mapoteca Manuel Orozco y Berra. México, D.F.
- Nguyen, T., Peterson, J., Gordon-Brown and L., Wheeler, P.(2008). Coastal changes predictive modelling: a fuzzy set approach. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technolog*, **24**:468-473.
- NIWA y Katoa Software Ltd.(2009). Beach Profile Analysis Tool (BPAT). Versión 3.0.0.14. Nueva Zelanda.
- Oertel, G.F. (2005). Coasts, coastlines, shores and shorelines. En: Schwartz, M.L. (editor) *Encyclopedia of Coastal Science* . pp. 323-327.
- Oguchi, T., Hayakawa Y.S. and Wasklewicz, T.(2011). Data Sources en: Smith M.J., Paron P. and Griffiths J.S. (editores) *Geomorphological Mapping: Methods and Applications*. pp.189-224.
- Oliver, Obregón (2008). Assessing water quality modeling in subtropical regions based on a case study of the Aguamilpa reservoir. *Master Thesis*. Brigham Young University. EE.UU., 88p.
- Ortiz Pérez, M.A. (1978). Geomorfología fluvial del curso bajo del río grande de Santiago, Nayarit. *Tesis de Maestría*. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México, 60 p.
- Ortiz Pérez, M.A. (1979). Fotointerpretación geomorfológica del curso bajo del río grande de Santiago, Nayarit. Instituto de Geografía. UNAM. *Investigaciones Geográficas*, **9**:65-92.
- Ortiz Pérez, M.A. (1988). Repercusiones del ascenso del nivel del mar en costas bajas de planicies deltaicas. *Geografía y Desarrollo*, **6-2**(11):69-72.
- Ortiz Pérez, M.A. (2010). Clasificación ecogeográfica de cuencas hidrográficas: el caso de México. En: Cotler Ávalos, H. (coordinadora) *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. pp.25-27.
- Ortiz Pérez, M.A. y De la Lanza Espino, G. (2006). *Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional*. Serie Textos Universitarios 3. Instituto de Geografía. UNAM. México, 138p.
- Ortiz Pérez, M. A. y Pérez Vega, A. (1999). Evidencia documental de los cambios de la línea de costa por sedimentación rápida en la Bahía de Matanchen, Nayarit, México. Instituto de Geografía. UNAM. *Investigaciones Geográficas*, **40**:68-81
- Ortiz Pérez, M. A. y Romo, M.L. (1994). Modificaciones de la trayectoria meándrica en el curso bajo del río Grande Santiago, Nayarit. Instituto de Geografía. UNAM. *Investigaciones Geográficas* ,**29**:9-43.

