



# **Universidad Autónoma de Baja California**

**ESPECIALIDAD EN GESTION AMBIENTAL**

## **TRABAJO TERMINAL**

**Cambios de la línea de costa en la playa de San Miguel, B. C., mediante fotografía aérea, en el periodo 1973 - 2003.**

**PRESENTA:**

**ZARKO ALTAMIRANO GOMEZ**

**Ensenada, Baja California, 07 de agosto de 2009**



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
FACULTAD DE CIENCIAS  
INSTITUTO DE INVESTIGADORES OCEANOLÓGICAS

PROGRAMA DE POSGRADO  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

Cambios de la línea de costa en la playa de San Miguel, B. C., mediante fotografía aérea, en el periodo 1973 - 2003.

TRABAJO TERMINAL  
QUE PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL DIPLOMA DE  
ESPECIALIDAD EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTA  
ZARKO ALTAMIRANO GOMEZ

Aprobado por:

M.C. Hiram Rivera Huerta

Presidente del jurado

M.C. Georges Seingier

Sinodal Propietario

M.C. Luis A. Galindo Bect

Sinodal Propietario

## RESUMEN

El presente trabajo responde a la inquietud de un grupo de usuarios de la playa cuya actividad es la practica del surf, quienes se han percatado de cambios geomorfológicos que suponen han afectado las características del oleaje, dicha preocupación fue tema de discusión en la mesa redonda que se llevó a cabo en el marco del XVI congreso estudiantil de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). El área de San Miguel presenta características que hacen de ella una zona muy dinámica geomorfológicamente hablando, como fallamientos, deslizamientos, desembocadura de un arroyo, sismos y la concentración del oleaje. Utilizando fotografías aéreas se estimaron los cambios en la línea de costa que se han presentado en la zona de San Miguel B. C., en el periodo 1973-2003, para esto fue necesario corregirlas con el programa ER Mapper v 6.3 y los cálculos se realizaron con el programa ArcGIS v 9.2. El área de estudio presenta una tendencia de acreción. Se determinaron dos zonas donde los cambios fueron mas evidentes; la zona I presenta acreción promedio de  $30.1 \pm 5$  m y una tasa de 0.23 m/año y en la zona II presenta una acreción de  $50.1 \pm 5$  m por efecto de los deslizamientos de agosto de 1976. Además en la zona I se localizan dos estructuras; una natural que consiste en una barra rocosa que presento un desplazamiento unidireccional oeste-este de  $84 \pm 5$  m y una tasa de 3.09 m/año, así como un espigón construido entre 1960-1964 el cual presentó una perdida de  $40 \pm 5$  m entre los años 1973-1985. Dichos cambios son consecuencia de la combinación de eventos naturales y antrópicos.

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Velia y Carlos por su cariño, apoyo incondicional, esfuerzo y ejemplo, mil gracias.

A mis Hermanas Tita, Bel, Moni, por soportarme durante tanto tiempo, así como por aceptarme como parte del clan.

A mi Hermano Carlos, por mostrarme el camino a seguir desde su manera tan peculiar.

A Berzain.

A quienes ya se adelantaron y formaron parte importante en mi vida, mis abuelas Margarita, Celia y mí querido tío Raúl, tío Quichu y Raymundo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Yuritzí por su apoyo durante la licenciatura y especialidad, así como por formar parte de esta etapa tan importante de mi vida.

A toda mi familia por cada momento compartido con ellos:

Tíos; Salvador, Natalia, Bene, Adán, Ita, Yoli, Lupito, Mari, Palan, Epi, Eva, Angélica, Juan, Monchis, Cesar. Primos; Mara, Karina, Chava, Manuel, Gordo, Adriana, Lupita, David, Carlos Adán, Ehecatl, Paloma, Margarita, Zenith, Anahi, Lupillo, Orión, Eunice, Rigo, Soruyo, Juanillo, Velia y los Gómez que me faltan. Sobrinos; Gabi, Luís Fernando, Christopher, Andrés, Vania, Uriel, Coral, Sebastián, Raulito, Isaac y todos los que no recuerdo sus nombres, los de la Adriana, del Gordo, de Lupita, del Ehecatl, de Paloma, de Karina, del Chava y Los Gómez. Cuñados; Gerardo y Luís.

A mis profesores en especial a Blanco por su amistad, Ledesma por el ánimo cuando estaba por dejar la licenciatura, Moreno, Chelo, Juan, Memo, Cupul, Pati, Beatriz, Luna, Chuchis, Yoli, Claudia, Orellana, Bustos, Rubén Castro, Adán, Salas, Yajimovich, Pipin, los Aguilar, Carpizo, Roberto Pérez, Gil, los Cheos, Ronald, Pinet, Almita, Ley-Lou, Karina, Quinini, Walls e Irma Soria.

A mis compañeros y amigos; Escaramujos y en especial al Chinampocatecatl, Maurio, Barrio, Alonso, Chimeco, Erasmo, Che Patiño, Vicaria, Rocío, Paloma, Poo, Esme, Rosita. Oceanólogos; Leo, Rafel, Lis, Napo, Ricardo, Belain, Kuan, Chavalion, Ojkar, Diegobaldo, Servantes, Luka, Shrek. Compas de la vida; José Mario (Pelón) y Jorge Pérez (DiabloPunk). Miguel, Paula, Emiliano, Marce, Fer, Masahiko, Pampis, Flakoman, La Beto, Ian, Aline, Seth, Pierre, Samantha, Mundo, Arturo y Salvación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios en la Especialidad.

A la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marina, donde realice mis estudios de licenciatura y especialidad.

Al M.C. Hiram Rivera Huerta por su paciencia, disposición y por aceptar ser mi director en el presente trabajo, así como al tiempo dedicado a las revisiones y consejos durante el mismo.

Al M.C. Juan Carlos Ramírez Acevedo por sus recomendaciones y aclaraciones.

A mis maestros de la especialidad: Dra. Concepción Arredondo García, Dr. José Luís Ferman Almada, M.C. Luís A. Galindo Bect, M.C. Hiram Rivera Huerta, M.C. George Seingier, L.C.C. Alejandro Gomero.

A Juan I. González por el desarrollo del programa MARV081 y su disposición al público para su uso.

A Cesar García por el material fotográfico, así como a toda la información proporcionada.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>11</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Zona de San Miguel.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Fotografía aérea.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Estudios en San Miguel.....</b>	<b>15</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Objetivo general.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 Objetivos particulares.....</b>	<b>16</b>
<b>4. HIPOTESIS.....</b>	<b>16</b>
<b>5. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>16</b>
<b>5.1 Fisiografía y litología.....</b>	<b>16</b>
<b>5.2 Condiciones meteorológicas.....</b>	<b>18</b>
<b>5.3 Condiciones oceanográficas.....</b>	<b>19</b>
<b>5.3.1 Oleaje.....</b>	<b>19</b>
<b>5.3.2 Corrientes marinas.....</b>	<b>20</b>
<b>5.3.3 Marea.....</b>	<b>22</b>
<b>5.4 Batimetría.....</b>	<b>23</b>
<b>6. METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1 Material.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1.1 Fotografías aéreas.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1.2 Sistema de Posicionamiento Global.....</b>	<b>27</b>
<b>6.2 Escaneo de las fotografías aéreas.....</b>	<b>28</b>
<b>6.3 Corrección de las fotografías aéreas.....</b>	<b>28</b>
<b>6.4 Digitalización de la línea de costa.....</b>	<b>30</b>
<b>6.5 Estimación de los cambios de la línea de costa.....</b>	<b>31</b>
<b>6.5.1 Cambios erosión-depositación.....</b>	<b>31</b>
<b>6.5.2 Desplazamiento de la barra rocosa.....</b>	<b>32</b>
<b>6.5.3 Perdida estructural del espigón.....</b>	<b>33</b>

6.6 Tasa de cambio.....	33
6.7 Fuentes de error.....	34
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
7.1 Líneas de costa.....	35
7.2 Cambios de la línea de costa.....	36
7.2.1 Zona I (playa San Miguel).....	36
7.2.2 Zona II (deslizamientos).....	36
7.2.3 Espigón.....	39
7.2.4 Barra rocosa.....	40
7.3 Errores.....	41
7.3.1 Efecto de la marea.....	41
7.3.2 Sistema de Posicionamiento Global.....	41
7.3.3 ER Mapper.....	41
<b>8. DISCUSIONES.....</b>	<b>42</b>
8.1 Cambios en la zona I.....	42
8.2 Cambios en la zona II.....	43
8.3 Cambios del espigón.....	43
8.4 Desplazamiento de la barra rocosa.....	44
8.5 Cambios observados por los usuarios.....	44
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>46</b>
<b>10. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>11. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>48</b>
11.1 Paginas de Internet.....	50
<b>ANEXOS.....</b>	<b>51</b>
Oleaje.....	51
Fotografías.....	52
Calendarios de marea.....	57

## LISTA DE FIGURAS

1. Área de estudio.....	17
2. Geología del área de estudio.....	18
3. Corrientes marinas de la Bahía de Todos Santos, B.C., México.....	22
4. Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1956-1958.....	24
5. Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1961-1972.....	25
6. Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1973.....	25
7. Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1985.....	26
8. Ortofoto de la zona de estudio en el año de 1993.....	26
9. Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 2003.....	27
10. Marea en el puerto del Sauzal, durante el muestreo con GPS.....	28
11. Proceso de georeferenciación.....	29
12. Indicadores de la línea de costa.....	30
13. Zonas y trazado de los transectos.....	32
14. Ubicación de los rasgos fisiográficos.....	33
15. Variaciones de la línea de costa de la zona I.....	35
16. Distancias de los transectos de la zona I.....	36
17. Tendencias de cambio de la línea de costa en la zona I.....	38

## **LISTA DE TABLAS**

<b>I. Altura significativa, porcentaje de ocurrencia y periodo de retorno para el puerto de Ensenada, B. C. en el periodo 1986-1989.....</b>	<b>20</b>
<b>II. Material fotográfico recopilado para el estudio.....</b>	<b>24</b>
<b>III. Distancias de los transectos de la zona I.....</b>	<b>36</b>
<b>IV. Diferencias de los transectos de la zona I.....</b>	<b>37</b>
<b>V. Tasa anual, media anual de cambio y promedio de la zona I.....</b>	<b>37</b>
<b>VI. Longitudes, diferencias, y promedio de la zona II.....</b>	<b>39</b>
<b>VII. Distancias, diferencias, tasa anual y promedio del desplazamiento de la barra rocosa.....</b>	<b>40</b>

## 1. INTRODUCCION

La forma de la costa es el resultado de procesos de erosión-depositación principalmente, los cuales responden a factores naturales como el oleaje, marea, viento y precipitación, así como a factores no naturales, por ejemplo, estructuras de protección costera como espigones, escolleras, rompeolas, muros, etc. (Castillo-Valdez, 1995). Por otra parte la ubicación, orientación, batimetría y las características geológicas de la zona son de suma importancia, así como las variaciones temporales del clima y sus efectos en los factores naturales anteriormente descritos.

Las corrientes tanto marinas como fluviales transportan el material litológico desde tierra, a lo largo de la línea de costa y hacia fuera de la costa. Estas corrientes son generadas por el oleaje, marea, viento y escorrentías. Dependiendo de la intensidad, dirección y longitud de la corriente, corresponderá el tamaño de material transportado y su depósito, así como de la geomorfología de la costa.

Del Río-Rodríguez y García-Prieto (2008) mencionan que la fotografía aérea constituye uno de los elementos mas utilizados en los estudios de dinámica y evolución costera, ya que se presentan una alta resolución, la posibilidad de comparar fotografías de distintas fecha de un mismo sitio, así como su facilidad de uso y relativo bajo costo. Además que algunas de las múltiples aplicaciones de las fotografías aéreas en estudios litorales son:

- Cartografía geomorfológica y ambiental; la alta resolución y visión tridimensional del terreno permite diferenciar playas, dunas, marismas, acantilados y aspectos mas específicos como la densidad de vegetación, morfología dunar, perfil de cantiles, escalonamientos de niveles morfosedimentarios en marismas y estuarios, etc.
- Estudios de procesos físicos litorales; en las fotografías se pueden realizar un análisis dinámico del oleaje observando características como los frentes de ola,

distribución grupal, refracción, difracción, etc. Además es posible apreciar barras sumergidas próximas a la costa, plumas de sedimento que permiten deducir direcciones de corrientes litorales, sentido de la deriva litoral dominante, etc.

- Las fotografías pueden utilizarse para medir distancias con una buena precisión, siempre y cuando hayan pasado por el proceso de ortorectificación o también se pueden utilizar imágenes estereoscópicas para determinar alturas, las cuales pueden llegar a tener errores muy pequeños dependiendo del equipo de observación.
- Gracias a las escalas de las fotografías aéreas es posible evaluar los efectos de las estructuras costeras, por simple comparación temporal entre fotos. Así como la evolución de la línea de costa.

Por tanto las fotografías aéreas son una importante herramienta en dinámica litoral, ya que otras fuentes de información, como mapas no permiten generalmente una resolución espacial y/o temporal suficiente para identificar líneas de costa de manera tan precisa y fiable.