- Otvos, E. G. (2005). Beach ridges. En: Schwartz, M.L. (editor) *Encyclopedia of Coastal Science* . pp. 172-177.
- Pajak, M.J. and Leatherman, S.P. (2002). The High Water Line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, **18**(2): 329-337.
- Pearre N.S and Puleo J. (2009). Quantifying seasonal shoreline variability at Rehoboth Beach, Delaware, using automated imaging techniques. *Journal of Coastal Research*, **25**(4):900-914.
- Penland, S. and Kulp, M.A. (2005). Deltas. En: Schwartz, M.L.(editor) *Encyclopedia of Coastal Science*. pp. 323-327.
- Quartel, S., Kroon, A and Ruessink, B.G. (2008). Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, **250**:19-33.
- Romo, M. de L. y Ortiz Pérez, M.A. (2001). Riesgo de inundación en la llanura fluvial del curso bajo del río San Pedro, Nayarit. Instituto de Geografía. UNAM. *Investigaciones Geográficas*, **45**:7-22.
- Rotmans Jan and de Vries Bert J.M. (1997). *Perspectives on Global Change: The TARGETS Approach*. Cambridge University Press. Reino Unido, 479 p.
- Rotmans Jan, van Asselt Marjolein B.A. and de Vries Bert J.M. (1997). Global Change and Sustainable Development en: Rotmans Jan and de Vries Bert J.M. (coordinadores) *Perspectives on Global Change: The TARGETS Approach*. pp. 3-12.
- Royal Haskoning (2006). *Innovative Solutions for the Delta:the Delta competition*. Special Publication. The Netherlands. 114 p.
- Ruggiero, P. and List, J.H. (2009). Improving accuracy and statistical reliability of shoreline position and change rate estimates. *Journal of Coastal Research*, **25**(5): 1069-1081.
- Sanjaume, E. y Mateu J. F. (2005). *Geomorfología Litoral i Cuaternari*. Universidad de Valencia. España. 508p.
- Sanjurjo, R. E. y Campos, P. P. (2011). Análisis de las actividades económicas en un manglar de usos múltiples. Un estudio de caso en San Blas, Nayarit, México. *Estudios Sociales*. **19**(38):196-220.
- Santana Hernández, J.R., Ortiz Pérez, M.A., Méndez Linares, A.P. y Gama Campillo, L.(2008). Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. Instituto de Geografía. UNAM. *Investigaciones Geográficas*, **65**:7-21.
- Schwartz, M. L. (2005). *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer. The Netherlands. 1211 p.
- Schwarzer, K., Diesing, M., Larson, M., Niedermeyer, R.O., Schumacher, W., Furmanczyk, K. (2003). Coastline evolution at different time scales—examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. *Marine Geology*, **194** (1-2):79–101
- Sea Grant Maine, The University of Maine, Maine Geological Survey.(2011). *Beach Profile Monitoring Volunteer Manual: Mapping the State of Maine's Beaches*. En: <http://www.maineoastdata.org/> Fecha de consulta: 17 de septiembre de 2011.

- Servicio Mareográfico Nacional (2011). Gráficas y datos históricos. En: <http://www.mareografico.unam.mx> Fecha de consulta: 26 de septiembre de 2011.
- Smith M.J., Paron P. and Griffiths J.S. (2011). *Geomorphological Mapping: Methods and Applications*. V. 15 Elsevier. Reino Unido. 610 p.
- Smith, G.L. and Zarillo, G.A. (1990). Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, **6**(1):111-120.
- Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Winjberg, K.M., Nicholls, R.J. and Capobianco, M. (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, **47**:211-235.
- Stive, M.J.F., Roelvink J.A. and de Vriend, H.J. (1990). Large-Scale coastal evolution concept. The Dutch Coast. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*. Volumen 9. ASCE. Nueva York. pp. 2884-2896.
- Terwindt, J.H.J. and Battjes, J.A. (1990). Research on Large-Scale coastal behaviour. *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft, The Netherlands*. 1975-1983 pp.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L. and Ergul, Ayhan. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0. An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Tolvanen, H. and Kalliola, R. (2008). A structured approach to geographical information in coastal research and management. *Ocean and Coastal Management*, **51**:485-494.
- Tovilla, H.C., Orihuela, B.E. (2004). Impacto del huracán Rosa sobre los bosques de manglar de la costa norte de Nayarit, México. Instituto Nacional de Ecología, El Colegio de la Frontera Sur y Gobierno del Estado de Chiapas. *Madera y Bosques*, **10**(2):63-75
- Unysis Weather (2012). *Hurricane Data*. En: <http://weather.unisys.com> Fecha de consulta: 25 de agosto de 2012.
- van Andel, T.H. and Shor, G.G. (1964). *Marine Geology of the Gulf of California*. Memoir 3. American Association of Petroleum Geologists. USA. 408 p.
- van der Burgh, L. M. and Brommer, M. B. (2006). All you need is space: long-term and large-scale sustainable development in deltaic areas. En: Royal Haskoning (editores) *Innovative Solutions for the Delta: the Delta competition*. pp. 1-24.
- Vidal Zepeda, R. (2005). *Las regiones climáticas de México*. Serie Textos Monográficos. Naturaleza. Instituto de Geografía. UNAM. México. pp. 51-62.
- Vidal Zepeda, R. y Hernández C.M.E. (1992). Algunas características de la precipitación en Nayarit, México. *Geografía y Desarrollo*, **4-3**(7): 9-18.
- Warren, Brown (1968). *Beach: river of sand*. AGI-EBF Earth Science Series. Encyclopedia Britannica Films Inc. En: <http://www.youtube.com/watch?v=FqT1g2riQ30> Fecha de consulta: 02 de febrero de 2012.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, **30** (5):377-392.