El presente trabajo responde a la inquietud de un grupo de usuarios de la playa cuya actividad es la practica del surf, quienes se han percatado de una disminución de la calidad de la ola y dicha preocupación fue tema de discusión en la mesa redonda que se llevó a cabo en el marco del XVI congreso estudiantil de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), donde el grupo expuso su preocupación y observaciones a investigadores y académicos del área de oceanografía física y procesos costeros de la UABC, quienes dieron su opinión acerca del tema, concluyendo la necesidad de realizar estudios que aporten información que sustenten la problemática y su posible solución.

Este estudio pretende estimar los cambios que ha sufrido la desembocadura del arroyo Cañón El Carmen (San Miguel), así como la línea de costa en la zona de San Miguel, B. C. mediante el análisis espacio-temporal utilizando fotografías aéreas y el uso del programa ER Mapper versión 6.3, así como el sistema de información geográfica ArcGIS versión 9.2.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Zona San Miguel**

El área de estudio presenta características que hacen de ella una zona muy dinámica geomorfológicamente hablando como fallamientos, deslizamientos, desembocadura de un arroyo, sismos y la concentración del oleaje. Cupul-Magaña (1984) menciona que la zona de San Miguel esta compuesta por depósitos de inicios del Cenozoico, sedimentos erosionados de la cadena montañosa peninsular y depositados en un ambiente de transición entre plataforma interna (zona somera de alta energía) y plataforma externa o talud (caracterizada por corrientes de turbidez y depósitos de material fino). Que después fueron cubiertos en la parte NW por una capa de basalto y andesita, situación que sumados a las características antes mencionadas, así como eventos meteorológicos extraordinarios, modifican de manera constante y en algunos casos repentina, la forma de la línea de costa.

Entre los años 1960-1964 se construyo un espigón en la parte SE de la playa San Miguel, con el objetivo de proporcionar una zona protegida del oleaje para utilizarla como botadero de embarcaciones menores (Plaza-Flores, 1979 en comunicación personal con Sr. Tomas Robertson).

Con la finalidad de atraer al turismo del estado de California (EU) y brindar un atractivo visual y a sabiendas del peligro inminente de deslizamientos, las autoridades deciden llevar a cabo la construcción de la carretera escénica Ensenada-Rosarito, iniciando en 1961 e inaugurándose el 25 de abril de 1967, tiempo durante el cual y hasta la fecha se han

presentado en diversas ocasiones deslizamientos como resultado de la reactivación por efecto de la construcción de la carretera, ya que esto implicó el remover material de la base del deslizamiento, provocando inestabilidad. Es por esto que en agosto de 1976 en el tramo contiguo a la caseta de San Miguel se presentaron tres deslizamientos los cuales modificaron la línea de costa.

Baja California esta considerada como la cuna del surf en México, ya que ha sido visitada desde los años 40's por turistas de aventura que en búsqueda de oleaje para la practica del surf, ha influenciando a locales en esta actividad a partir de los años 60's. Por sus características propias la playa de San Miguel ofrece oleaje de calidad y consistencia, por lo que ha sido reconocida a nivel internacional convirtiéndose en un lugar obligatorio por quienes residen y visitan la región (Pijoan-Velasco, 2008).

## ***2.2. Fotografía aérea***

No se sabe a ciencia cierta quien construyo el primer artefacto capaz de registrar imágenes por medio de la luz, pero en 1308 Al Hazen de Basra explica el principio de la cámara obscura, donde por un pequeño orificio en una de sus paredes se permite la entrada de luz a un cuarto aislado de la luz exterior, reflejándose una imagen invertida en la pared opuesta, iniciándose de esta manera el desarrollo de la fotografía.

Hacia 1858 Gaspar Felix Tournachon toma las primeras fotografías aéreas desde un globo, con la intención de producir un plano topográfico. Durante los próximos 50 años son utilizaron diferentes plataformas aéreas desde cometas, aves, cohetes de aire comprimido, hasta 1908 cuando Wilbur Wright y el fotógrafo L. P. Bonvillain toman la primera foto desde un avión. Sin embargo en 1944 se lleva a cabo el primer estudio sobre la costa mediante fotografía aérea con el propósito de realizar el desembarco en las playas de Normandía durante la Segunda Guerra Mundial y conocer las características del oleaje, rompiente en aguas someras, corrientes, pendiente de la playa, y es a partir de esta fecha a

la actualidad se utiliza la fotografía aérea para estudiar la línea de costa con múltiples objetivos.

### **2.3. Estudios en la zona de San Miguel**

Con la intención de conocer la geología de la región, Bailey (1966) llevo a cabo un estudio de paleocorriente de la formación Rosario y Helander (1969) estudio la geología del Cretácico (en: Gastil *et al*, 1975). Por su parte Cupul-Magaña (1984) analizando la estratigrafía determino la paleogeografía de la Bahía de Todos Santos para el Cretácico Superior.

Los deslizamientos han sido promovidos por las características geológicas, agentes naturales, las obras civiles y otros factores antropogénicos, conclusiones hechas en base a estudios de investigadores como Rico *et al* (1969) que realizaron un estudio sobre los deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada, para determinar su origen, Minch (1972) utilizando fotografía aérea realizo un reporte sobre los deslizamientos y sus efectos sobre el desarrollo de complejos turísticos entre Tijuana-Ensenada (en Ledesma-Vázquez y Huerta-Santana, 1993), Ledesma-Vázquez y Huerta-Santana (1993) ubicaron los deslizamientos presentes hasta 1993 en la zona El Descanso-San Miguel mediante fotografía aérea, así como sus causas y características, generando un mapa de riesgo, Morales-Pérez (1995) realizo una caracterización de los factores geológicos que controlan los deslizamientos en el área San Miguel-Salsipuedes, apoyándose de fotografía aérea. Por su parte Plaza-Flores (1979) determina los cambios en la playa, como resultado de los deslizamientos de agosto de 1976, mediante trabajos topográficos encontrando un aporte de 2'077 m<sup>3</sup> para octubre de 1977.

Cruz-Colin y Cupul-Magaña (1997) determinaron la tasa de erosión de los cantiles marinos de la bahía de Todos Santos mediante fotografía aérea obteniendo una tasa de erosión para la zona al oeste de la playa de San Miguel de 0.73 m/año con un aporte de 6'191.46 m<sup>3</sup>/año y para la zona al este de 1.25 m/año con un aporte de 7'906.25 m<sup>3</sup>/año.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Describir los cambios en la línea de costa de la playa San Miguel, B. C. mediante fotografía aérea y sistema de posicionamiento global, en el periodo 1973-2009.

#### **3.2. OBJETIVOS PARTICULARES**

Evaluar las variaciones geomorfológicas en el arroyo Cañón El Carmen y la línea de costa en la zona de San Miguel, Baja California.

Estimar las tendencias de los procesos de erosión y depositación en dos sitios de la línea de costa de la playa de San Miguel.

### **4. HIPOTESIS**

La playa de San Miguel ha sufrido cambios geomorfológicos durante el periodo 1973-2003 asociados a la combinación de eventos naturales, así como a actividades antropogénicas.

### **5. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se localiza en la cuenca Rosarito Beach, dentro de la subcuenca La Misión (Morales-Pérez, 1995), en la costa noroccidental de la península de Baja California, México, en el extremo norte de la bahía de Todos Santos. La zona de San Miguel esta comprendida entre  $31^{\circ} 54' 7.6''$  a  $31^{\circ} 54' 6.38''$  N (3529614.38 a 3529580.06 mN) y  $116^{\circ} 44' 35.8''$  a  $116^{\circ} 43' 41.45''$  W (524274.56 a 525702.06 mE; zona UTM 11 N). Se encuentra a 15 kilómetros al noroeste de la ciudad de Ensenada. Dicha zona presenta tres rasgos geomorfológicos, una punta, la desembocadura del arroyo Cañón El Carmen y acantilados marinos (Figura 1).

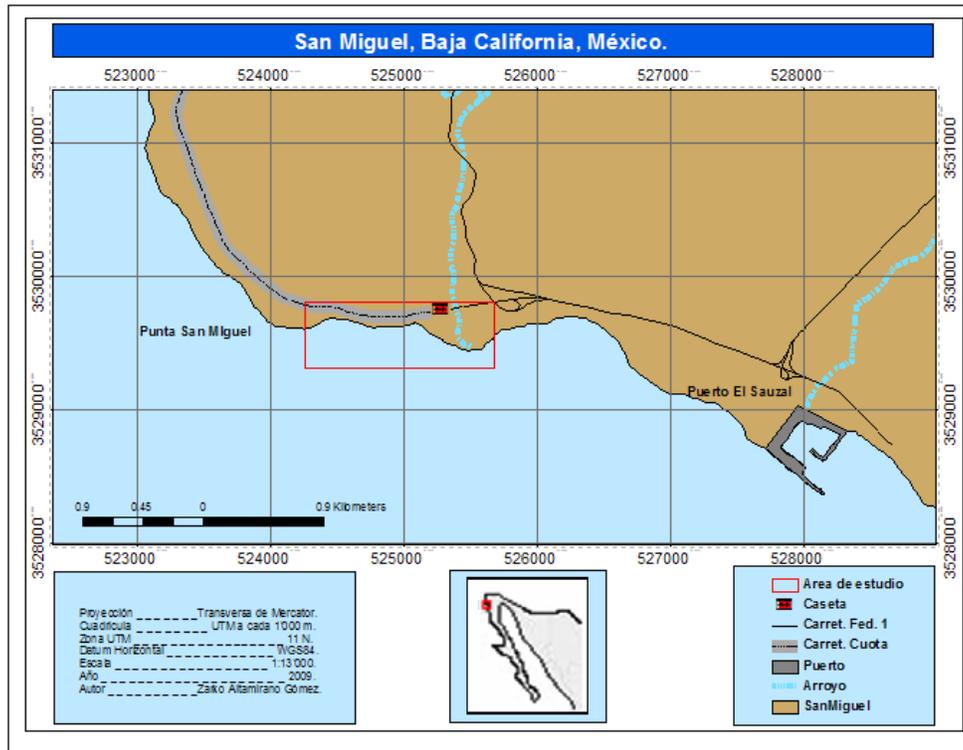


Figura 1. Área de estudio.

### 5.1. *Fisiografía y litología*

El origen de la Bahía de Todos Santos es tectónico, está formada por rocas ígneas y sedimentarias del Cretácico Superior estructura conocida como Formación Rosario. La costa norte de la bahía ha sido clasificada como costa secundaria ya que el mar ha moldeado su forma. Esta costa esta formada por playas angostas de bolsillo, terrazas y acantilados marinos, estos últimos están cortados sobre sedimentos del terciario (Gastil, Phillips y Allison, 1975; Plaza-Flores, 1979).

La zona de San Miguel está formada por tres clases de material sedimentario, la parte este de la zona que incluye la playa (desembocadura del arroyo) y los cantiles marinos están compuestos por medanos del Cuaternario, hacia el este se presenta material de la Formación Rosario; areniscas, lutitas y conglomerados, desde el arroyo hasta la punta y en

la parte superior de la última se encuentra basalto del Mioceno, material que constituye la parte baja de la playa, ver Figura 2 (Rico *et al*, 1969; Gastil, Phillips y Allison, 1975; Plaza-Flores, 1979; Ledesma-Vázquez y Huerta-Santana, 1993 Cupul-Magaña, 1984).

La playa de San Miguel está formada por arenas, la cual comprende tres tamaños, gruesa, media y fina. También se observa la presencia de cantos rodados en la parte inferior de la misma. Es notable la presencia de material oscuro basáltico de dimensiones mayores a un milímetro (Plaza-Flores, 1979). La zona de estudio pertenece a la celda de transporte litoral I, ver Figura 2 (García-Gastelum, 1997).

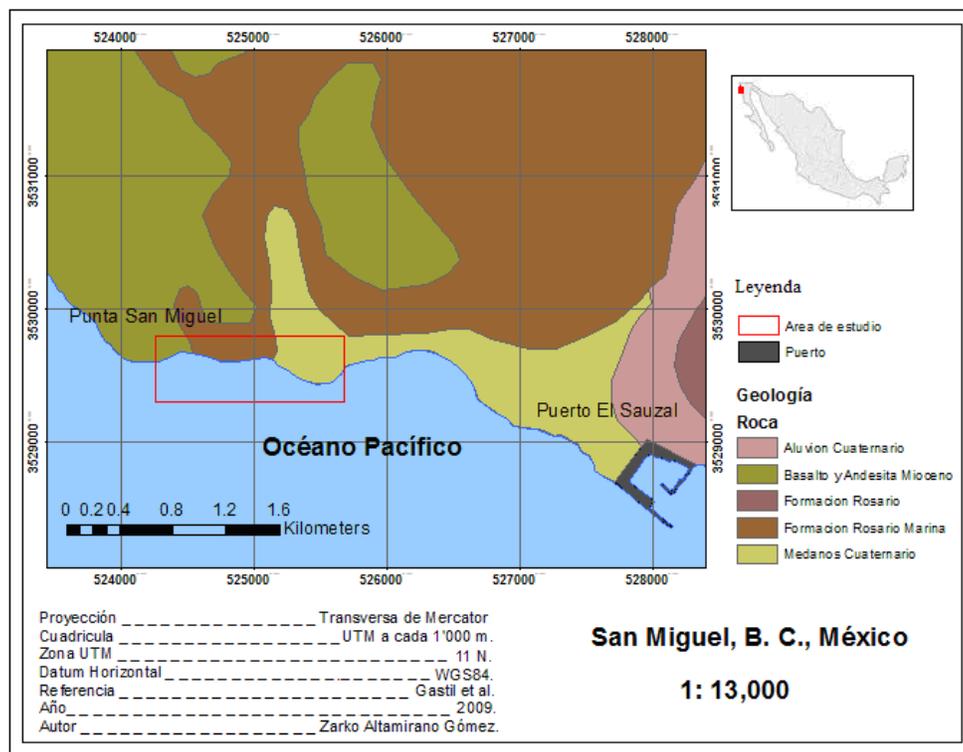


Figura 2.- Geología del área de estudio, modificado de Gastil *et al*.

## 5.2 Condiciones meteorológicas

La región de Ensenada se caracteriza por tener un tipo de clima seco templado con lluvias en invierno, las que ocurren en los meses de diciembre a marzo. Se registran nieblas

frecuentes sobre el mar y a lo largo de la costa, con una precipitación promedio de 200 mm anuales. Los meses más secos son de julio a agosto. La temperatura máxima es 28.7°, la mínima de 7.8°, con una media anual de 16.7° C (Álvarez, 1989: en Morales-Pérez, 1995).

Las precipitaciones se presentan cuando el sistema de alta presión se debilita permitiendo la entrada de sistemas convectivos y frentes. Algunos de estos sistemas son modulados por el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur y por la Oscilación Decenal del Pacífico (Arriaga-Ramírez, 2008).

El 80% de las observaciones diarias durante 11 años, indican que el viento proviene del noroeste, especialmente durante los meses calidos del año. Los vientos predominantes en esta región son del régimen de brisas con vientos del noroeste, presentando intensidades promedio de 14.4 km/hr (Álvarez, 1971: en Plaza-Flores, 1979).

### **5.3 Condiciones oceanográficas**

#### **5.3.1 Oleaje**

Las características del oleaje en la zona de estudio corresponden a las estaciones del año. Las olas que arriba al área de San Miguel, tanto del Hemisferio Norte como del Hemisferio Sur, dada su ubicación, el área de estudio esta más expuesta al oleaje proveniente del N-W y protegida del oleaje del S-W por Punta Banda y las Islas Todos Santos. Wiegel (1993) determino las características del oleaje frente a las costas de California analizando más de 100 años de datos. Por su cercanía (100 km) podemos considerarla como similares a las recibidas frente a la Bahía de Todos Santos, distingue el oleaje en base a su periodo como largo (12-24 s), medio (8-17 s) y corto (5-12 s), encontrando que para el periodo largo de noviembre a abril proviene de los 270-340° con alturas de 3-7 m, y de abril a octubre es del 200-230° con alturas de 0.5-1.5 m y para el periodo medio de noviembre a abril es del 220-340° con alturas de 2-10 m, y de junio a noviembre es del 130-190° con alturas de 5-8 m y el oleaje de periodo corto se genera de manera local (en Ahumada-Sempoal, 1993). El

origen del oleaje del Hemisferio Sur se presenta durante los meses de abril a octubre, pero ocurren significativamente desde mayo a octubre y es originado durante las tormentas del Invierno Austral en las latitudes de Australia y Nueva Zelanda. Las olas provenientes del Hemisferio Norte se observan durante los meses de septiembre a mayo y son generadas por los ciclones de invierno en las latitudes de Japón y las Islas Aleutianas (ver oleaje en anexos). Coria-Méndez (1991) determinó la altura significativa y periodo de retorno del oleaje para el puerto de Ensenada en el periodo agosto de 1986 a julio de 1989 (Tabla I)

Tabla I.- Alturas significante (Hs), porcentaje de ocurrencia (% Oc.) y periodo de retorno a 50 y 100 años (H<sub>50</sub> y H<sub>100</sub> respectivamente) para el puerto de Ensenada, B. C. en el periodo 1986-1989, tomado de Coria-Méndez (1991).

<b>Estación</b>	<b>Hs</b>	<b>% Oc.</b>	<b>H<sub>50</sub></b>	<b>H<sub>100</sub></b>
<b>Primavera</b>	2.2	19.5	3.35	3.70
<b>Verano</b>	1.3	33.5	1.85	1.94
<b>Otoño</b>	1.8	20.3	2.82	2.94
<b>Invierno</b>	2.4	15.9	3.74	3.97

### 5.3.2 *Corrientes marinas*

García-Gastelum (1997) menciona que las corrientes marinas juegan un papel muy importante en la dinámica de la línea de costa, debido a que son el factor principal del movimiento de sedimentos y contaminantes en el medio marino, y en condiciones especiales (eventos de tormenta con oleajes extremos y alta precipitación) producen cambios morfológicos en la franja costera. Principalmente se tienen dos tipos de corrientes:

- Litorales; Este tipo de corrientes define los movimientos de agua y sedimentos paralelos a la línea de costa, derivada en su mayor parte de la energía del oleaje al arribar en ángulo a la línea de costa, sus principales efectos son el transporte de material sedimentario a lo largo de la línea de costa. La velocidad y dirección de estas corrientes, así como de las corrientes de retorno (corrientes perpendiculares a la línea de costa con dirección hacia el mar), dependen de la dirección y altura del

oleaje, Ahumada-Sempoal (1993) calculo para oleaje de verano ( $230^{\circ}$ - $242^{\circ}$  y alturas de ola de 0.8-3.16 m) 0.55 m/s y para invierno ( $244^{\circ}$ - $290^{\circ}$  y alturas de ola de 0.88-2.68 m) 0.98 m/s. Debido a que la zona de San Miguel se encuentra expuesta al oleaje del N-W, que al romper sobre la línea de costa genera una corriente litoral que se mueve en dirección hacia el este de la bahía (Figura 3).

- Superficiales; son movimientos de agua muy variables debido a que el desplazamiento de agua, depende casi exclusivamente de la acción del viento sobre la superficie del mar. Argote-Espinoza, *et al.* (1975) determinan que existen tres patrones de circulación dependiendo de la dirección del viento; cuando el viento presenta un componente Norte, las aguas se mueven siguiendo el contorno de la línea de costa desde San Miguel y Punta Banda respectivamente hacia la región central del litoral costero de la bahía en donde convergen y toman dirección Oeste hacia las Islas; cuando la componente del viento es Oeste, la corriente tiende a seguir un patrón inverso a la componente Norte, es decir fluyen desde la islas en dirección Este, hacia las región central de las playas de la BTS, para luego tomar direcciones en ambos sentidos, hacia Punta Banda y San Miguel respectivamente (Figura 3) y cuando los vientos locales son de poca intensidad y la dirección es variable, la estructura del patrón de circulación es complicada y difícil de establecer.

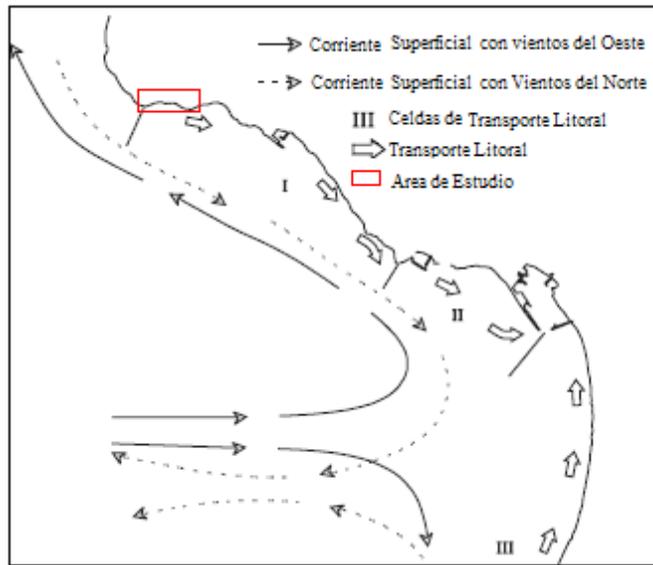


Figura 3.- Corrientes de la Bahía de Todos Santos, B. C., México, según Argote, 1975; modificado de García-Gastelum, 1997.

### 5.3.3 Marea

La marea que se presenta en San Miguel es del tipo denominado “Marea Mixta”. En la variación anual de la marea se observan las máximas alturas en la época de invierno (mareas de sicigias). El rango máximo de la marea es de 2.6 metros, por lo que podemos decir que presenta un rango de mesoescala (2-4 metros), la marea alta media anual es de 1.43 metros y la marea baja media es de 0.27 metros (Cárdenas-Brachini, 1970; en: Plaza-Flores, 1979).

En un estudio realizado en 1987 se determinó la marea de tormenta para el puerto de Ensenada, el cual fue de + 3.0 metros, referida al nivel de Bajamar Media Inferior (Guillén-Sánchez, 1998).

#### **5.4 Batimetría**

Cerca del 75% de la Bahía de Todos Santos presenta una profundidad menor a 50 m y el 25% restante forma parte del angosto cañón submarino de Todos Santos, donde alcanza su máxima profundidad (500 metros). Este cañón se localiza entre las islas del mismo nombre y la península de Punta Banda (Secretaría de Marina, 1972; González-Vinagran, 1992; en García-Gastelum, 1997).

### **6. METODOLOGIA**

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo se utilizó la metodología descrita por Del Río-Rodríguez y Gracia-Prieto (2008), para lo cual fue necesario recopilar el material de los archivos de geomática de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC, escanear las fotografías aéreas, corregirlas mediante el programa ER Mapper versión 6.3, digitalizar las líneas de costa por fotografía y estimar los cambios con el programa ArcGIS versión 9.2 y por último se calcularon las tasas de cambio mediante el método estadístico media de las tasas.

#### **6.1 Material**

##### **6.1.1 Fotografías aéreas**

Se recopilaron 5 fotografías aéreas con diferentes escalas de vuelo (Tabla II) y una ortofoto (H11B11c) que corresponde a la carta H11B11 (1999) y que se encuentran en el archivo de Geomática de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC (Figuras 4-9) de las cuales dos de las fotografías se desconocen los años (Figura 4 y 5) en que fueron tomadas, por lo que se dedujeron las fechas aproximadas por ausencia o presencia de diversos rasgos en las fotos, para el análisis y cálculo no siempre fueron utilizadas todas las fotografías, ya que las referencias para llevar a cabo este propósito (rasgos fisiográficos) no están presentes en todas las fotografías.

Tabla II.- Material fotográfico recopilado para el estudio.

<b>Material</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tipo</b>	<b>Escala de vuelo</b>	<b>Origen</b>
Fotografía	1956-1958	B/N	Desconocida	INGESA y Aerofotografía de México
Fotografía	1961-1972	B/N	Desconocida	INGESA y Aerofotografía de México
Fotografía	sep/1973	Color	1:25'000	UAG
Fotografía	1/jun/1985	B/N	1:37'000	INEGI
Ortofoto	1/nov/1993	B/N	1:75'000	INEGI
Fotografía	4/jul/2003	Color	1:20'000	Geomática Ayto. Ensenada

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática)

UAG (Universidad Autónoma de Guadalajara)



Figura 4.- Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1956-1958.

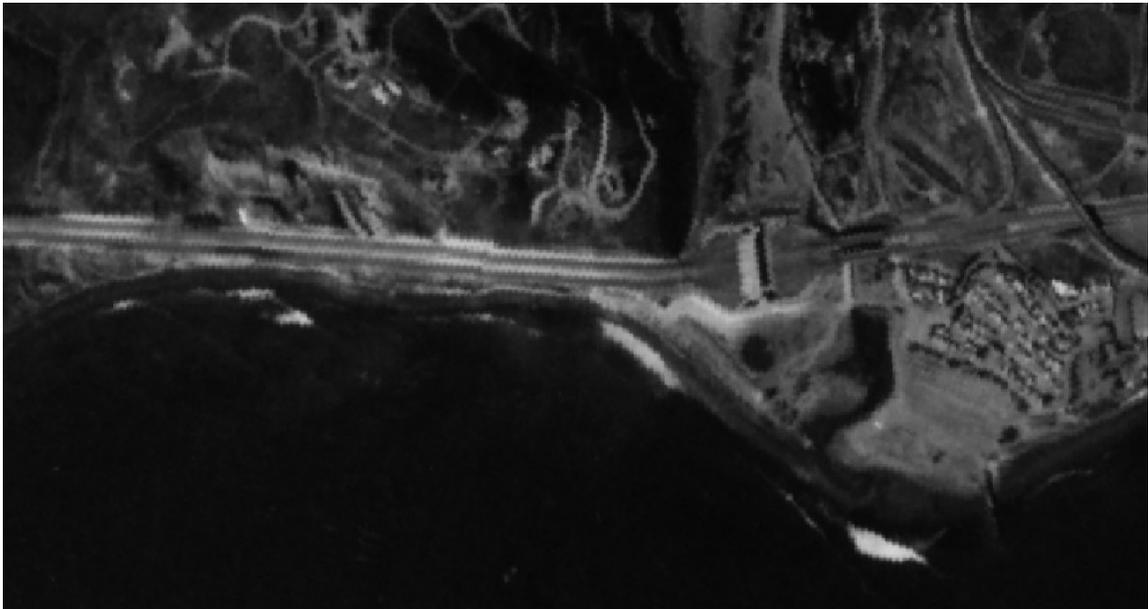


Figura 5.- Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1961-1972.