Lista de tablas

Tabla 1.1. Escala espacio-temporal relacionada con el análisis de la evolución de la línea de costa según el objetivo de estudio	11
Tabla 1.2 Fuentes de datos espaciales empleadas en el análisis de la evolución de las costas	14
Tabla. 2.1 Ciclones tropicales que impactaron las costas del estado de Nayarit, 1970 a 2011	34
Tabla 2.2 Regionalización hidrológica de Marismas Nacionales	33
Tabla 2.3 Población y localidades cercanas a la línea de costa ($\leq 4\text{km}$)	41
Tabla 3.1 Registro cronológico del levantamiento de perfiles topográficos de playa	43
Tabla 3.2 Localización de los perfiles topográficos de playa	44
Tabla 3.3 Formato de registro de información durante el levantamiento de un perfil de playa	47
Tabla 3.4 Parámetros de la proyección cartográfica de las cartas de INEGI	51
Tabla 3.5 Información correspondiente a cada imagen de Google Earth	51
Tabla 3.6 Incertidumbre relacionada con los errores de posición y de medición (m)	55
Tabla 3.7 Distribución de los transectos a lo largo de la línea de costa, orientación Norte-Sur	60
Tabla 4.1 Resultados de los cambios de la línea de costa durante el período inicial (1970-1999)	94
Tabla 4.2 Resultados de los cambios de la línea de costa durante el período reciente (1999-2011)	95
Tabla 4.3 Resultados de los cambios de la línea de costa durante el período general (1970-2011)	96
Tabla 4.4 Algunas variables para identificar los cambios en la posición de la línea de costa en los perfiles de playa	104
Tabla 5.1 Tasa de cambio en las líneas de costa cercanas a las bocas de marea	112

Lista de figuras

Figura 1.1 Variaciones en los atributos geométricos de la línea de costa según las diferentes escalas de representación en la cartografía.....	6
Figura 1.2 Tecnología para detectar la posición de la línea de costa en campo.....	15
Figura 1.3 Clasificación de los indicadores de la posición de la línea de costa en función del enfoque adoptado para su identificación y de la técnica empleada para su detección.....	16
Figura 1.4 Algunos indicadores heurísticos de la línea de costa más comunes de hallar en una playa arenosa.....	19
Figura 1.5 Marcas de agua más comunes de identificar directamente en campo.....	20
Figura 1.6 Marcas de agua identificadas en una fotografía satelital de Google Earth correspondiente a la Barra Camichín.....	22
Figura 1.7 Secuencia de etapas en la detección de la posición de la línea de costa.....	24
Figura 2.1 Localización del área de estudio.....	30
Figura .2.2 Precipitación media anual en el estado de Nayarit registrada durante el período 1941-2005.....	32
Figura 2.3 Dirección de flujo de las corrientes fluviales del sistema deltaico San Pedro-Santiago durante la fase regresiva de evolución.....	38
Figura 2.4 El sistema deltaico Santiago-San Pedro en el siglo XIX.....	39
Figura 2.5 Playas atractivas para uso recreativo: Puerta de Palapares y El Colorado.....	41
Figura 3.1 Localización y ajuste del nivel automático en los sitios seleccionados.....	45
Figura 3.3 Representación y análisis de los perfiles de playa con BPAT.....	49
Figura 3.4 Detección de la posición de la línea de costa en la Barra Camichín.....	56
Figura 3.5 Polígonos de avance y retroceso en la desembocadura del río Grande de Santiago (Boca Asadero).....	58
Figura 3.6 Transectos y línea de base correspondientes a la playa El Colorado (Sector A. Canal de Cuautla-Boca Ensenada).....	59
Figura 3.7 Intersecciones entre los transectos y las líneas de costa de 1970,1999 y 2011 en la desembocadura del río San Pedro (Boca Camichín).....	62
Figura 3.8 Cálculo de tasas de cambio con la opción Calculate Change Statistics de DSAS.....	63
Figura 3.9 Métodos utilizados en este estudio para el análisis de la evolución de la línea de costa en dos escalas de tiempo.....	63