Figura 6.- Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1973.



Figura 7.- Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 1985.



Figura 8.- Ortofoto de la zona de estudio en el año de 1993.



Figura 9.- Fotografía aérea de la zona de estudio en el año de 2003.

Para conocer el estado de la marea cuando las fotografías fueron tomadas es necesario saber la hora, pero como se desconoce dicha información, se optó por determinar el rango de marea entre las 10-16 horas correspondientes a las fechas de las fotos (1973, 1985, 1993 y 2003), para esto se corroboraron las fechas de las fotografías en el Sistema de Información de Índices de Vuelo (SIIV) de INEGI y se utilizó el programa de predicción de marea MARV081 de CICESE.

#### **6.1.2 Sistema de Posicionamiento Global**

Con el fin de determinar la línea de costa de 2009 para hacer una comparación con las fechas anteriores, proporcionadas por las fotografías, se llevó a cabo un recorrido con un Sistema de Posicionamiento Global marca Garmin modelo eTrex el día 4 de julio de 2009, tomando puntos cada 20 metros, este recorrido se hizo cuando la marea coincidía con el Nivel Medio del Mar (NMM) según el calendario de mareas del mes de julio de 2009 del Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), ver figura 10. Así como también se obtuvo la ubicación de puntos de control. El GPS estimó un error aproximado de 4 metros durante el trabajo en campo.

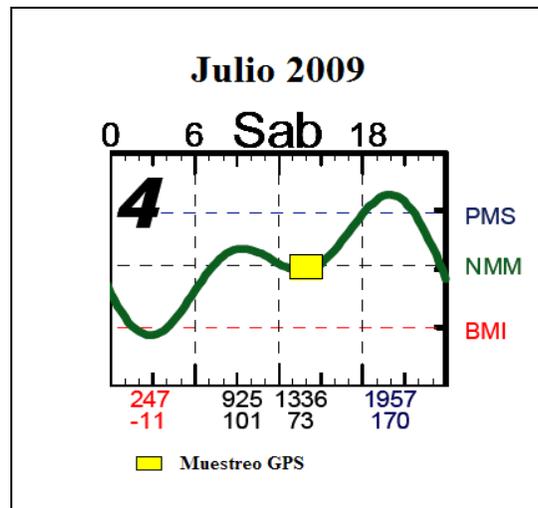


Figura 10.- Marea en el puerto del Sauzal durante el muestreo con GPS, <http://oceanografia.cicese.mx/predmar/calmen.php>.

## 6.2 Escaneo de las fotografías aéreas

Para su corrección como para su análisis fue necesario convertir las fotografías aéreas de papel fotográfico a formato digital, esto fue posible gracias al uso de un escáner marca Contex, modelo DSP FSCx010 las cuales fueron escaneadas a una resolución de 300 puntos por pulgada (DPI, por sus siglas en ingles).

## 6.3 Corrección de las fotografías aéreas

Ya que no se contaba con la información necesaria de las fotografías aéreas, no fue posible realizar la ortorectificación (proceso más recomendable y preciso). Sin embargo se llevó a cabo el proceso de georeferenciación.

Para la georeferenciación se utilizó el programa ER Mapper 6.3 mediante el asistente de codificación geográfica (Geocoding Wizard), la corrección fue del tipo polinomial mediante puntos de control (GCP, por sus siglas en ingles), la cual consiste en corregir geoméricamente la imagen con base en una ya corregida. Se escogieron como puntos de

control, los más cercanos a la costa para evitar las elevaciones del terreno, ya que se realizo mediante el orden lineal, el cual se recomienda para partes sin muchas elevaciones y 3 puntos de control como mínimo, sin embargo se tomaron de 10-12 puntos. Los puntos de control fueron seleccionados por ser rasgos fisiográficos estables como construcciones, cruces de caminos, etc. Para esto es necesario conocer las posiciones reales de los rasgos en la imagen sin corregir, basándose en una imagen previamente corregida, rectificando de esta manera la ubicación (sistema de coordenadas) de cada rasgo o píxel de la imagen (Figura 11). Se tomo como referencia la ortofoto de 1993 corregida por INEGI por su validez oficial.

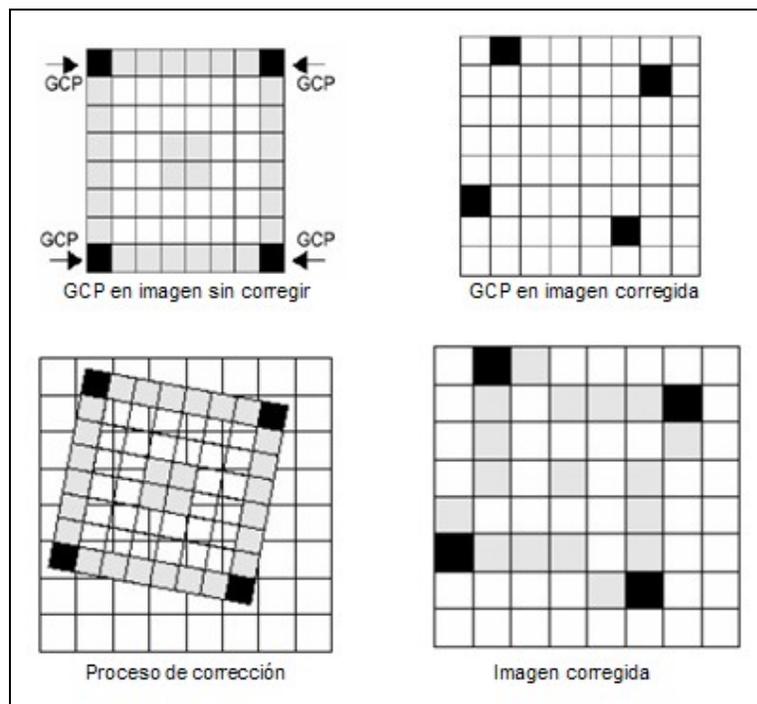


Figura 11.- Proceso de georeferenciación, modificado de <http://www.cartografia.cl>.

Con la intención de mejorar la corrección, se realizo un enmascarado cortando solo el área de interés para regeoreferenciar con la intención de disminuir los errores (RMS, por sus siglas en ingles) de este proceso fueron  $\leq 1$  metro. La proyección utilizada fue Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 11 N, sistema de coordenadas mE, mN y datum horizontal WGS84. Dadas las diferencias de resolución, las imágenes resultantes de este

proceso se estandarizaron a 2 metros de resolución por píxel para su posterior análisis en ArcGIS.

#### 6.4 Digitalización de la línea de costa

El contacto tierra-mar presente en una fotografía aérea puede deberse a múltiples factores como vaivén del oleaje, cambios horarios de la marea, cambios diarios resultado de cambios meteorológicos, cambios mensuales debidos a las variaciones de perfil de playa, etc. Por esto es necesario establecer un indicador de la posición de la línea de costa (*shoreline proxy*), como indicadores se han empleado muchos elementos como la línea del *run up* del oleaje (alcance sobre el perfil de la playa), escalón de playa, escarpe erosivo, línea de pleamares, cresta de la berma, línea de vegetación estable, pie o cresta de la duna, pie o borde superior de cantiles marinos, etc. Para el presente estudio se empleó como indicador la línea del *run up* del oleaje sobre el perfil de la playa, identificable por el cambio de tono que corresponde a la huella dejada en el sedimento por el alcance del *run up* anterior a la toma de la fotografía (Figura 12).

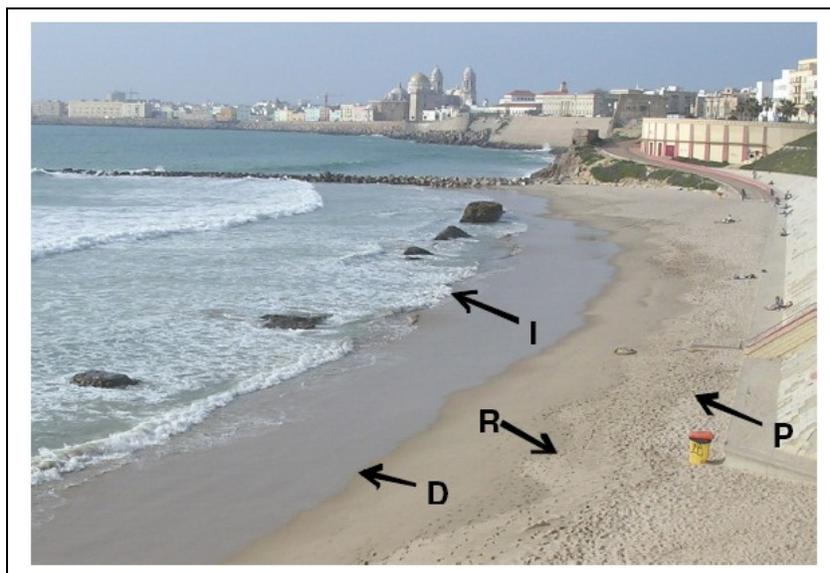


Figura 12.- Indicadores de la línea de costa; marca de agua dejada por la última pleamar (P) y línea de *run up* actual (R). Otras líneas observables en una fotografía aérea serían el

limite de drenaje del *backwash* (D) y el nivel del mar instantáneo (I), en Del Río-Rodríguez y Gracia-Prieto (2008).

Determinado el indicador de la línea de costa y con las fotografías aéreas ya georeferenciadas se utilizó el programa ArcGIS para digitalizar la línea de costa. Para esto se estableció como escala de trabajo 1:1'000 con la finalidad de ser lo mas objetivo posible en este proceso. Para este mismo fin se utilizaron los puntos tomados con el GPS visualizándolos en X Y para posteriormente digitalizar la línea de costa actual.

### **6.5 Estimación de los cambios de la línea de costa**

Se realizaron tres estimaciones distintas, la primera fue determinar los cambios de erosión y acreción de dos zonas (I y II) donde los cambios eran evidentes según las líneas de costa, la segunda fue la determinación del desplazamiento de la barra rocosa que conforma la parte oeste de la desembocadura del arroyo y por ultimo se estimo la perdida del espigón entre los años 1973-1985.

#### **6.5.1 Cambios erosión-depositación**

Con las líneas de costa digitalizadas se prosiguió a establecer dos punto que fuesen permanentes durante el periodo de estudio y que unidos entre sí mediante una línea base ésta se encontrara paralela a la línea de costa, el paso siguiente consistió en generar una serie de transectos ordenados de este a oeste, los cuales fueron perpendiculares a la línea base, estos fueron trazados hacia el mar, separados entre si 20 metros para la zona I y 40 metros para la zona II (Figura 13), después se midieron las distancias entre la línea base y la intersección con la línea de costa para después analizar los cambios. Para la estimación de los cambios para el 2009 se tomaron los puntos de referencia con el GPS.

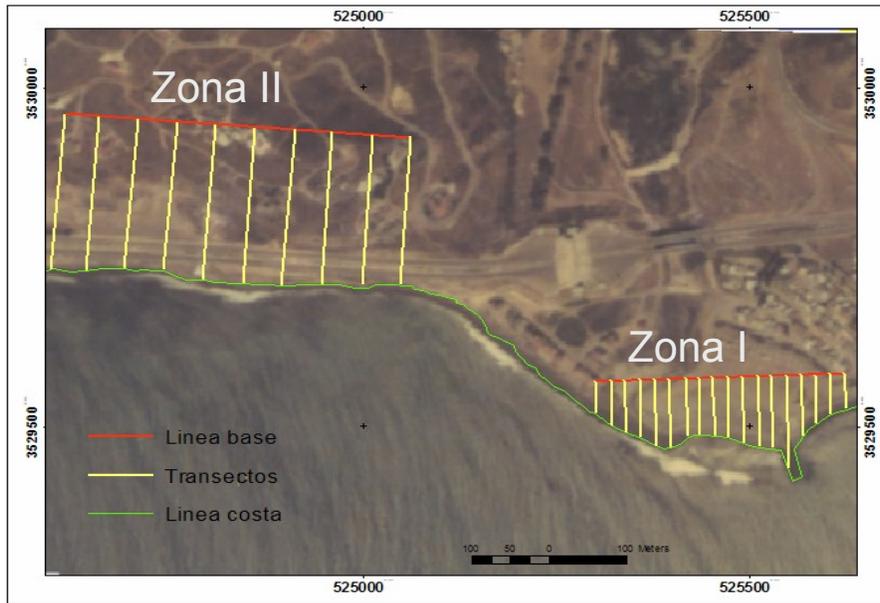


Figura 13.- Zonas y trazado de los transectos, se numeraron de este a oeste, fotografía aérea de 1973.

Con las medidas calculadas se determinaron las diferencias entre fechas consecutivas, el cálculo consiste en restar a las distancias de los transectos de la fecha mas reciente las distancias de la fecha mas antigua, los valores negativos significan erosión ya que es una perdida de material y los valores positivos representan acreción (depositación) ya que es un aumento de material. Los resultados se graficaron para observar la tendencia de las variaciones.

### **6.5.2 Desplazamiento de la barra rocosa**

Para el cálculo del movimiento de la barra rocosa fue necesario localizar un rasgo base el cual era permanente durante el periodo de estudio, así como la punta de la barra rocosa (extremo oeste de la desembocadura del arroyo), paso seguido fue trazar un transecto y determinar la distancia existente entre estos dos puntos (Figura 14). Para estimar el desplazamiento para el 2009 se tomo la posición con el GPS tanto del rasgo base, como de la punta rocosa.

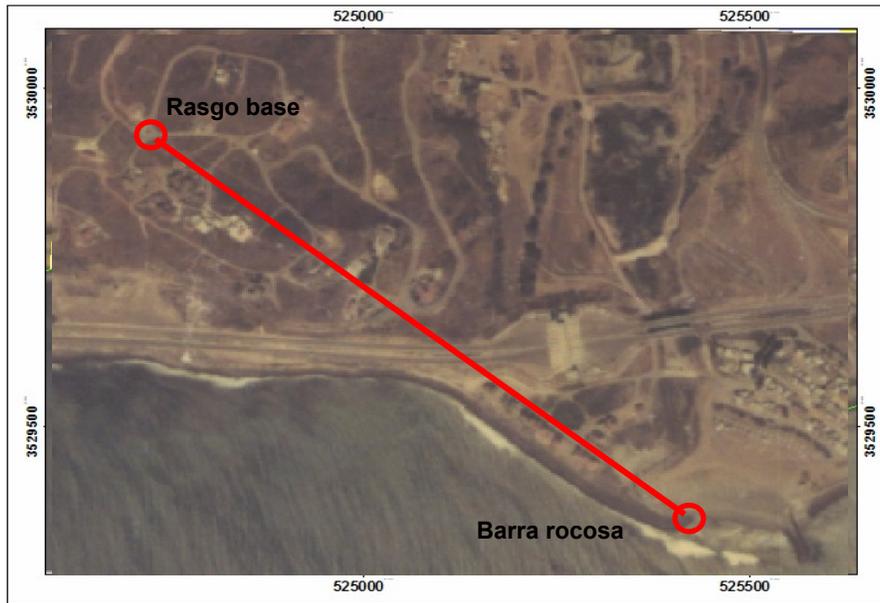


Figura 14.- Ubicación de los rasgos fisiográficos, fotografía aérea de 1973.

### 6.5.3 Cambios del espigón

La estimación de la pérdida que sufrió el espigón en 12 años se determinó midiendo la longitud que presentaba la estructura en 1973 y lo mismo para 1985, así mismo se analizaron los cambios en años más recientes.

### 6.6 Tasa de cambio

El análisis estadístico se realizó tanto para las zonas I y II, como para el desplazamiento de la barra rocosa. El método utilizado fue la media de las tasas (*average of rate*) y se escogió por dos razones; la primera que se contaba con más de un par de fotografías de fechas consecutivas y la segunda por ser sensible a cambios sustanciales en la tendencia evolutiva, por lo que en cierta medida filtra la variabilidad a corto plazo. Éste es una variación del método tasa de punto final (*end-point rate*), el último consiste en considerar únicamente dos líneas de costa, la más reciente menos la más antigua y la distancia resultante se divide

entre el número de años transcurridos y el primero calcula una tasa de punto final para cada par de datos disponible, y promediar todas las tasas resultantes.

### **6.7 Fuentes de error.**

Al evaluar las variaciones de la línea de costa utilizando fotogrametría aérea digital, se presentan fuentes de error que deben ser tomadas en consideración (Morton *et al*, 2004; en Del Río-Rodríguez y Gracia-Prieto, 2008):

- Errores relacionados con el modo de adquisición de la fotografía; distorsión del lente, relieve del terreno, variaciones de altitud del avión y balanceos del mismo.
- Errores relacionados con las técnicas de procesado de la imagen; escaneo de la fotografía y derivados del proceso de georeferenciación.
- Errores relacionados con elementos sobre el terreno que causan variabilidad costera a corto plazo y/o no relacionada con procesos de erosión o acreción (fotografías tomadas durante un evento de oleaje de gran altura o después de una regeneración artificial de playa, acantilados estabilizados artificialmente, dunas revegetadas, etc.).

Sin embargo la mayoría de los errores mencionados anteriormente se pueden corregir hasta cierto punto mediante diversos procedimientos. Es un hecho que siempre existe un cierto grado de incertidumbre en las posiciones de la línea de costa interpretadas y en las tasas de cambio que de ellas se derivan, por lo que es necesario cuantificar o estimar, en la medida de lo posible, dicha incertidumbre, de modo que los resultados de la medición deben incluir los rangos de error correspondientes (Del Río-Rodríguez y Gracia-Prieto, 2008).

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Líneas de costa

Con el material y la metodología realizada fue posible digitalizar 5 escenarios de la línea de costa, podemos observar a simple vista las variaciones en el área del deslizamiento, desembocadura del arroyo (desplazamiento de la barra rocosa) y parte SE de la playa, donde se observa la pérdida de parte de la estructura del espigón (1973-1985), así como el cubrimiento de la parte que se mantuvo (Figura 15).

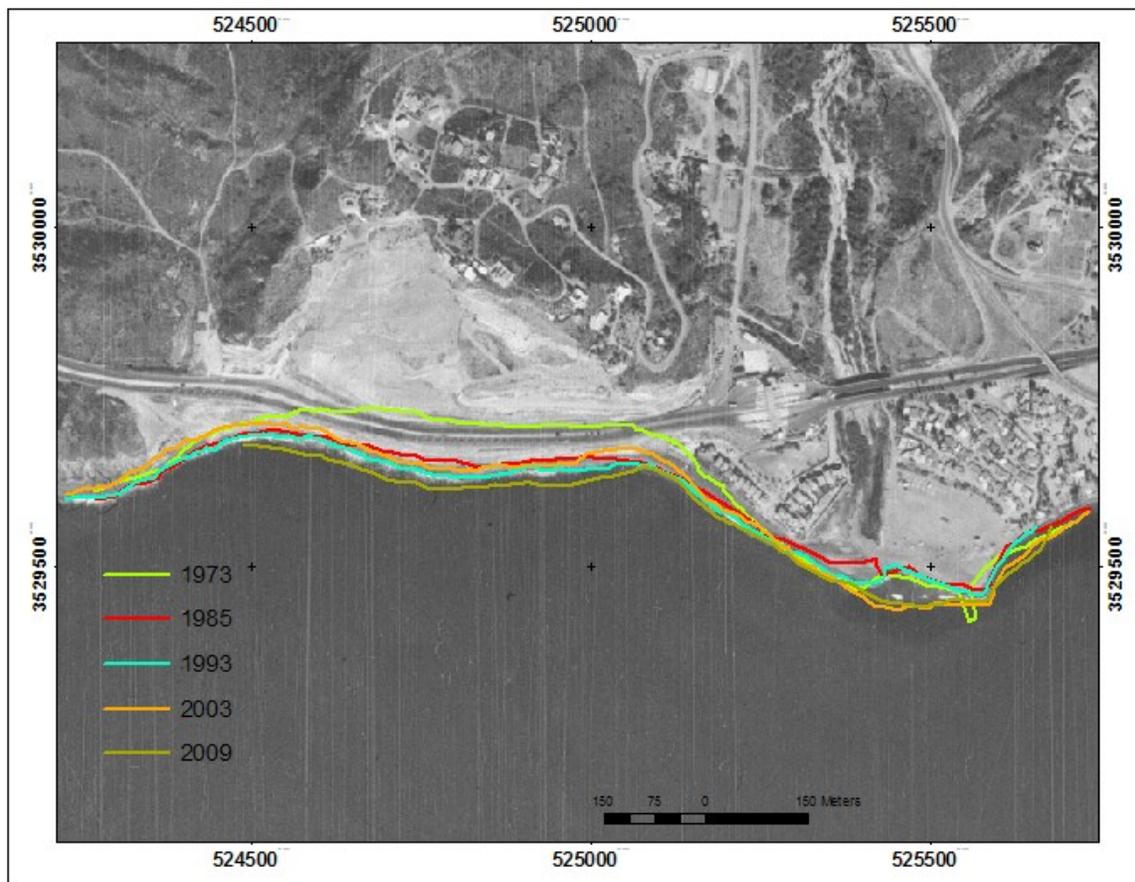


Figura 15.- variaciones de la línea de costa en la zona I en el periodo 1973-2009.

## 7.2 Cambios de la línea de costa

### 7.2.1 Zona I (playa San Miguel)

Para determinar la variación de la línea de costa se realizaron 18 transectos (Figura 14) con una longitud entre 38 y 143 metros (Tabla III), en los cuales se encontró valores máximos de erosión (valores negativos) y acreción (valores positivos) de 38 y 53 metros respectivamente (Tabla IV), que al graficarse presentaron tasas de cambio muy variables (Figura 17).

Tabla III.- Distancias de los transectos de la zona I (en metros), en rojo el valor máximo y mínimo.

Transecto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1973	56	62	73	97	143	107	106	97	90	88	81	90	108	99	88	76	66	51
1985	48	65	95	118	112	110	105	97	83	83	89	69	70	71	68	57	46	38
1993	42	61	87	123	118	110	102	94	82	71	76	95	91	84	76	61	48	38
2003	69	81	99	138	124	125	131	135	135	139	134	124	114	100	84	70	61	57
2009	73	86	106	125	122	121	124	126	125	122	115	109	95	85	80	70	58	52

Con la finalidad de visualizar las áreas de erosión y acreción de una manera mas sencilla se graficaron las distancias resultantes de los transectos (Figura 16).

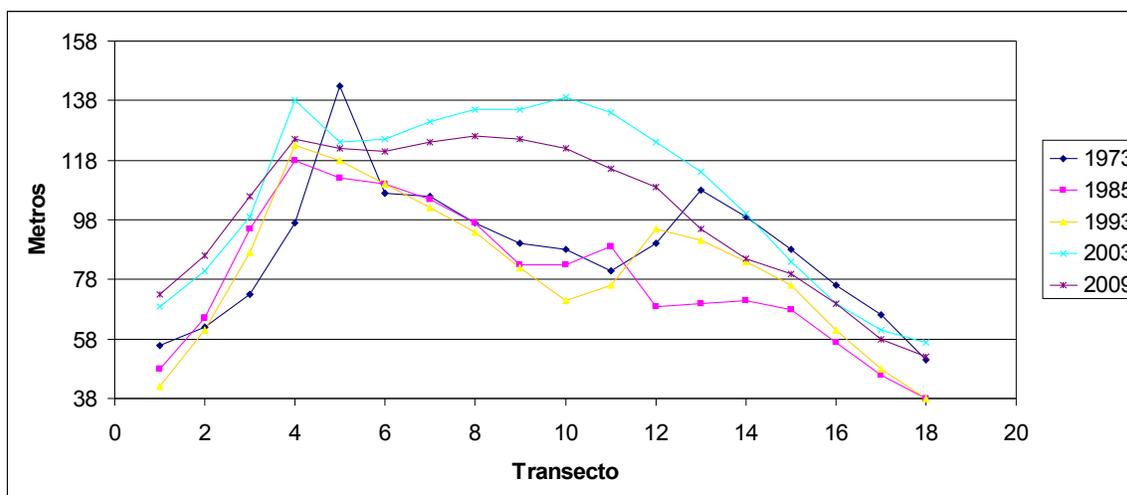


Figura 16.- Distancias de los transectos de la zona I, el transecto 1 corresponde a la parte este de la playa San Miguel y el transecto 18 a la parte oeste.

Tabla IV.- Diferencias de los transectos de la zona I (en metros), los valores positivos representan acreción y los negativos erosión, en rojo los valores máximos extremos para el periodo 1973-2003.

Transecto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1973	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1973-1985	-8	3	22	21	-31	3	-1	0	-7	-5	8	-21	-38	-28	-20	-19	-20	-13
1973-1993	-14	-1	14	26	-25	3	-4	-3	-8	-17	-5	5	-17	-15	-12	-15	-18	-13
1973-2003	13	19	26	41	-19	18	25	38	45	51	53	34	6	1	-4	-6	-5	6
1973-2009	17	24	33	28	-21	14	18	29	35	34	34	19	-13	-14	-8	-6	-8	1

Tabla V.- Tasa anual de cambio, tasa media anual y promedio (metros/años) de la zona I en el periodo 1973-2009, los valores positivos corresponden a acreción y los negativos a erosión, en rojo los valores máximos del periodo 1973-2003.