Figura 4.1 Sector A. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	68
Figura 4.2 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector A, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).....	69
Figura 4.3 Migración de la Boca Camichín entre 1970 y 2011	71
Figura 4.4 Sector B. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	72
Figura 4.5 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector B, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).....	73
Figura 4.6 Sector C. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	76
Figura 4.7 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector C, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).....	77
Figura 4.8 Mangle relicto a lo largo de la playa Coyotes.....	79
Figura 4.9 Sector D. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	81
Figura 4.10 Migración de la Boca Cegada durante los últimos 41 años.....	81
Figura 4.11 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector D, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).....	82
Figura 4.12 Cambios en las bocas al sur de la actual Playa el Rey entre 1970 y 2011	84
Figura 4.13 Sector E. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	85
Figura 4.14 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector E, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).....	86
Figura 4.15 Sector F. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	89
Figura 4.16 Disminución en la longitud de la línea de costa de la Playa el Borrego.....	89
Figura 4.17 Tasas de cambio de la línea de costa correspondientes al sector F, calculadas para los períodos inicial (1970-1999), reciente (1999-2011) y general (1970-2011).....	90
Figura 4.18 Área de estudio. Distribución de los procesos que experimentó la línea de costa durante cada uno de los períodos de medición.....	93
Figura 4.19 Perfiles de playa correspondientes al sector A.	98
Figura 4.20 Perfiles de playa correspondientes al sector B.....	99
Figura 4.21 Perfiles de playa correspondientes al sector C.....	99
Figura 4.22 Perfiles de playa correspondientes al sector D.....	100
Figura 4.23 Perfiles de playa correspondientes al sector E.....	101
Figura 4.24 Perfiles de playa correspondientes al sector F.....	101

Figura 4.25 Cambios en la morfología y en la posición de la línea de costa entre el verano e invierno.	102
Figura 4.26 Categorías para evaluar la relación entre los atributos de cada perfil de playa.	103
Figura 4.27 Comparación del volumen de sedimentos de los perfiles de playa en el verano e invierno.	105
Figura 4.28 Cambios en la morfología del perfil de playa 9. Boca Asadero.	106
Figura 5.1 Movimiento de la línea de costa hacia el mar y el continente en escalas de décadas, años y estaciones.	111
Figura 5.2 El impacto del huracán Kenna (2002) en la playa Coyotes.	114
Figura 5.3 Escollera construida en la margen sur de la Boca El Vigía, al norte de la Playa El Borrego.	116
Figura 5.4 Pozos artesianos en la línea de marea alta de la playa El Colorado.	119

Lista de acrónimos

AOR	Average of Rates
AP	Antes del presente
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EPR	End Point Rate
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GPS	Global Positioning System
HWL	High Water Line
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IUSS	International Union of Soil Sciences
JK	Jackknifing
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
LR	Linear Regression
MHW	Mean High Water
msnm	metros sobre el nivel del mar
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NIWA	National Institute of Water and Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLS	Ordinary Least Squares
RMS	Root Mean Square Error
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