Transecto	Tasa anual					Tasa Media Anual (1973-2009)	Tasa Media Anual (1973-2003)
	1973	1985	1993	2003	2009		
1	0	-0.67	-0.75	2.70	0.67	0.49	0.32
2	0	0.25	-0.50	2.00	0.83	0.65	0.44
3	0	1.83	-1.00	1.20	1.17	0.80	0.51
4	0	1.75	0.63	1.50	-2.17	0.43	0.97
5	0	-2.58	0.75	0.60	-0.33	-0.39	-0.31
6	0	0.25	0.00	1.50	-0.67	0.27	0.44
7	0	-0.08	-0.38	2.90	-1.17	0.32	0.61
8	0	0.00	-0.38	4.10	-1.50	0.56	0.93
9	0	-0.58	-0.13	5.30	-1.67	0.73	1.15
10	0	-0.42	-1.50	6.80	-2.83	0.51	1.22
11	0	0.67	-1.63	5.80	-3.17	0.42	1.21
12	0	-1.75	3.25	2.90	-2.50	0.48	1.10
13	0	-3.17	2.63	2.30	-3.17	-0.35	0.44
14	0	-2.33	1.63	1.60	-2.50	-0.40	0.22
15	0	-1.67	1.00	0.80	-0.67	-0.13	0.03
16	0	-1.58	0.50	0.90	0.00	-0.05	-0.05
17	0	-1.67	0.25	1.30	-0.50	-0.15	-0.03
18	0	-1.08	0.00	1.90	-0.83	0.00	0.20
Promedio (1973-2009)						0.23	
						Promedio (1973-2003)	0.52

Las tasas de cambio anual correspondiente al periodo de estudio presentaron una variación máxima 3.17 y 6.8 metros de erosión y acreción respectivamente, así como una tasa media

anual máxima de 0.31 y 1.15 metros de erosión y acreción y un promedio de 0.52 metros. También se realizó el calculo incluyendo la línea de costa del 2009, el cual presento cambios significativos en las tasas medias anuales máximas a 0.39 y 0.80 metros de erosión y acreción, así como un promedio menor de 0.23 metros (Tabla V).

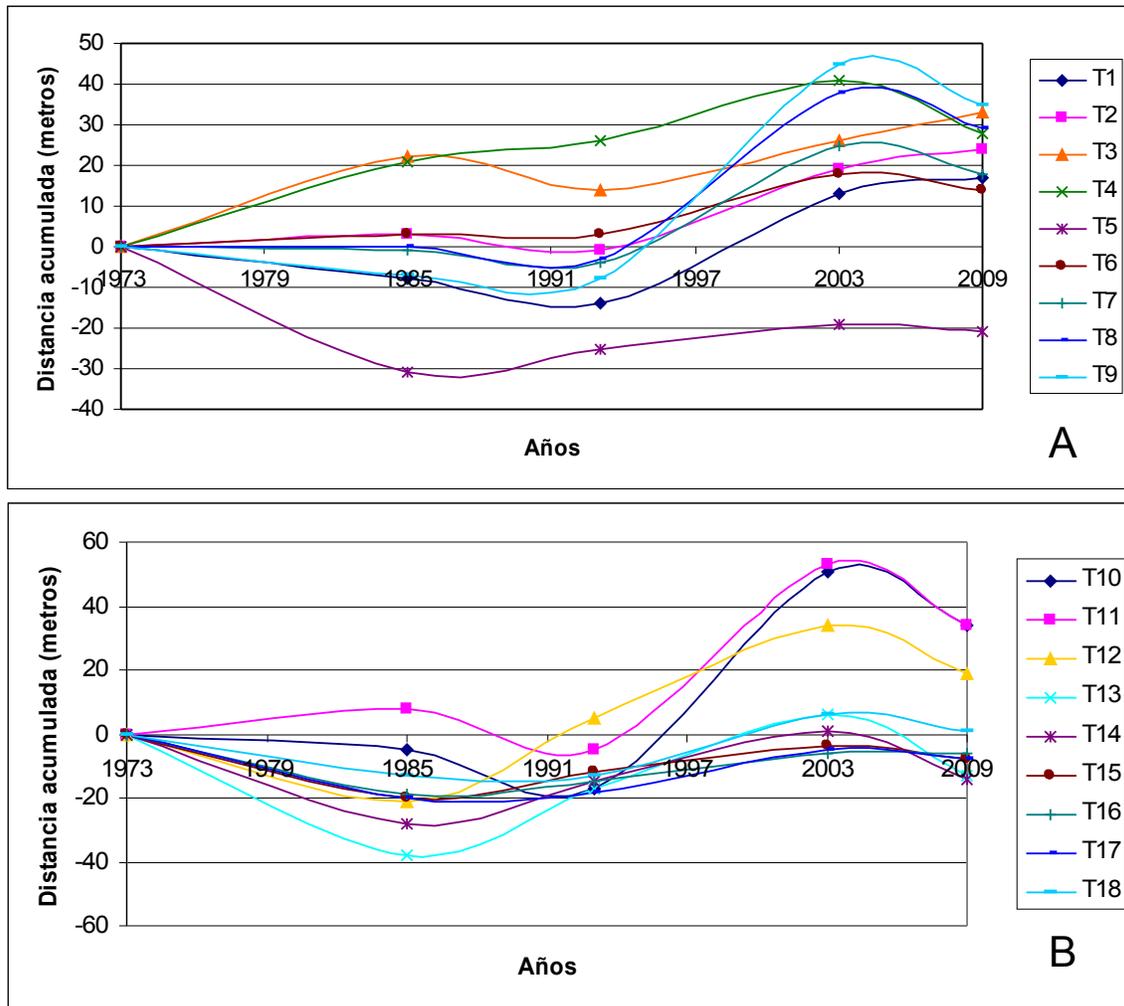


Figura 17.- Tendencias de cambio de la línea de costa en zona I para el periodo 1973-2009. A= transectos del 1-9 y B= transectos del 10-18.

### 7.2.2 Zona II (deslizamientos)

El cálculo de las variaciones generadas por los deslizamientos se utilizó las fotografías de 1973 y 1985 (Figuras 6 y 7) ya que estas evidencian el mayor cambio de manera consecuente. Para ello se determinó la diferencia existente entre estos años por transecto, los cuales presentaron un cambio entre 38 y 62 metros, y un promedio de 50.1 metros (Tabla VI).

Tabla VI.- Longitudes, diferencias y promedio de la zona II en el periodo 1973-1985, en rojo el valor máximo, mínimo y el promedio.

Transecto	1973	1985	Diferencia (m)
1	218	263	45
2	226	264	38
3	224	270	46
4	231	282	51
5	233	291	58
6	230	287	57
7	222	284	62
8	222	279	57
9	229	276	47
10	231	271	40
		<b>Promedio</b>	<b>50.1</b>

### 7.2.3 Espigón

La presencia del espigón se observa en las fotografías de 1961-1972 y 1973 (Figuras 5 y 6) y se estimó su longitud en 70 m. dicha estructura se observa en la línea de costa de 1973 (Figura 15), sin embargo para 1985 se calculó una pérdida de su estructura de 40 m y el resto del espigón (30 m) quedó cubierto por el material que quedó atrapado por la misma estructura (Figuras 7-9, fotografías 3 y 4 en anexos).

#### 7.2.4 Barra rocosa (desembocadura del arroyo)

Las fotografías dan evidencia de que la barra rocosa (desembocadura del arroyo) a cambiado con el paso del tiempo (Figuras 4-9), se calculo el desplazamiento con respecto a la fotografía mas antigua (1956-1958) que fue de 155 metros, pero para el periodo de 1973-2003 fue de 84 m, presentándose desplazamiento máximos de 30 a 101 metros, al oeste (valores negativos) y hacia el este (valores positivos), y tasas anuales de desplazamiento entre 2.42 y 6.67 metros/año, hacia el oeste y este respectivamente y un desplazamiento promedio de oeste a este de 3.09 metros/ año para el periodo 1973-2009 y para el periodo 1973-2003 de 1.89 metros/años (Tabla VII).

Tabla VII.- Distancias, diferencias, tasa anual y promedio del desplazamiento de la barra rocosa en el periodo 1956-1958 a 2009, los valores negativos corresponde a movimiento hacia el oeste y los positivos hacia el este, en rojo los valores máximos extremos, el desplazamiento total (1973-2003) y la tasa promedio de desplazamiento (1973-2003).

Fotografía	Distancia (m)	Diferencia (m)	años	tasa (m/a)
1956-1958	815	0	0	0
1961-1972	785	-30	ND	ND
1973	886	101	ND	ND
1985	857	-29	12	-2.42
1993	889	32	8	4
2003	930	41	10	4.1
2009	970	40	6	6.67
Desplazamiento (1973-2009)		155	Promedio (1973-2003)	3.09
Desplazamiento (1973-2003)		84		

ND=No Determinado.

### **7.3 Errores**

#### **7.3.1 Efecto de la marea**

Se utilizó el programa MARV081 (elaborado por CICESE) para determinar el rango de la marea con la intención de estimar el error por efecto de la marea. Considerando que las fotografías fueron tomadas entre las 10-14 horas, para el caso de 1973, se determinó la variación mensual, estimación de 0.98-0.28 metros de alta a baja, por su parte para 1985, 1993 y 2003 los rangos fueron 0.35-0.56, 0.98-0.56 y 0.49-0.56 metros de alta a baja respectivamente (ver calendarios de mareas en anexos). Aunque no se calculó la pendiente por conocimiento del autor el perfil de playa de la zona de estudio presenta en promedio una pendiente aproximada de 20%, siendo mayor en invierno y menor en verano (ver Fotografías 1-4 en Anexos), lo que significa que por un metro en la vertical se recorren 5 metros en la horizontal, por tanto podemos decir que nuestro margen de error por efecto de la marea entre líneas de costa es aproximadamente  $\leq 5$  metros.

#### **7.3.2 Sistema de posicionamiento Global**

A pesar que el dispositivo GPS puede disminuir el margen de error mediante el sistema de aumentación basado en satélites (WAAS por sus siglas en inglés), sistema que brinda una precisión en la posición menor a 2 metros, no se contó con este servicio, por lo que durante la salida al campo el GPS mantuvo un error de 4 metros, error tanto en la línea de costa y los puntos de control (para la línea base zona I, rasgo base y punta de la barra rocosa).

#### **7.3.3 ER Mapper**

Durante el proceso de georeferenciación los valores de los errores (RMS) fueron iguales o menores a 1 m.

## 8. DISCUSIONES

### 8.1 *Cambios en la zona I*

En 30 años (1973-2003), la playa de San Miguel a presentado cambios significativos como se observa en las Figuras 15-17 y Tabla IV, los transeptos 1-4, 6-14 y 18 manifiestan una acreción promedio de 24.75, 30.1 y 6 m respectivamente, así como una erosión promedio en los transectos 5, y 15-17 de 19 y 5 m respectivamente. La acreción se debe al aporte tanto de los deslizamientos, arroyo Cañón El Carmen y de los cantiles marinos, embate del oleaje, corriente litoral (dirección oeste a este), así como a la morfología de la línea de costa, por ejemplo en los transectos 1-4 puede deberse a la zona en calma que provee el espigón, propiciando así el deposito de material litológico, en los transectos 6-14 al desplazamiento de la barra rocosa que funciona como trampa de sedimento y el transecto 18 a la acumulación de cantos rodados por efecto de la misma barra que frena al material. La erosión puede ser el resultado del oleaje que se presenta en la zona (de hasta 10 m fuera de la bahía en 1988, mencionado por Guillen-Sánchez, 1998) y la corriente litoral que genera (0.98 m/s para alturas de ola de 2.68 m, calculada por Ahumada-Sempoal, 1993), por ejemplo en el transecto 5 manifiesta la perdida estructural del espigón de 19 m aunque se estimo en 40 m, dado que el transecto no coincidió con el extremo sur del espigón (ver Fotografía 10 en anexos).

En general la zona I presenta una tendencia de variación irregular que como menciona Del Río-Rodríguez y Gracia-Prieto (2008) se asocia a intervenciones antrópicas puntuales, eventos energéticos aislados, etc. Por lo que podemos decir que no responde a causas que actúan a mediano y largo plazo sino más bien a causas que operan de manera repentina y a corto plazo. El espigón corresponde a la intervención antrópica mencionada, y el oleaje extremo, corrientes intensas tanto fluviales como marinas, corresponden a los eventos naturales y los deslizamientos como consecuencia de ambos, los cuales fueron reportados por Plaza-Flores (1979) como responsables de las modificaciones en la zona sureste de la playa quien estimo un deposito de 2'076 m<sup>3</sup> para septiembre de 1977 (ver fotografías 5-7

en anexos), y el resto quedo cubierto como se observa para 1985 (Figura 7, 15, 16, Fotografías 3, 4 y 10 en anexos).

## **8.2 Cambios en la zona II**

El cambio que se presenta en el área comprendida entre la caseta de cobro y Punta San Miguel en los años 1973 y 1985 (Figuras 15 y 17), es consecuencia de los deslizamientos de agosto de 1976 (ver fotografías 1 y 2 en anexos), que modificaron la costa con un avance hacia el mar (acreción) en promedio de 50.1 metros con respecto a la línea de costa de 1973, que corresponde con los 50 m reportados por Plaza-Flores (1979), en los años sucesivos no se presentan cambios tan marcados, sin embargo hay que mencionar que la zona se encuentra en continuo movimiento hacia el mar, como lo reportan investigadores que han estudiado las causas y efectos de los deslizamientos, y las velocidades de avance han cambiando con el tiempo como resultado de causas naturales, así como a proyectos preventivos y de mantenimiento de la carretera que van desde 0 a 70 cm/mes (Minch, 1972; Rico, *et al*, 1969; Ledesma-Vázquez y Huerta-Santana, 1993; Morales-Pérez, 1995). Además hay mencionar que la parte baja de la playa esta compuesta por material rocoso de origen volcánico de aproximadamente 0.5 - 1 metro de diámetro que le dan estabilidad de la erosión marina (ver Fotografía 1 en anexos).

## **8.3 Cambios del espigón**

El espigón perdió 40 de sus 70 metros de longitud entre los años 1973 a 1985, perdida que es evidente en el transecto 5, y que corresponde con un aumento en los transectos 2-4, por lo que podemos decir que parte del material que conformaba la estructura, así como el aportado por el arroyo y los cantiles fue transportado hacia los transectos 1-4 acrecentando la línea de costa en promedio 24.75 m (Figuras 14 y 16, Fotografías 5-7 y 10 en anexos).

#### **8.4 Desplazamiento de la barra rocosa**

La desembocadura del arroyo Cañón El Carmen presentan un movimiento oeste-este, correspondiente al desplazamiento de 155 metros para el periodo de 1956-1958 a 2009 y para el periodo 1973-2003 ha sido de 84 m (Tabla VII) de una barra rocosa, movimiento que coincide con la mencionado por Plaza-Flores (1979) que tuvo un avance hasta el espigón (ver fotografías 8 y 9 en anexos), pero que fechas posteriores tuvo una ruptura que erosiono  $1'778.4 \text{ m}^3$  de sedimento y formo un delta en la zona de rompiente, evento que sucedió entre finales de 1977 a principios de 1978 cuando se presentaron precipitaciones anormales reportadas por Blanco *et al* (2009) de 157.3 mm. Este movimiento es el resultado del oleaje y la corriente litoral (Figura 3), consecuencia del ángulo de incidencia del oleaje sobre la playa, corriente que fue reportada por Argote (1975) y Ahumada-Sempoal (1993), el ultimo calculó una velocidad máxima de 0.98 metros/segundo asociado a oleaje del noroeste ( $290^\circ$ ) y altura de 2.68 metros. Este movimiento a propiciado la acreción de 30.1 m entre los transectos 6-14 (Tabla IV) que fue más evidente entre los años 1993 al 2003 (Figura 15-17).

#### **8.5 Cambios observados por los usuarios de la playa**

Los resultados coinciden en parte con lo mencionado por los usuarios de la playa, quienes comentan que la desembocadura del arroyo a cambiado su curso, desplazándose de oeste a este, y que dicho cambio a desviado el aporte de sedimento hacia el este de la bahía (causado por el oleaje y la corriente litoral), disminuyendo el aporte a la zona de surf. Mas no podemos decir que este aporte beneficiaba la manera de romper de la ola, aseveración que el presente trabajo no puede hacer ya que no es el objeto de estudio. Sin embargo tampoco queda descartada esta posibilidad, por lo que se recomienda llevar a cabo estudios para este fin. Lo que si podemos asegurar es que dicha estructura (barra rocosa) propicia la reflexión del oleaje cuando se presenta la pleamar ya que no se alcanza a disipar totalmente la energía del oleaje como sucedía antes de 2003, por su cercanía con la zona de surf (ver Fotografía 10 en anexos). Además como se puede observar en las Figuras 4-9, la estructura obstruye el recorrido de la ola, la cual rompía una mayor longitud (1956-1958), situación

que se presenta actualmente con menor frecuencia, ya que para ello son necesarias alturas mayores de 3 m que rompan a mayor distancia de la orilla, logrando así librar los remanentes del espigón (en comunicación con residentes y los usuarios de la playa).

A pesar de los cambios observados, analizados y estimados, existen cambios que no se puede percibir dado el tiempo transcurrido entre escenas, así como por la temporada en que fueron tomadas las fotografías.

## 9. CONCLUSIONES

- Los deslizamientos propiciaron un avance hacia el mar de 50.1 metros entre los años 1973 y 1985.
- La tendencia de cambio para el periodo de estudio (1972-2003) en la playa de San Miguel fue de acreción con un promedio 19 m y una tasa de cambio de 0.23 metros/año.
- La barra rocosa presenta un movimiento unidireccional hacia el este de la Bahía de Todos Santos que corresponde con el transporte litoral, alcanzando 84 m para el periodo 1973-2003, con una tasa de 3.09 metros/años y 155 metros para el periodo 1956-1958 a 2009.
- El espigón perdió aproximadamente 40 m de su longitud entre los años 1973 a 1985 y el remanente quedó cubierto de sedimento hasta la fecha.
- La combinación de factores de origen natural (oleaje, corrientes y precipitación) como antrópico (construcción de la carretera de cuota y el espigón) han modificado la línea de costa de la zona de San Miguel, B. C.
- De lo anterior podemos decir que los cambios han propiciado una disminución de aporte de sedimento a la zona de surf por la modificación de la desembocadura del arroyo Cañón El Carmen, así como la reflexión del oleaje en pleamar por efecto de la barra rocosa y se ha disminuido la longitud de rompimiento de la ola por consecuencia del espigón.
- Esta metodología nos da una perspectiva de lo sucedido a mediano y largo plazo, ya que al promediar las tasas de cambio filtran de alguna manera los cambios a corto plazo.

## **10. RECOMENDACIONES**

Para determinar lo mejor posible los cambios que se presentan en la línea de costa se recomienda recabar toda la información posible, ya sean fotografías aéreas, ortofotos, imágenes satelitales de la zona a estudiar, esperando que los intervalos entre imágenes sea lo mas corto y el periodo de estudio lo mayor posible. Así como realizar la ortorectificación ya que disminuye el margen de error, para lo cual es necesario conocer los datos de calibración del lente de la cámara, así como la fecha y hora cuando fueron captadas.

Para los usuarios de la playa, con la finalidad de comprender el efecto del arroyo y otros factores sobre la forma de romper del oleaje se recomienda llevar a cabo estudios que ayuden a establecer el aporte de sedimento del arroyo, transporte litoral, su depositación y el efecto sobre la ola. Para lo que se hace necesario conocer las características del fondo y del sedimento, topografía y perfiles de playa, así como la climatología del oleaje, igualmente es necesario determinar los factores que pueden disminuir la calidad de la ola, así como las acciones más recomendables para conservar y mejorar las características de la ola para la practica del surf, con la finalidad de que generaciones futuras cuenten con este recurso.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- Arriaga-Ramírez, S. (2008) Tendencias observadas de extremos de precipitación en el noreste de México y suroeste de Estados Unidos y proyecciones bajo condiciones de cambio climático. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, México.
- Ahumada-Sempoal, M. A. (1993) Corrientes litorales inducidas por oleaje en la Bahía de Todos Santos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, México.
- Blanco, R., García, C., Inzunza, E., Rousseau, P. Y Soares, J. (2009) Flooding Tendencics for the City of Ensenada, Baja California México, 1948-2004. WIT Transactions on Ecology and the Environment (aceptada en junio de 2009).
- Castillo-Valdez, H. F. (1995) Cambios en la línea de playa en la boca del Estero de Punta Banda. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, 51 pp.
- Cruz-Castillo, M. y Delgado-Argote, L. A. (2000) Los deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California. Unión Geofísica Mexicana, 20(4): 418-432.
- Cruz-Colin, M. E. y Cupul Magaña, L. A. (1997) Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la Bahía de Todos Santos, Baja California en el periodo de 1970 a 1991. Ciencias Marinas 23 (3): 303-315.
- Cupul-Magaña, A. L. (1984) Paleogeografía de la Bahía de Todos Santos, Baja California, para el Cretácico Superior. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, México.
- Del Río-Rodríguez, L. y García-Prieto, F. J. (2008) fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa. Actas de las Jornadas Técnicas “las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas”, 12-17.

- García-Gastelum, A. (1997) Clasificación Integral del Litoral Costero de la Bahía de Todos Santos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, México.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P. and Allison, E. C. (1975) Reconnaissance Geology of the state of Baja California. The geological Society of America, Inc. U.E.A., 170 pp.
- Guillén-Sánchez, J. V. (1998) Estudio de las características oceanográficas frente al rompeolas del puerto de Ensenada, B. C.; para el diseño de un reflector de oleaje. Tesis de Ingeniería, Escuela de Ingeniería, UABC, Ensenada, México.
- INEGI (2008) Guía para la interpretación de cartografía batimétrica. INEGI, México, 21 pp.
- Ledesma-Vázquez, J. y Huerta-Santana, D. M. (1993) Slides and slumps on the coastal zone between San Miguel and El Descanso, Baja California, Mexico. In: Fermán-Aldama, J. L., Gómez-Morin, L. and Fischer, D. W , Coastal management in Mexico: The Baja California Experience.
- Marichal-González, A. E. (2001) Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito B. C., de 1994 a 1998. Tesis de Licenciatura, FCM, UABC, Ensenada, México.
- Minch, J. (1972) Landsliding and the Effects of Resort Development Between Tijuana and Ensenada, B. C., México. Technical Report No 0-72-1, Department of Geography, University of California.
- Morales-Pérez, M. B. (1995) Caracterización de los factores geológicos que controlan los deslizamientos de ladera en el área de San Miguel-Salsipuedes, Ensenada, B. C., México. Tesis de Ingeniería, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, México.
- Ortiz-Pérez, M. A. y Pérez-Vega, A. (1999) Evidencia documental de los cambios en la línea de costa por sedimentación rápida en la bahía de Matanchen, Nayarit México. Investigaciones geográficas 40: 58-70.

- Pijoan-Velasco, P. M. (2008) Importancia del surf en la ciudad de Ensenada, Baja California. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UABC, Ensenada, México.
- Rico, A., Springall, J. y Springall, G. (1969) Deslizamientos en la autopista Tijuana-Ensenada. Secretaria de Obras Publicas, México, 213 pp.
- Sepúlveda-Núñez, R. (2003) Variaciones morfológicas de la rada del Puerto de Ensenada, B. C., a partir del método de fotografía aérea multitemporal (1935-2001). Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., México. 65 pp.

### 11.1 *Paginas de Internet*

- <http://oceanografia.cicese.mx/predmar/> .....Revisado el 12 de julio de 2009.
- [http://mapserver.inegi.org.mx/siiv/siiv\\_in/siiv.cfm?c=1107](http://mapserver.inegi.org.mx/siiv/siiv_in/siiv.cfm?c=1107).....  
.....Revisado el 10 de julio de 2009.
- [http://www.cartografia.cl/index.php?option=com\\_content&task=view&id=186&Itemid=9](http://www.cartografia.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=186&Itemid=9)  
.....Revisado el 28 de Julio de 2009.

## ANEXOS

### Oleaje

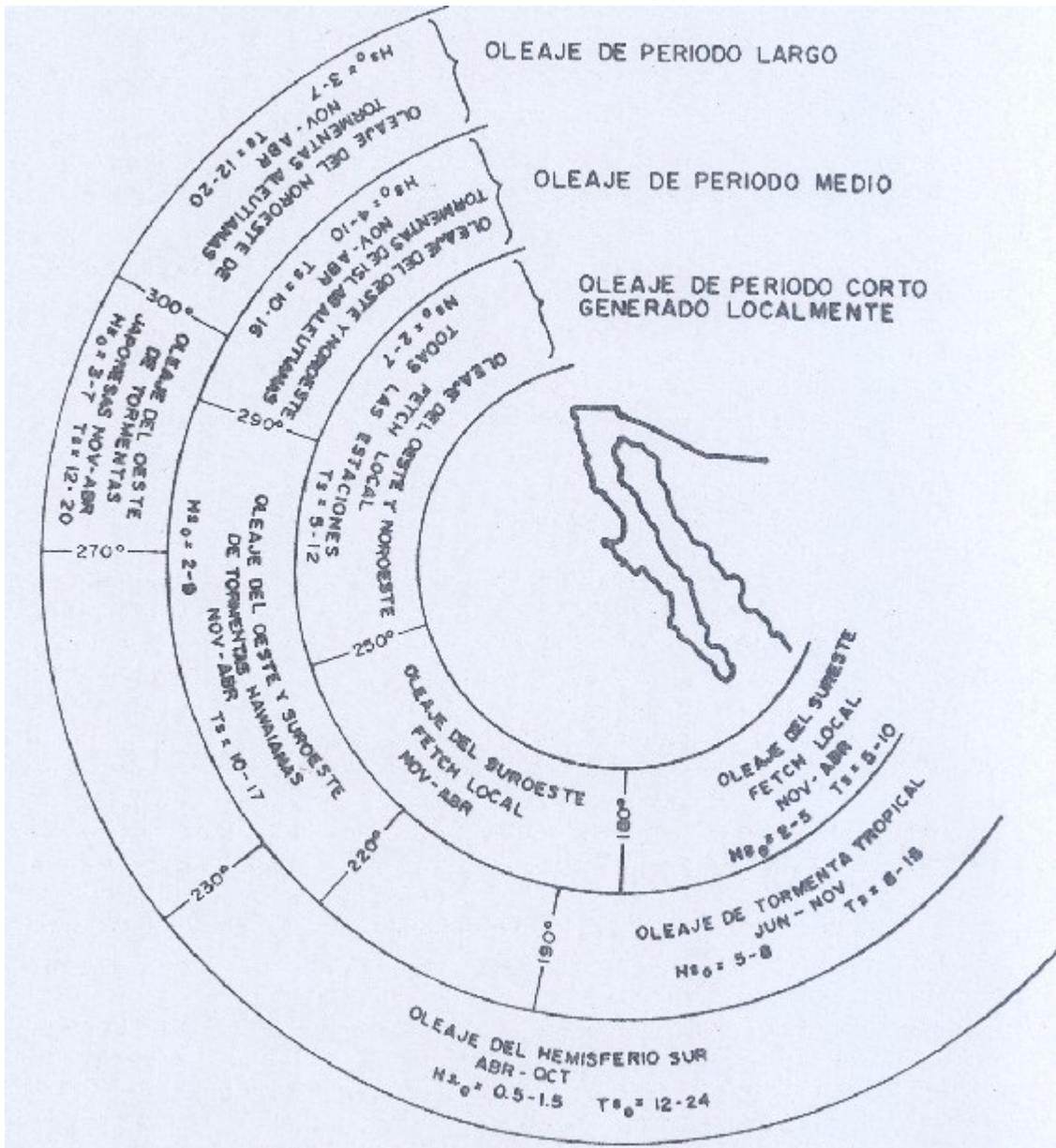


Figura 1.- Características del oleaje fuera de la Bahía de Todos Santos, B. C. (Wiegel, 1993: en Ahumada-Sempoal, 1993).

***Fotografías***



Fotografía 1.- Zona de los deslizamientos en julio de 2009, tomada por el autor, vista desde Punta San Miguel.



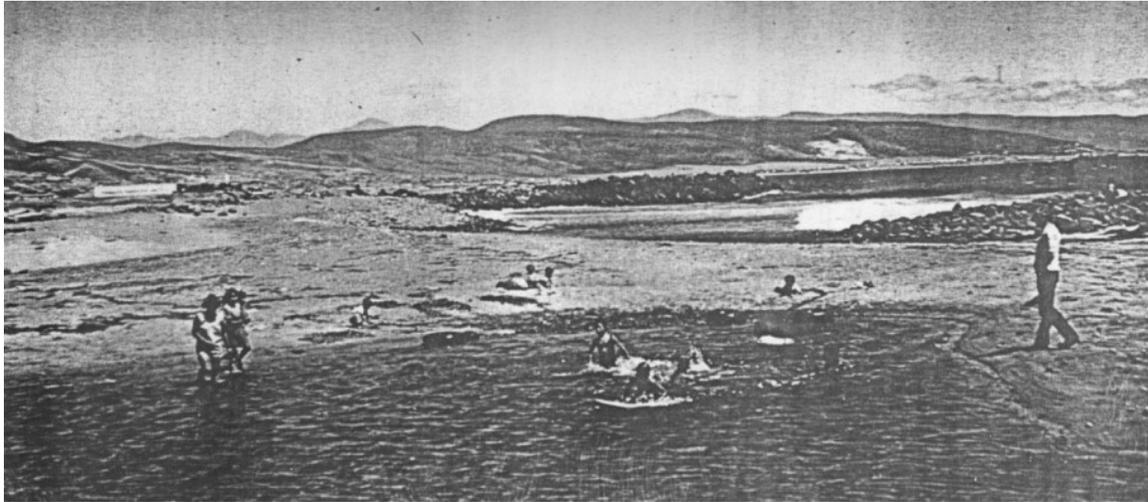
Fotografía 2.-Zona de los deslizamientos en agosto de 1977, tomada de Plaza-Flores (1979), vista desde Punta San Miguel.



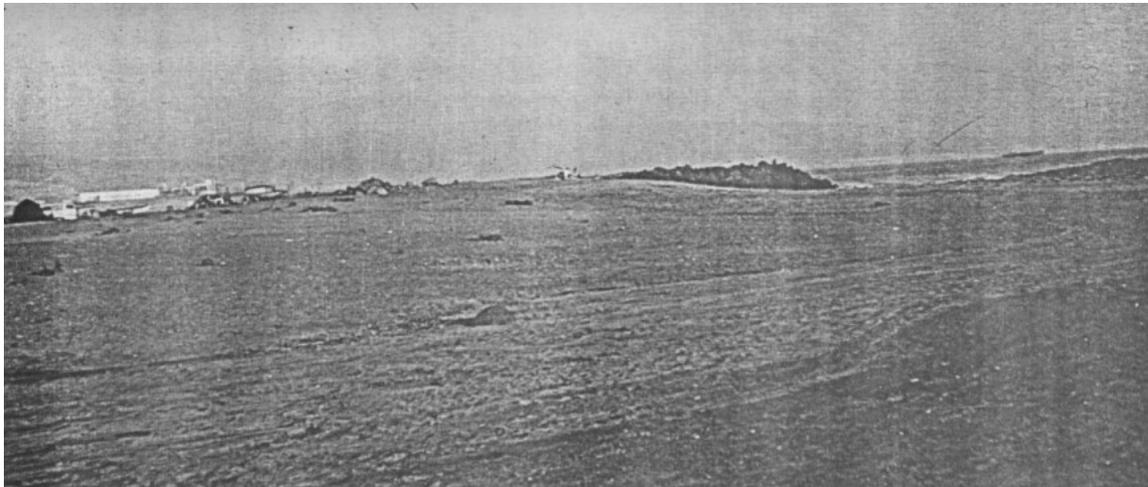
Fotografía 3.- Vista de la playa de San Miguel desde la zona de deslizamientos en febrero de 1976, proporcionada por Cesar García.



Fotografía 4.- Vista de la playa de San Miguel desde la zona de deslizamientos en julio de 2009, tomada por el autor.



Fotografía 5.- Playa de San Miguel antes del deslizamiento de 1976, tomada de Plaza-Flores (1979), vista oeste a este.



Fotografía 6.- Playa de San Miguel después del deslizamiento en octubre de 1977, tomada de Plaza-Flores (1979), vista oeste a este.



Fotografía 7.- Playa de San Miguel en julio de 2009 por el autor, vista oeste a este.



Fotografía 8.- Inundación de enero de 1978, tomada de Plaza-Flores (1979), vista de norte a sur.

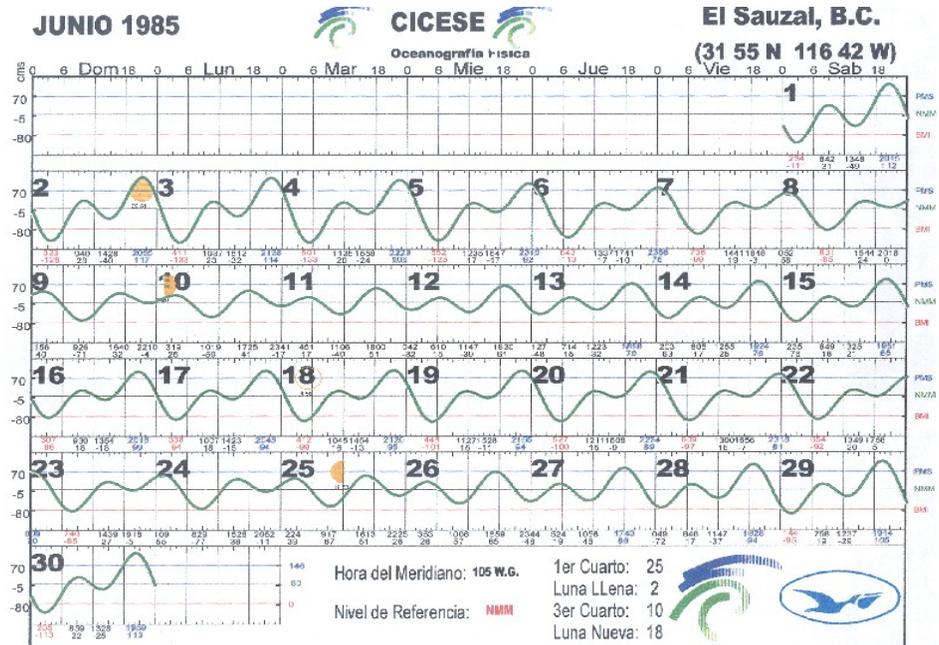
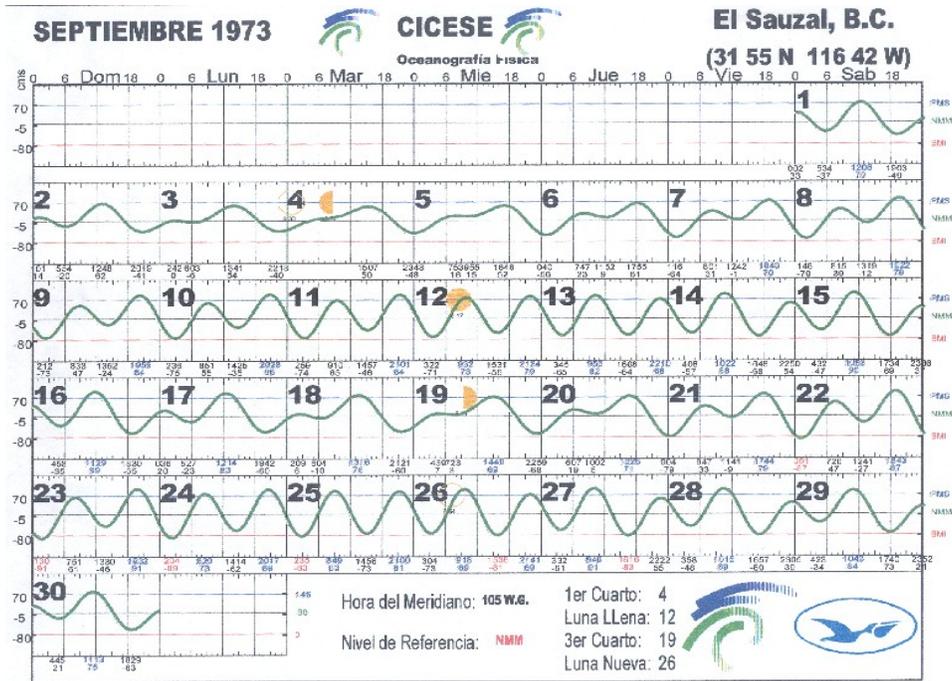


Fotografía 9.- Inundación de finales de diciembre de 2007, proporcionada por Nysai Moreno, vista de norte a sur.



Fotografía 10.- Línea de costa, transectos y fotografía aérea de 1973, y línea de costa de 1985.

# Calendarios de marea

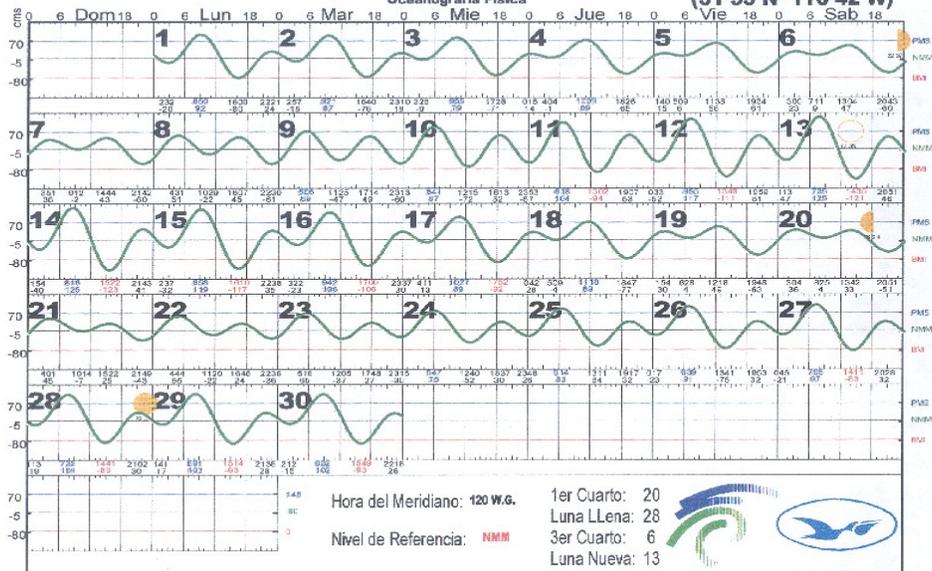


NOVIEMBRE 1993



El Sauzal, B.C.

(31 55 N 116 42 W)



ABRIL 2003



El Sauzal, B.C.

(31 55 N 116 42 W)

